

Université du Québec
Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

**ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES DES STRUCTURES SPATIALES
DE PRÉCIPITATIONS SUR L'AMÉRIQUE DU NORD DANS UN
CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

Par
Karine Guinard

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître es Sciences, M.Sc.
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Examineur externe	François Anctil Université Laval
Examineur interne	David Huard Consultant
Directeur de recherche	Alain Mailhot INRS, Centre Eau Terre Environnement
Codirecteur de recherche	Daniel Caya Consortium Ouranos

Remerciements

Le parcours de la maîtrise s'est déroulé dans un esprit d'exploration. Pour moi, il s'agissait de la découverte d'un domaine et de la contribution que je pouvais y apporter avec mes connaissances en informatique et en génie des technologies de l'information. Personnellement, la motivation a été l'élément le plus difficile à contrôler. Un moment prête à révolutionner la science, un autre se demandant pourquoi avoir entrepris une maîtrise. Ultimement, le périple en a valu la peine.

Mes remerciements vont principalement à mon directeur de recherche, Alain, pour ses judicieux conseils, sa direction, ses encouragements et sa confiance. Également à Daniel, mon codirecteur, pour sa contribution sous forme d'idées et de conseils propre à son expertise.

À toute l'équipe de recherche pour ces belles réunions et principalement à Guillaume Talbot, pour son aide avec les données. Un merci spécial à Silvia Innocenti pour son expertise et ses conseils en statistiques.

À monsieur David Plummer pour avoir gentiment accepté de partager ses masques de régions climatiques pour l'Amérique du Nord.

À mes collègues de maîtrise, en qui j'ai trouvé amitié. Les moments de divertissement ont été fort appréciés et m'ont fait sortir de mon isolement devant l'ordinateur. Je conserverai toujours un beau souvenir du groupe que nous avons formé dès le premier stage de terrain, malgré nos parcours tellement différents.

J'aimerais également remercier mon compagnon de vie, Vincent, pour son immense patience et son soutien, tout particulièrement dans mes moments de découragements. Merci aussi à ma mère, Michelle, pour son appui malgré la complexité que représente des études supérieures pour elle. Merci à mon père, Étienne, pour avoir éveillé en moi une curiosité scientifique et pour m'avoir encouragée à poursuivre des études universitaires. J'aurais aimé le voir sourire à la vue de ce mémoire.

Finalement, merci à l'INRS, au CRSNG et au FRQNT pour le soutien financier.

Résumé

L'augmentation de la température à l'échelle de la planète entraîne des changements dans le régime global des précipitations. Une hausse de la fréquence et de l'intensité des précipitations extrêmes pouvant avoir de nombreuses conséquences (p. ex. inondations, érosion des sols, refoulement des eaux en milieu urbain), il est essentiel de bien comprendre la nature et l'ampleur de ces changements. La plupart des études publiées à ce jour sur le sujet ont analysé des séries temporelles de précipitations. Dans la présente étude, les changements sont plutôt analysés à partir des structures spatiales de champs de précipitations horaires. Chaque structure de précipitations, définie comme une zone contiguë de précipitations supérieures à un seuil donné, est analysée à travers diverses caractéristiques géométriques (superficie, longueur des axes principal et secondaire, excentricité, orientation) et d'intensité (volume de précipitations, intensités maximale et moyenne, distribution des précipitations au sein d'une structure). L'analyse par objets, largement utilisée dans le domaine de la prévision météorologique, se révèle appropriée pour identifier et caractériser les structures de précipitations.

Les présents travaux visent principalement à caractériser l'évolution des structures de précipitations en climat futur en utilisant des simulations du Modèle régional canadien du climat (MRCC) sur l'Amérique du Nord. Le premier volet de l'étude consiste à évaluer la performance du MRCC à représenter les structures de précipitations observées en climat historique en comparant une simulation du MRCC piloté par la réanalyse ERA40 avec des observations (*NCEP Stage IV*) et avec des simulations du MRCC piloté par le Modèle climatique global canadien (MCGC). Le second volet utilise des simulations historiques (1961-1990) et futures (2071-2100) du MRCC piloté par le MCGC pour établir les changements projetés en climat futur concernant les caractéristiques des structures de précipitations.

Les résultats montrent que le MRCC présente certains biais systématiques sur l'ensemble du territoire à l'étude. Ainsi, le MRCC génère des structures de précipitations trop homogènes, avec des volumes et des intensités trop faibles. De plus, le pilote aux frontières du domaine (ERA40 ou MCGC) influence légèrement la représentation des structures par le MRCC pour le centre et l'est du continent. Finalement, les changements projetés à l'horizon 2071-2100 suggèrent un climat plus humide au nord l'hiver, plus sec au sud le printemps, plus convectif au centre l'été et plus humide au sud-est l'automne.

Mots-clés structure spatiale, modèle régional du climat, méthode par objets, champ de précipitations, variabilité naturelle, climatologie, radar

Abstract

Increases in temperature at the planet scale lead to changes in the global precipitation regime. A rise in the frequency and intensity of extreme precipitation events can have numerous consequences (e.g. floods, land erosion, urban water backflow), so it is essential to understand the nature and extent of these changes. Most studies published to date on the subject analyzed precipitation time series. In the present study, changes are analyzed using spatial structures of hourly precipitation fields. Each precipitation structure, defined as a contiguous area of precipitation over a given threshold, is analyzed through various geometric characteristics (area, major and minor axis lengths, eccentricity, orientation) and intensity characteristics (precipitation volume, maximum and mean intensities, precipitation distribution within a structure). Object-based analysis, widely used in the field of weather forecasting, proves to be appropriate to identify and characterize precipitation structures.

The present work mainly aims to characterize the evolution of precipitation structures in future climate using simulations from the Canadian Regional Climate Model (CRCM) over North America. The first part of the study assesses the CRCM performance to represent observed precipitation structures from historical climate by comparing a CRCM simulation driven with ERA40 reanalysis with observations (NCEP Stage IV) and with CRCM simulations driven by the Canadian Global Climate Model (CGCM). The second part uses historical simulations (1961-1990) and future simulations (2071-2100) from the CGCM-driven CRCM to establish projected changes in future climate regarding characteristics of precipitation structures.

Results show that the CRCM displays some systematic biases throughout the territory under study. Thus, the CRCM generates precipitation structures that are too homogeneous and underestimates precipitation volumes and intensities. In addition, driving data for the domain (ERA40 or CGCM) slightly influence the representation of structures by the CRCM for center and eastern parts of the continent. Finally, projected changes at the 2071-2100 horizon suggest a climate characterized by a wetter north in winter, a drier southwest in spring, a more convective center in summer and a wetter southeast in autumn.

Keywords spatial structure, regional climate model, object-based method, precipitation field, natural variability, climatology, radar

Table des matières

Remerciements	iii
Résumé	v
Abstract	vii
Table des matières	ix
Liste des figures	xi
Liste des tableaux	xvii
Liste des abréviations	xix
 I Synthèse	 1
1 Introduction	3
1.1 Enjeux liés aux précipitations	3
1.2 Changements climatiques et précipitations	4
1.3 Objectifs de recherche	6
2 Notions de base et revue de littérature	9
2.1 Considérations générales sur les précipitations	9
2.1.1 Processus atmosphériques	9
2.1.2 Types de précipitations	10
2.2 Modélisation climatique	11
2.2.1 Scénarios d'émission de gaz à effet de serre	12
2.2.2 Modèles globaux	14
2.2.3 Modèles régionaux	14
2.2.4 Modèles du système terrestre	15
2.2.5 Réanalyses	16
2.3 Revue des études spatiales et temporelles sur les précipitations	16
2.3.1 Structures spatiales de précipitations : analyses météorologiques	16
2.3.2 Séries temporelles de précipitations : tendances historiques et projections climatiques	19
3 Méthodologie	23
3.1 Fondements de l'analyse des structures de précipitations	23

3.2	Zone d'étude	25
3.2.1	Topographie	25
3.2.2	Régions climatiques	26
3.3	Données de précipitations utilisées	27
3.4	Méthode d'analyse des structures de précipitations	29
3.4.1	Traitement préliminaire des données	30
3.4.2	Identification des structures de précipitations	31
3.4.3	Caractérisation des structures de précipitations	33
3.4.4	Analyse statistique des caractéristiques	35
4	Résultats et discussion	41
4.1	Climatologie mensuelle des précipitations	41
4.1.1	Variabilité spatiale	41
4.1.2	Variabilité interannuelle	45
4.2	Performance du modèle climatique	48
4.2.1	Effet de la physique et de la dynamique internes	48
4.2.2	Effet du pilote aux frontières du modèle	50
4.3	Projections en climat futur	52
4.3.1	Effet de la variabilité interne	52
4.3.2	Changements projetés	53
5	Conclusions	61
II	Article	65
1	Projected changes in characteristics of precipitation spatial structures over North America	67
1.1	Abstract	69
1.2	Introduction	70
1.3	Precipitation datasets and study area	72
1.4	Methodology	74
1.5	Assessment of climate model performance	77
1.5.1	Comparison of ERA40-driven CRCM simulation and NCEP Stage IV dataset	77
1.5.2	Comparison of CGCM3-driven and ERA40-driven CRCM simulations	81
1.6	Projected changes	85
1.7	Conclusions	90
1.8	Acknowledgments	94
	Références	95
A	Résultats complémentaires sur la performance du modèle climatique	105
A.1	Différences entre AGO et ST4	105
A.2	Différences entre AET/AEV et AGO	110

Liste des figures

1.1	Cartes des changements observés pour : (a) les températures de surface de 1901 à 2012; et (b) les précipitations annuelles de 1901 à 2010 et de 1951 à 2010. Les températures et les précipitations sont dérivées des tendances déterminées par régression linéaire pour un ensemble de données. Les tendances ont été calculées où la disponibilité des données permet un estimé robuste (c'est-à-dire seulement pour les points de grille ayant plus de 70 % d'enregistrements complets et plus de 20 % de données disponibles dans le premier et le dernier 10 % de la période considérée). Les autres zones sont en blanc. Les points de grille où la tendance est significative au niveau 10 % sont marqués par un signe +. Source : IPCC (2013a).	5
1.2	Cartes de la moyenne multi-modèle des résultats du <i>Coupled Model Intercomparison Project Phase 5</i> (CMIP5) pour les scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5 (voir la section 2.2.1) en 2081-2100 montrant les changements pour : (a) les températures moyennes annuelles de surface; et (b) les précipitations moyennes annuelles. Les changements sont relatifs à 1986-2005. Le nombre de modèles CMIP5 utilisés pour calculer la moyenne multi-modèle est indiqué dans le coin supérieur droit de chaque graphique. Les régions hachurées indiquent que la moyenne multi-modèle est petite comparée à la variabilité interne naturelle (c'est-à-dire moins d'un écart type de variabilité interne naturelle pour 20 ans de valeurs moyennes). Les régions pointillées indiquent que la moyenne multi-modèle est grande comparée à la variabilité interne naturelle (c'est-à-dire plus de deux écarts types de variabilité interne naturelle pour 20 ans de valeurs moyennes) et qu'au moins 90 % des modèles présente un changement de même signe. Source : IPCC (2013a).	6
3.1	Carte topographique de l'Amérique du Nord. Les frontières du domaine AMNO (zone d'étude) sont indiquées par un trait noir.	25
3.2	Carte des 16 régions climatiques définies pour les besoins de l'étude (voir le tableau 3.1 pour l'identification des régions selon leur numéro).	26
3.3	Étapes de la méthode d'analyse par objets.	29
3.4	Exemple de projection des tuiles depuis la grille ST4 (en bleu) vers la grille de référence du MRCC (en rouge).	31
3.5	Exemple d'identification des structures d'un champ de précipitations à un pas de temps spécifique.	32
3.6	Voisinage de huit pixels. Le pixel noir représente la position du pixel courant et les pixels gris, la position de ses voisins.	33
3.7	Exemple de distribution empirique des valeurs d'intensités moyennes des structures de précipitations pour le mois de juillet de l'année 1961 selon la simulation AET pour la région climatique Forêt nord-est (NEForest).	36

3.8	Exemple d'une série de médianes des distributions annuelles des intensités moyennes des structures de précipitations construite pour la période 1961-1990 à partir des valeurs d'intensités moyennes des mois de juillet selon l'ensemble de données AET pour la région climatique Forêt nord-est (NEForest).	37
3.9	Progressions de couleurs utilisées pour les échelles de valeurs.	40
4.1	Cartes des précipitations moyennes de janvier et juillet selon CRU (a et c) et des différences relatives entre CRU et ST4 pour la période 2002-2011 (b et d). Seules les tuiles ayant une couverture temporelle supérieure à 80 % sont affichées.	43
4.2	Cartes des précipitations moyennes de janvier et juillet selon CRU (a et c) et des différences relatives entre CRU et AGO pour la période 1961-1990 (b et d). Seules les tuiles ayant une couverture temporelle supérieure à 80 % sont affichées.	44
4.3	Cycles annuels des précipitations moyennes mensuelles selon CRU pour trois périodes de 30 ans (1901-1930, 1931-1960, 1961-1990). Seules les 14 régions climatiques ayant une couverture temporelle et spatiale supérieure à 80 % sont illustrées.	46
4.4	Cycles annuels des précipitations moyennes mensuelles de CRU pour cinq périodes de 10 ans (1961-1970, 1971-1980, 1981-1990, 1992-2001, 2002-2011). Les six régions climatiques illustrées ont une couverture temporelle et spatiale supérieure à 80 %.	47
4.5	Résumé des différences relatives entre ST4 et AGO des moyennes des séries de médianes annuelles pour cinq caractéristiques des structures de précipitations (superficie, volume de précipitations, intensités maximale et moyenne, nombre de structures) entre les périodes 2002-2011 et 1992-2001. Les points noirs indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).	49
4.6	Résumé des différences relatives entre AGO et AET/AEV des moyennes des séries de médianes annuelles pour cinq caractéristiques des structures de précipitations (superficie, volume de précipitations, intensités maximale et moyenne, nombre de structures) pour la période 1961-1990. Les différences indiquées correspondent à la moyenne des différences AET-AGO et AEV-AGO. Les points noirs indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).	51
4.7	Résumé des différences moyennes normalisées (SMD) entre les simulations AET et AEV des séries de médianes annuelles pour les caractéristiques des structures de précipitations sur (a) la période historique (1961-1990) et (b) la période future (2071-2100). Les points noirs indiquent une différence statistiquement significative entre AET et AEV (selon le test de Welch avec un niveau de confiance de 95 %).	53
4.8	Résumé des changements relatifs projetés selon AET et AEV des moyennes des séries de médianes annuelles pour cinq caractéristiques des structures de précipitations (superficie, volume de précipitations, intensités maximale et moyenne, nombre de structures) entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100. Les changements indiqués correspondent à la moyenne des changements selon AET et AEV. Les points noirs indiquent un changement statistiquement significatif pour AET et AEV selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %). Les croix indiquent un SVR supérieur à un.	54

4.9	Changements relatifs projetés selon AET et AEV dans les caractéristiques des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois de janvier entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100. Les changements indiqués correspondent à la moyenne des changements selon AET et AEV. Les zones hachurées indiquent un changement statistiquement significatif pour AET et AEV selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %) et un SVR supérieur à un.	55
4.10	Changements relatifs projetés selon AET et AEV dans les caractéristiques des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois d'avril entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100. Les changements indiqués correspondent à la moyenne des changements selon AET et AEV. Les zones hachurées indiquent un changement statistiquement significatif pour AET et AEV selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %) et un SVR supérieur à un.	56
4.11	Changements relatifs projetés selon AET et AEV dans les caractéristiques des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois de juillet entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100. Les changements indiqués correspondent à la moyenne des changements selon AET et AEV. Les zones hachurées indiquent un changement statistiquement significatif pour AET et AEV selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %) et un SVR supérieur à un.	57
4.12	Changements relatifs projetés selon AET et AEV dans les caractéristiques des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois d'octobre entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100. Les changements indiqués correspondent à la moyenne des changements selon AET et AEV. Les zones hachurées indiquent un changement statistiquement significatif pour AET et AEV selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %) et un SVR supérieur à un.	58
1.1	Name and abbreviation of the 16 climatic regions covering North America (Canada and United States). The external border identifies the limits of the CRCM North American domain.	74
1.2	Example of the computation of geometric characteristics (centroid, area, major axis, minor axis, orientation).	75
1.3	Standardized mean differences in precipitation structure characteristics according to ST4 (2002-2011) and AGO (1992-2001) datasets. Each table cell intersecting a region and a characteristic is subdivided into 12 rectangles corresponding to the 12 months of the year. Dots indicate a statistically significant difference according to Welch's t-test (95 % confidence level). Blue indicates smaller values for AGO compared to ST4 and orange higher values.	78
1.4	Annual average number of precipitation structures according to ST4 (2002-2011) and AGO (1992-2001). Differences for starred months are statistically significant according to Welch's t-test (95 % confidence level). Correlation coefficients are indicated in the top-right corner.	79
1.5	Annual average areas of precipitation structures according to ST4 (2002-2011) and AGO (1992-2001). Differences for starred months are statistically significant according to Welch's t-test (95 % confidence level). Correlation coefficients are indicated in the top-right corner.	79

1.6	Annual average mean intensities of precipitation structure according to ST4 (2002-2011) and AGO (1992-2001). Differences for starred months are statistically significant according to Welch's t-test (95 % confidence level). Correlation coefficients are indicated in the top-right corner.	80
1.7	Annual average maximum intensities of precipitation structure according to ST4 (2002-2011) and AGO (1992-2001). Differences for starred months are statistically significant according to Welch's t-test (95 % confidence level). Correlation coefficients are indicated in the top-right corner.	80
1.8	Gamma distributions of precipitation intensities within a representative January (1 st column) and July (2 nd column) precipitation structure according to ST4 (2002-2011) and AGO (1992-2001). Representative precipitation structures are built using mean values of α and β parameters for the given month and region.	81
1.9	Standardized mean differences in precipitation structure characteristics according to AET-AGO (top) and AET-AGO (bottom) over 1961-1990 period. Each table cell intersecting a region and a characteristic is subdivided into 12 rectangles corresponding to the 12 months of the year. Dots indicate a statistically significant difference for both AET and AET according to Welch's t-test (95 % confidence level), while open circles indicate a statistically significant difference only for the corresponding simulation. Blue indicates smaller values for AET/AET compared to AGO and orange higher values.	82
1.10	Annual average number of precipitation structures according to AGO and AET/AET over 30-year period 1961-1990 for southern regions (Calif, SWInt, SPlains, SEInt, SECoast). Differences for starred months are statistically significant for both simulations according to Welch's t-test (95 % confidence level).	83
1.11	Annual average precipitation structure volumes according to AGO and AET/AET over 30-year period 1961-1990 for selected regions (NPlains, GrtLakes, MidAtl, SWInt, SPlains, SEInt, SECoast). Differences for starred months are statistically significant for both simulations according to Welch's t-test (95 % confidence level).	83
1.12	Annual average mean intensities of precipitation structure according to AGO and AET/AET over 30-year period 1961-1990 for selected regions (NPlains, GrtLakes, MidAtl, SWInt, SPlains, SEInt, SECoast). Differences for starred months are statistically significant for both simulations according to Welch's t-test (95 % confidence level).	84
1.13	Gamma distributions of precipitation intensities within a representative July precipitation structure according to AGO and AET/AET over 30-year period 1961-1990 for selected regions (SPlains, SEInt, SECoast). Representative precipitation structures are built using mean values of α and β parameters.	84
1.14	Standardized mean differences in precipitation structure characteristics according to AET (top) and AET (bottom) over historical (1961-1990) and future (2071-2100) periods. Each table cell intersecting a region and a characteristic is subdivided into 12 rectangles corresponding to the 12 months of the year. Dots indicate a statistically significant difference for both AET and AET according to Welch's t-test (95 % confidence level), while open circles indicate a statistically significant difference only for the corresponding simulation. Crosses indicate a difference greater than the variation between simulations over historical and future periods (see Equation 3). Blue indicates a decrease in the future period compared to the historical period and orange an increase.	87

1.15	Annual average number of precipitation structures according to AET/AEV over historical (1961-1990) and future (2071-2100) periods for southern regions (Calif, SWInt, SPlains, SECoast). Differences for starred months are statistically significant for both simulations according to Welch's t-test (95 % confidence level).	88
1.16	Annual average precipitation structure mean intensities according to AET/AEV over historical (1961-1990) and future (2071-2100) periods for selected regions (NWForest, NEForest, Marit, NPlains, GrtLakes, MidAtl). Other regions show a similar behaviour except southwestern regions. Differences for starred months are statistically significant for both simulations according to Welch's t-test (95 % confidence level).	88
1.17	Annual average precipitation structure areas according to AET/AEV over historical (1961-1990) and future (2071-2100) periods for NEForest region. Differences for starred months are statistically significant according to Welch's t-test (95 % confidence level).	89
1.18	Gamma distributions of precipitation intensities within a representative July spatial structure according to AET/AEV over historical (1961-1990) and future (2071-2100) periods for selected regions (WCord, NWForest, NEForest, Marit). Representative precipitation structures are built using mean values of α and β parameters.	89
1.19	Differences in precipitation structure characteristics (number of structures and maximum intensity) according to AET/AEV over historical (1961-1990) and future (2071-2100) periods for January, April, July and October. Blue indicates a decrease in the future period compared to the historical period and orange an increase. Hatched regions are statistically significant for both simulations according to Welch's t-test (95 % confidence level).	92
A.1	Différences relatives entre AGO et ST4 des caractéristiques moyennes des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois de janvier entre les périodes 2002-2011 et 1992-2001. Les zones hachurées indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).	106
A.2	Différences relatives entre AGO et ST4 des caractéristiques moyennes des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois d'avril entre les périodes 2002-2011 et 1992-2001. Les zones hachurées indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).	107
A.3	Différences relatives entre AGO et ST4 des caractéristiques moyennes des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois de juillet entre les périodes 2002-2011 et 1992-2001. Les zones hachurées indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).	108
A.4	Différences relatives entre AGO et ST4 des caractéristiques moyennes des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois d'octobre entre les périodes 2002-2011 et 1992-2001. Les zones hachurées indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).	109

A.5	Différences relatives entre AET/AEV et AGO des caractéristiques moyennes des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois de janvier pour la période 1961-1990. Les différences indiquées correspondent à la moyenne des différences AET-AGO et AEV-AGO. Les zones hachurées indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).	110
A.6	Différences relatives entre AET/AEV et AGO des caractéristiques moyennes des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois d'avril pour la période 1961-1990. Les différences indiquées correspondent à la moyenne des différences AET-AGO et AEV-AGO. Les zones hachurées indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).	111
A.7	Différences relatives entre AET/AEV et AGO des caractéristiques moyennes des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois de juillet pour la période 1961-1990. Les différences indiquées correspondent à la moyenne des différences AET-AGO et AEV-AGO. Les zones hachurées indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).	112
A.8	Différences relatives entre AET/AEV et AGO des caractéristiques moyennes des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois d'octobre pour la période 1961-1990. Les différences indiquées correspondent à la moyenne des différences AET-AGO et AEV-AGO. Les zones hachurées indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).	113

Liste des tableaux

2.1	Classification des processus atmosphériques selon Orlanski (1975). Voir Barry & Chorley (2010) pour une description des phénomènes atmosphériques mentionnés. .	10
3.1	Description sommaire des régions climatiques (voir la carte des régions à la figure 3.2).	27
3.2	Description des ensembles de données utilisés.	28
3.3	Caractéristiques considérées pour les structures de précipitations.	34
1.1	Description of the datasets used in this study	73

Liste des abréviations

AMNO	Amérique du Nord
CCM	Complexe convectif de méso-échelle
CCmaC	Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique
CRU	Climate Research Unit
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA40	Réanalyse du ECMWF à une résolution de 40 km
ESM	Earth System Model
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GLOBE	Global Land One-kilometer Base Elevation
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MCG	Modèle climatique global
MCGC	Modèle climatique global canadien
MRC	Modèle régional du climat
MRCC	Modèle régional canadien du climat
NARCCAP	North American Regional Climate Change Assessment Program
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
QPE	Quantitative Precipitation Estimation
RCP	Representative Concentration Pathways
SCM	Système convectif de méso-échelle
SMD	Standardized mean difference
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
SVR	Signal-to-variability ratio

Première partie

Synthèse

Chapitre 1

Introduction

1.1 Enjeux liés aux précipitations

Les précipitations jouent un rôle économique important pour les sociétés humaines, vu leur fonction dans le cycle hydrologique. Elles influencent notamment l'abondance et la disponibilité de l'eau, cette ressource essentielle au coeur de plusieurs services publics, commerces et industries. Entre autres, la fiabilité de l'offre en énergie hydro-électrique repose sur le débit des cours d'eau, qui est influencé par les précipitations (Mukheibir, 2013). La gestion opérationnelle des barrages hydro-électriques doit alors inclure une phase de prévision des précipitations pour planifier les débits d'eau à maintenir. De plus, en milieu urbain, les infrastructures de gestion des eaux pluviales doivent être conçues en fonction des caractéristiques (intensité, durée et fréquence) des pluies qu'elles doivent évacuer (Mailhot & Duchesne, 2010).

Cependant, les précipitations peuvent également être associées à des événements météorologiques extrêmes (p. ex. sécheresse, ouragan, orage, tornade, grêle) qui peuvent avoir des conséquences importantes (Changnon *et al.*, 2000; Bouwer, 2011). Par exemple, des précipitations intenses peuvent causer des crues éclair inondant de larges sections de territoire. Les inondations reposent souvent sur une combinaison de facteurs (p. ex l'accumulation de neige, le niveau des cours d'eau et la présence de glace de rivières) et peuvent causer des dommages majeurs aux habitations, aux industries et aux commerces (Environnement Canada, 2004). Dans certaines régions, les précipitations intenses sont aussi responsables de l'érosion des terres, ce qui détériore la qualité des sols pour

les cultures, entraîne de la sédimentation dans les zones situées en aval et altère les cours d'eau (Blanco-Canqui & Lal, 2010). Dans les situations de rareté des précipitations (sécheresse), l'agriculture et l'approvisionnement en eau des zones urbaines sont les secteurs les plus touchés. De plus, en zone forestière, une sécheresse prolongée est propice à l'apparition de feux de forêts (Environnement Canada, 2004). De façon générale, les impacts socio-économiques des événements météorologiques extrêmes affectent de nombreux secteurs incluant : le transport, la vente au détail, le commerce agricole, la culture et l'élevage, l'énergie, les bâtiments résidentiels, les services gouvernementaux, le tourisme, l'assurance et la construction (Changnon, 2005).

La vulnérabilité des sociétés humaines face aux aléas météorologiques augmente et ce, principalement à cause de la croissance démographique dans les zones à risque et des infrastructures vieillissantes ou encore dont les critères de conception ne sont plus adéquats (Changnon, 2005). Une meilleure caractérisation des précipitations peut contribuer à réduire cette vulnérabilité en permettant d'améliorer les systèmes de prévision et d'alerte, de mieux répondre aux situations d'urgence et d'adapter les critères de conception des infrastructures.

1.2 Changements climatiques et précipitations

L'occurrence de changements dans le régime global des précipitations ajoute une pression supplémentaire sur les sociétés déjà vulnérables. Ces changements doivent être considérés sérieusement compte tenu des enjeux socio-économiques en cause. Le passé n'étant plus garant de l'avenir dans le contexte actuel de changements climatiques, une meilleure compréhension de l'évolution des caractéristiques des précipitations devient essentielle. Pour suivre l'état des connaissances sur les changements climatiques, l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'environnement ont mis en place en 1988 le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC; *Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC). Le GIEC a pour mission de colliger et d'évaluer les informations disponibles traitant des changements climatiques pour mieux comprendre les fondements scientifiques, en plus d'identifier ses conséquences et proposer des stratégies d'adaptation (IPCC, 2013b). Dans ses derniers rapports, la tendance à la hausse des températures a été clairement établie et les activités anthropiques seraient la cause de l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, principal responsable du réchauffement global (IPCC, 2001, 2007, 2013a).

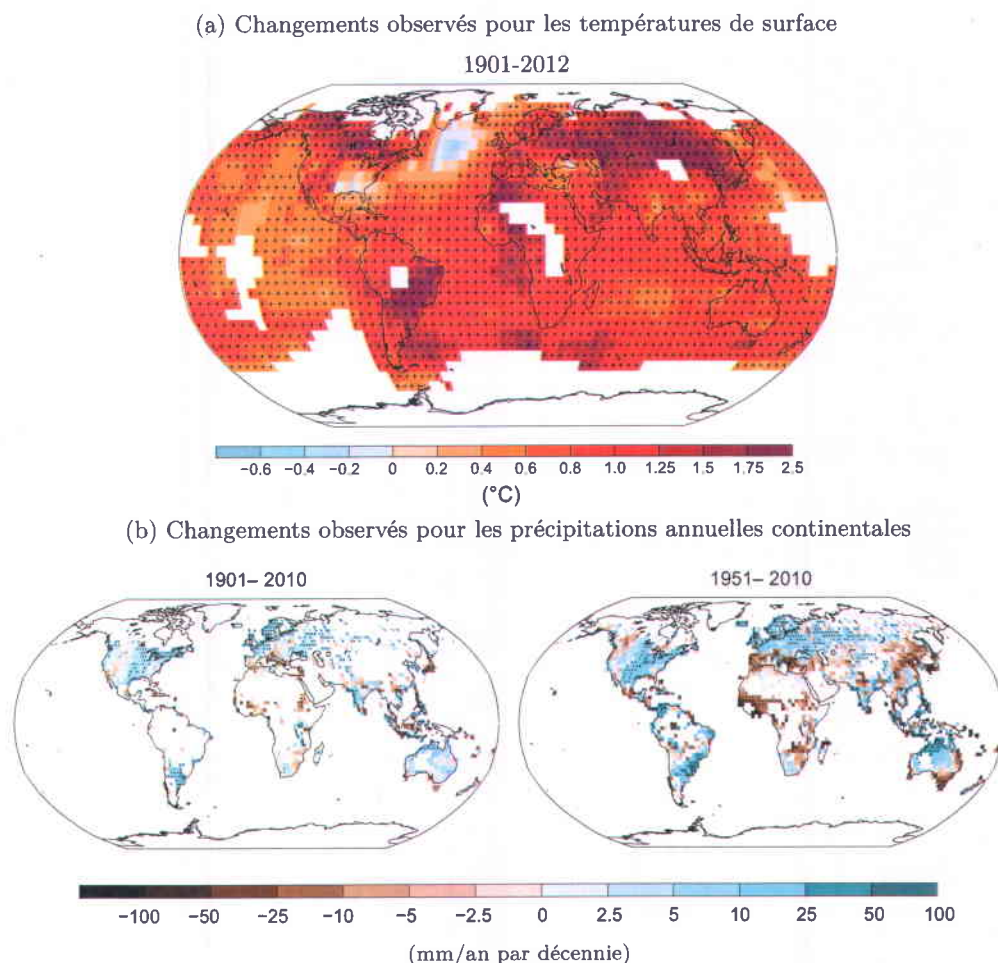
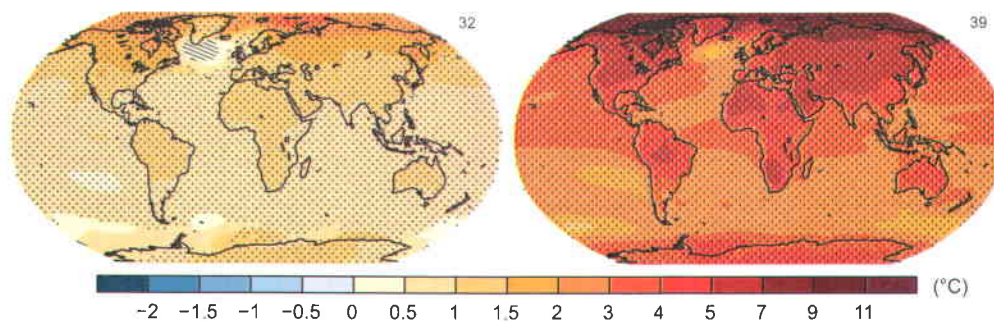


Figure 1.1 – Cartes des changements observés pour : (a) les températures de surface de 1901 à 2012; et (b) les précipitations annuelles de 1901 à 2010 et de 1951 à 2010. Les températures et les précipitations sont dérivées des tendances déterminées par régression linéaire pour un ensemble de données. Les tendances ont été calculées où la disponibilité des données permet un estimé robuste (c'est-à-dire seulement pour les points de grille ayant plus de 70 % d'enregistrements complets et plus de 20 % de données disponibles dans le premier et le dernier 10 % de la période considérée). Les autres zones sont en blanc. Les points de grille où la tendance est significative au niveau 10 % sont marqués par un signe +. Source : IPCC (2013a).

Les données observées montrent qu'un réchauffement global est déjà en cours (figure 1.1a) et que cette augmentation des températures induit des changements dans le régime global des précipitations (figure 1.1b), notamment une intensification du cycle hydrologique (Trenberth, 1999). Les augmentations de températures et les changements dans les précipitations, simulés par les modèles climatiques pour la fin du XXI^e siècle, sont encore plus importants (figure 1.2). Pour les précipitations, ces changements se traduisent globalement par le fait que les régions humides deviendraient plus humides et que les régions arides deviendraient plus arides (Sun *et al.*, 2007; Trenberth, 2011). L'augmentation de la température n'a pas seulement un effet global sur les précipitations, mais également sur leur caractère extrême. Si l'atmosphère devient plus chaude, sa capacité à contenir de la

(a) Changements projetés pour les températures moyennes de surface (1986-2005 à 2081-2100)



(b) Changements relatifs projetés pour les précipitations moyennes (1986-2005 à 2081-2100)

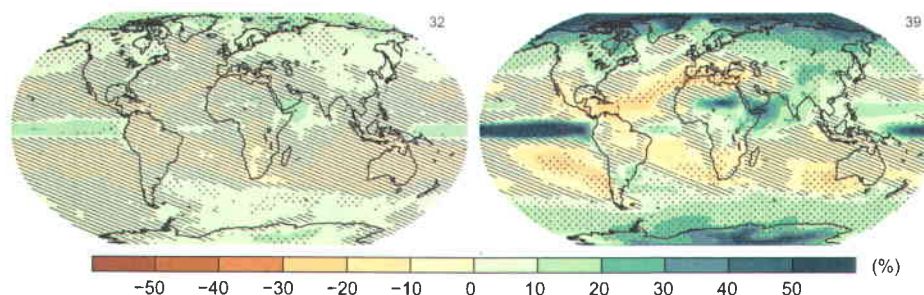


Figure 1.2 – Cartes de la moyenne multi-modèle des résultats du *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) pour les scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5 (voir la section 2.2.1) en 2081-2100 montrant les changements pour : (a) les températures moyennes annuelles de surface; et (b) les précipitations moyennes annuelles. Les changements sont relatifs à 1986-2005. Le nombre de modèles CMIP5 utilisés pour calculer la moyenne multi-modèle est indiqué dans le coin supérieur droit de chaque graphique. Les régions hachurées indiquent que la moyenne multi-modèle est petite comparée à la variabilité interne naturelle (c'est-à-dire moins d'un écart type de variabilité interne naturelle pour 20 ans de valeurs moyennes). Les régions pointillées indiquent que la moyenne multi-modèle est grande comparée à la variabilité interne naturelle (c'est-à-dire plus de deux écarts types de variabilité interne naturelle pour 20 ans de valeurs moyennes) et qu'au moins 90 % des modèles présente un changement de même signe. Source : IPCC (2013a).

vapeur d'eau augmente, vapeur d'eau qui devient ainsi disponible pour les précipitations (Trenberth *et al.*, 2003; Trenberth, 2011). Ce processus est décrit par la relation de Clausius-Clapeyron, qui définit la dépendance entre le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère et la température. Cette relation suggère que les précipitations deviendront plus intenses et fréquentes dans un contexte de réchauffement global de l'atmosphère (Panthou *et al.*, 2014).

1.3 Objectifs de recherche

Le projet aborde la caractérisation des précipitations dans un contexte de changements climatiques. Plusieurs études ont déjà été publiées sur le sujet et la grande majorité d'entre elles analysent les précipitations à partir de séries temporelles en un endroit ou une région spécifique de l'espace

(p. ex. une station météorologique, une ou des tuiles d'un modèle climatique). Ce projet adopte un point de vue complémentaire à travers l'analyse de la dimension spatiale des précipitations à chaque pas de temps, c'est-à-dire l'analyse des structures spatiales des champs de précipitations. Un champ de précipitations correspond à l'ensemble des valeurs de précipitations (ou l'ensemble des tuiles d'un modèle climatique pour la variable *précipitation*) à un pas de temps spécifique sur un territoire donné (p. ex. les précipitations sur l'Amérique du Nord pour le 1^{er} janvier 1961 à 00 h). Par ailleurs, une structure spatiale de précipitations est définie comme un groupe de tuiles adjacentes contenant des précipitations supérieures à un seuil donné au sein d'un champ de précipitations. Un champ de précipitations peut donc contenir plus d'une structure de précipitations. Ce type d'analyse apporte un éclairage additionnel aux études antérieures tout en fournissant de nouvelles informations sur le caractère spatial des précipitations.

L'analyse spatiale a été réalisée à partir des champs de précipitations horaires simulés par un modèle régional du climat (MRC), ce qui permet notamment de travailler avec une couverture spatiale complète et d'explorer les changements en climat futur. Le projet cherche à répondre à deux questions spécifiques :

- Est-ce que le modèle climatique représente bien les structures de précipitations observées?
- Comment évolueront les structures de précipitations en climat futur?

Pour être en mesure de répondre à ces questions, le développement d'une approche pour définir et caractériser les structures de précipitations est nécessaire. Les caractéristiques à l'étude (détaillées à la section 3.4.3) couvrent la géométrie des structures (position, superficie, axes principal et secondaire, orientation, excentricité) et leur intensité (volume de précipitations, intensités moyenne et maximale, distribution des précipitations au sein d'une structure). La suite du travail repose essentiellement sur la comparaison de ces caractéristiques de structures de précipitations entre différents ensembles de données. Tout d'abord, la performance du modèle climatique est évaluée en comparant des simulations en climat historique à des données observées. Ensuite, les projections futures sont obtenues en comparant certaines simulations en climat historique et futur.

Cette première partie du mémoire se veut une synthèse des travaux effectués dans le cadre de la maîtrise, l'essentiel étant détaillé dans l'article présenté en seconde partie. Le chapitre 2 présente les notions théoriques sur lesquelles reposent le travail ainsi qu'une revue de la littérature. Le chapitre 3 rappelle les étapes principales de la méthodologie et apporte plusieurs précisions sur les données et leur traitement. Le chapitre 4 résume les résultats obtenus et le chapitre 5 conclut cette synthèse

avec quelques discussions et perspectives pour les travaux futurs. Le lecteur est invité à débiter sa lecture par l'article en seconde partie pour un survol plus rapide du projet.

Chapitre 2

Notions de base et revue de littérature

2.1 Considérations générales sur les précipitations

2.1.1 Processus atmosphériques

Les processus atmosphériques peuvent être classifiés selon les échelles spatiales et temporelles en jeu (tableau 2.1). Trois échelles spatiales sont communes aux classifications proposées jusqu'à ce jour : macro (large), méso (intermédiaire) et micro (petit). Les échelles spatiales varient généralement de moins de 20 m à plus de 10 000 km et les échelles temporelles de quelques secondes à plusieurs mois. La classification établie par Orlanski (1975) sert de référence à la présente étude. Cette classification visait à uniformiser la nomenclature utilisée jusqu'alors en météorologie et sert encore de référence de nos jours.

Plusieurs processus atmosphériques influencent les flux de vapeur d'eau et certains sont directement responsables des précipitations. Parmi les processus atmosphériques de méso-échelle générant des précipitations, les systèmes convectifs de méso-échelle (SCM) sont particulièrement intéressants, puisqu'ils sont à l'origine autant des ouragans que des orages (Barry & Chorley, 2010). Plus spécifiquement, les complexes convectifs de méso-échelle (CCM), un type de SCM large et persistant, sont associés à des précipitations intenses pouvant causer des inondations, le tout accompagné de vents forts. Les CCM appartiennent à la classe de processus méso- α et voient le jour principalement dans les latitudes moyennes et les tropiques (Maddox, 1980). Le centre des États-Unis est particulière-

Tableau 2.1 – Classification des processus atmosphériques selon Orlanski (1975). Voir Barry & Chorley (2010) pour une description des phénomènes atmosphériques mentionnés.

Échelle atmosphérique	Échelle spatiale	Échelle temporelle	Phénomènes atmosphériques
Macro- α	> 10 000 km	> 1 jour	Ondes stationnaires, ondes très longues, ondes de marée
Macro- β	2 000 km à 10 000 km	1 jour à 1 mois	Ondes baroclines
Méso- α	200 km à 2 000 km	1 jour à 2 jours	Fronts, ouragans
Méso- β	20 km à 200 km	2 h à 1 jour	Courant-jet nocturne à basse altitude, lignes de grain, ondes d'inertie, amas nuageux, ondes de relief
Méso- γ	2 km à 20 km	20 min à 3 h	Orages, ondes de gravité stationnaires, turbulences en ciel clair, effets urbains
Micro- α	200 m à 2 km	5 min à 1 h	Tornades, convection profonde, ondes de gravité courtes
Micro- β	20 m à 200 m	30 sec à 10 min	Tourbillons de poussière, ascendances thermiques, sillages
Micro- γ	< 20 m	< 1 min	Panaches, rugosité de la surface, turbulence

ment touché par les CCM (McAnelly & Cotton, 1989). Les MRC reproduisent bien les processus d'échelle méso- α et une partie des processus d'échelle méso- β vu leur physique et leur dynamique internes ainsi que leur résolution spatiale (Di Luca *et al.*, 2011). Les structures de précipitations considérées dans la présente étude sont associés à des systèmes d'échelle méso- α , ce qui inclut les structures associées aux CCM.

2.1.2 Types de précipitations

En météorologie, les précipitations sont généralement classées en trois types selon les processus physiques en jeu lors de leur formation (Musy & Higy, 2004; Barry & Chorley, 2010) : précipitations convectives, stratiformes (ou cycloniques) et orographiques. Les précipitations stratiformes se caractérisent par une faible intensité et une longue durée en plus de couvrir généralement un grand territoire. À l'opposé, les précipitations convectives sont plutôt de forte intensité et de courte durée en plus de couvrir une petite superficie. Cette nomenclature tire son origine de l'observation des

échos radar, où les précipitations stratiformes apparaissent en couches horizontales (strates) tandis que les précipitations convectives apparaissent sous forme de cellules intenses orientées verticalement (Houze *et al.*, 1990; Houze, 1997). Finalement, les précipitations orographiques se distinguent des autres types par le mécanisme responsable du soulèvement des masses d'air durant leur formation, c'est-à-dire la rencontre de montagnes. Dans ce cas, les caractéristiques des précipitations varient selon les vents et la topographie rencontrée (Barry & Chorley, 2010).

Il demeure important de distinguer *précipitations convectives* et *convection*, puisqu'il est possible de retrouver des précipitations stratiformes dans une zone de convection (Houze *et al.*, 1990; Houze, 1997). Dans un même système de précipitations, les zones où la convection est forte sont normalement associées à des précipitations convectives, et les zones où la convection s'est affaiblie sont associées à des précipitations stratiformes (Houze, 1997). Un SCM peut comporter simultanément des zones de précipitations convectives et stratiformes.

La forme des nuages à l'origine des précipitations peut également fournir des informations sur les processus de formation des précipitations. Les nuages sont généralement classifiés en dix groupes de base selon leur forme, leur structure, leur étendue verticale et leur altitude (Barry & Chorley, 2010). Cependant, les systèmes de précipitations peuvent être composés de plusieurs types de nuages. Lorsque les systèmes de précipitations sont observés au radar, ils adoptent principalement trois formes (Baldwin *et al.*, 2005) : linéaire, circulaire et en cellules (zones de précipitations intenses dispersées). La forme d'une structure de précipitations peut informer sur les phénomènes atmosphériques en cause. Par exemple, un SCM présente habituellement une forme en cellules, résultat de la présence de zones de précipitations convectives intenses avoisinant des zones de précipitations stratiformes.

2.2 Modélisation climatique

L'étude de séries de précipitations observées aux stations météorologiques permet d'analyser les tendances passées et d'améliorer notre compréhension du climat. Cependant, il n'est pas possible de prévoir le comportement des précipitations en climat futur à l'aide de ces séries. La modélisation climatique a été développée entre autres pour répondre à ce besoin en plus de permettre une reconstruction des climats du passé. Plus particulièrement, l'objectif de la modélisation climatique

consiste à fournir un moyen d'étudier le changement et la variabilité du climat (Environnement Canada, 2013). Cet outil a grandement contribué à l'amélioration de nos connaissances sur le climat en permettant notamment de mieux comprendre le réchauffement climatique en plus du rôle joué par les activités humaines dans ce réchauffement. Les modèles climatiques utilisent les équations physiques de base pour simuler les processus atmosphériques, terrestres et océaniques. Au final, ils fournissent une quantité importante de variables simulées à différents pas de temps (p. ex. la température, la précipitation, le vent, la pression atmosphérique, l'humidité). Cependant, plusieurs incertitudes doivent être considérées lors de l'interprétation des projections climatiques fournies par ces modèles (Hawkins & Sutton, 2009; Hawkins, 2011) :

- la structure du modèle climatique (physique et dynamique internes);
- la variabilité interne du climat (plusieurs réalisations du climat sont possibles selon les conditions initiales considérées; voir Deser *et al.* (2010));
- les scénarios d'émission de GES (voir la section 2.2.1).

La variabilité interne, ou variabilité naturelle, correspond aux fluctuations naturelles du climat en l'absence de forçage radiatif (Hawkins & Sutton, 2009). De façon naturelle, le climat subit des fluctuations périodiques et chaotiques sur un large spectre d'échelles spatiales et temporelles (IPCC, 2013a). Dans les modèles climatiques, la variabilité interne résulte des équations non-linéaires dynamiques et thermodynamiques qui gouvernent le système climatique (Lucas-Picher *et al.*, 2008). L'évolution des variables simulées dans le temps est alors sensible aux conditions initiales de la simulation, alors considérées comme des perturbations légères du climat (Lucas-Picher *et al.*, 2008). L'effet de la variabilité interne peut être évalué en générant un ensemble de simulations climatiques ayant des conditions initiales légèrement différentes (Lucas-Picher *et al.*, 2008). Il est essentiel d'évaluer l'effet de la variabilité interne pour déterminer la robustesse d'un changement observé dans une simulation (Caya & Biner, 2004).

2.2.1 Scénarios d'émission de gaz à effet de serre

Le rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émission (*Special Report on Emissions Scenarios*, SRES) définit quatre familles de scénarios décrivant l'évolution des GES pour le XXI^e siècle (IPCC, 2000). Chaque scénario représente une évolution possible des émissions de GES pour le XXI^e siècle

en se basant sur différents scénarios d'évolution de la démographie, de l'économie et de la technologie (IPCC, 2000). Les familles de scénarios du SRES sont les suivantes (IPCC, 2000) :

- A1 : développement économique rapide, croissance de la population et déclin vers la moitié du XXI^e siècle, introduction de nouvelles technologies efficaces, convergence des régions, augmentation des interactions sociales, économiques et culturelles entre les régions, diminution de l'écart de revenu entre les régions.
- A2 : monde hétérogène, autonomie des régions, préservation des identités locales, croissance continue de la population, développement économique principalement régional, croissance économique et changement technologique plus lent et plus fragmenté.
- B1 : monde convergent, croissance de la population et déclin vers la moitié du XXI^e siècle, changement vers une économie axée sur les services et l'information, réduction de l'utilisation des ressources, introduction de technologies efficaces, emphase sur les solutions globales pour le développement durable.
- B2 : emphase sur les solutions locales pour le développement durable, croissance continue de la population (taux plus faible que A2), niveau intermédiaire de développement économique, changement technologique plus lent et diversifié, scénario orienté sur la protection de l'environnement et l'équité sociale avec une emphase régionale.

Depuis le début des années 2000, la communauté scientifique a développé de nouveaux scénarios plus complets pour l'exécution des modèles climatiques récents. Ces scénarios, les parcours représentatifs de concentrations (*Representative Concentration Pathways*, RCP) adoptent une approche un peu différente en fournissant les concentrations des GES, des aérosols et des gaz chimiquement actifs (p. ex. soufre, azote) plutôt que les émissions (Vuuren *et al.*, 2011). À l'image des scénarios du SRES, quatre RCP principaux ont été définis, chacun identifié par le forçage radiatif qu'il prévoit pour l'année 2100 : 2,6 W/m²; 4,5 W/m²; 6 W/m²; 8,5 W/m². Ensemble, ces quatre RCP couvrent l'éventail complet des scénarios d'émission de GES publiés dans la littérature scientifique en termes de forçages radiatifs prévus pour 2100 (Vuuren *et al.*, 2011).

Dans l'approche des scénarios du SRES, les scénarios socio-économiques agissent comme point de départ pour définir les scénarios d'émissions et ensuite construire des séries temporelles de concentrations utilisées en entrée par les modèles climatiques (Flato, 2011). Dans l'approche des RCP, les concentrations représentent le point de départ à partir duquel les modèles climatiques de nouvelle génération (voir la section 2.2.4) peuvent simuler le climat directement ou estimer les émissions au

besoin. Ensuite, les scénarios socio-économiques peuvent être définis à partir des émissions estimées (Flato, 2011). Ce changement dans l'approche utilisée permet de distinguer les incertitudes associées à la représentation physique du climat (présentes dans les simulations climatiques) des incertitudes associées à la représentation du cycle du carbone (présentes dans les émissions estimées) (Flato, 2011).

2.2.2 Modèles globaux

Les modèles climatiques globaux (MCG), aussi nommés modèles de circulation générale, simulent le climat à l'échelle du globe en discrétisant l'atmosphère en plusieurs niveaux verticaux et selon une résolution horizontale de plusieurs centaines de kilomètres (Barry & Chorley, 2010). Un MCG inclut généralement un modèle terrestre, un modèle atmosphérique et un modèle océanique avec les échanges respectifs entre chacun. Les MCG sont contraints par différents scénarios d'émission de GES sous forme de forçage radiatif.

Le Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique (CCmaC) a développé un MCG canadien, le Modèle climatique global canadien (MCGC) (Flato *et al.*, 2000; Flato & Boer, 2001; Scinocca *et al.*, 2008). Le MCGC a une résolution spatiale approximative de $3.75^\circ \times 3.75^\circ$ (environ 415 km x 415 km). Les simulations globales utilisées dans le cadre du projet ont été produites selon le scénario A2 du SRES. Ce scénario prévoit que les émissions vont plus que quadrupler à la fin du XXI^e siècle (environ 29 Gt de carbone par an) par rapport au début du XX^e siècle. Les émissions cumulatives atteindraient alors approximativement 1850 Gt de carbone en 2100 (IPCC, 2000).

2.2.3 Modèles régionaux

Les modèles régionaux du climat (MRC) travaillent à une résolution spatiale plus fine que les MCG, c'est-à-dire à environ 50 km x 50 km (Barry & Chorley, 2010). Les MRC permettent d'effectuer une mise à l'échelle dynamique des processus simulés par les MCG avec une physique et une dynamique internes qui résout des processus atmosphériques à plus petite échelle (Laprise, 2008). Cette précision a cependant un coût important en temps de calcul. Pour cette raison, les MRC simulent le climat sur un domaine spécifique, appelé domaine de simulation, plutôt que sur le globe en entier. Pour assurer une cohérence avec les processus atmosphériques à l'échelle planétaire,

un MRC est piloté aux limites de son domaine par les champs atmosphériques d'un MCG ou d'une réanalyse (voir la section 2.2.5). Les MRC offrent une valeur ajoutée pour la simulation des précipitations, qui sont associées à des processus à plus petite échelle que ceux représentés dans les MCG (Di Luca *et al.*, 2011).

L'université du Québec à Montréal a développé le Modèle régional canadien du climat (MRCC), un MRC avec une résolution spatiale de 45 km x 45 km (dimensions vraie à 60° N) sur une projection stéréographique polaire (Laprise, 2008). Le modèle repose sur un schéma numérique semi-implicite et semi-Lagrangien pour résoudre les équations d'Euler non hydrostatiques entièrement élastiques, ce qui permet de calculer la circulation atmosphérique à toutes les échelles spatiales (Caya & Laprise, 1999). Le domaine de simulation du MRCC peut être configuré pour couvrir toute région du globe (p. ex. utilisation du MRCC dans le cadre du projet *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*, CORDEX), mais il a été d'abord développé pour l'Amérique du Nord et principalement le Canada.

2.2.4 Modèles du système terrestre

Plus récemment, un autre type de modèle a vu le jour : les modèles du système terrestre (*Earth System Models*, ESM) (Flato, 2011). Les ESM sont des MCG améliorés avec l'ajout d'une couche biogéochimique à chaque composante (terrestre, atmosphérique et océanique). Cette couche permet notamment la modélisation du cycle global du carbone, en plus du cycle terrestre de l'azote et du cycle global du soufre. Entre autres, le cycle du carbone influence les températures tandis que le cycle du soufre influence les températures et les précipitations (le soufre agit comme un noyau de condensation) (Flato, 2011). L'objectif des ESM est d'intégrer directement dans les simulations climatiques la rétroaction entre le climat et les différents cycles biogéochimiques qui déterminent les concentrations de GES. Les ESM nécessitent alors l'utilisation des RCP pour être en mesure de bien simuler les cycles biogéochimiques, puisque les RCP fournissent des informations plus complètes que les scénarios du SRES. Pour ces différentes raisons, les ESM sont des modèles plus complexes et contiennent un plus grand nombre de paramètres.

Dans le futur, les changements projetés par les ESM concernant les températures et les précipitations sont similaires à ceux projetés par les MCG (Knutti & Sedláček, 2012). Cependant, la fourchette des valeurs obtenues est plus large et les projections selon les différents RCP divergent

plus tôt que selon les scénarios du SRES (Knutti & Sedláček, 2012). Considérant ces similarités, les ESM ne remplaceront pas nécessairement les MCG et les MRC, car ils sont plus exigeants en temps de calcul. À cet égard, les MRC demeurent particulièrement avantageux lorsqu'il s'agit de travailler sur une région spécifique du globe. Notons que les ESM sont récents et encore en phase de développement.

2.2.5 Réanalyses

Les réanalyses se classent un peu à part des modèles climatiques puisqu'elles combinent des observations à des modèles de prévision météorologique pour générer des grilles de données uniformes sur la planète (Bosilovich *et al.*, 2008). Généralement, les modèles de prévision sont utilisés de façon quotidienne pour prévoir la météorologie des prochains jours. Cependant, dans le cas des réanalyses, des séries historiques d'observations sont fournies en entrée au modèle de prévision pour effectuer une analyse rétrospective (*Retrospective-analysis, reanalysis*), d'où le nom de *réanalyse* (Betts *et al.*, 2006). Des routines d'assimilation de données permettent d'intégrer les observations disponibles dans le modèle de prévision en tant que contraintes pour d'obtenir une grille uniforme avec une couverture spatiale et temporelle complète (Betts *et al.*, 2006). Les réanalyses fournissent alors des valeurs aux endroits où peu d'observations sont disponibles et ces valeurs sont cohérentes avec les autres observations (Bosilovich *et al.*, 2008). Les données observées demeurent la meilleure estimation de l'état de l'atmosphère en certains endroits et les modèles de prévision fournissent une simulation complète et globale de l'atmosphère en décrivant les processus physiques et dynamiques (Betts *et al.*, 2006). Leur combinaison augmente donc la précision et la couverture des données. Par contre, la couverture temporelle des réanalyses est limitée à la couverture temporelle des données observées.

2.3 Revue des études spatiales et temporelles sur les précipitations

2.3.1 Structures spatiales de précipitations : analyses météorologiques

À notre connaissance, l'ensemble des études portant sur les structures de précipitations provient du domaine de la météorologie. La majorité d'entre elles utilisent des données radar ou satellitaires

pour définir les caractéristiques des systèmes de précipitations (p. ex. la taille, l'orientation, la direction, la forme, la dynamique) et plusieurs visent à valider les modèles de prévision météorologique. À noter, les modèles de prévision météorologique ne sont pas destinés à établir des projections en climat futur, mais plutôt à déterminer les conditions météorologiques des jours à venir. Dans ces études, la difficulté principale réside dans l'identification des structures de précipitations distinctes présentes dans un champ de précipitations à un pas de temps donné. Ce traitement nécessite une capacité de calcul importante pour segmenter chaque champ de précipitations de façon automatique. La caractérisation des structures de précipitations peut également demander une large capacité de traitement si la quantité de structures à traiter est élevée.

Considérant l'importance des SCM pour les latitudes moyennes, plusieurs études se sont d'abord penchées sur l'analyse visuelle de leurs caractéristiques à partir d'images radar ou satellitaires (McAnelly & Cotton, 1989; Houze *et al.*, 1990; Geerts, 1998; Brooks & Stensrud, 2000). Aux États-Unis, Geerts (1998) a analysé manuellement les SCM du quadrant sud-est (excluant la Floride) sur une année avec des images radar. Il a observé que les SCM présentent une forme linéaire durant l'hiver et une forme en arc durant l'été, en plus d'être plus fréquents avec une durée de vie plus courte durant l'été. Houze *et al.* (1990) ont identifié de façon manuelle les SCM liés à des événements intenses de précipitations en Oklahoma pour six printemps avec des images radar et des données de pluviomètres. Ils ont classifié les SCM selon différentes caractéristiques et ont montré la présence de précipitations stratiformes au sein de ces systèmes. McAnelly & Cotton (1989) ont analysé manuellement 122 CCM sur le centre des États-Unis à partir d'images satellitaires dans l'infrarouge et de données de pluviomètres. Ils suggèrent que les CCM de l'est génèrent plus de précipitations que ceux de l'ouest en plus d'être mieux organisés avec un noyau évident de précipitations intenses.

Plusieurs travaux s'intéressent aussi à la caractérisation des champs de précipitations, mais sans en extraire explicitement les structures (Berne *et al.*, 2009; AghaKouchak *et al.*, 2011). Dans ces travaux, la zone d'étude est généralement plus petite pour englober un seul système de précipitations. Notamment, Berne *et al.* (2009) ont analysé avec une méthode géostatistique les champs de précipitations des images radar de deux événements de précipitations intenses dans la région méditerranéenne de la France. Les deux événements ont une taille similaire, mais la dimension du noyau de précipitations intenses est plus grande pour l'événement associé à un SCM. Plus récemment, AghaKouchak *et al.* (2011) se sont intéressés à la caractérisation géométrique des patrons de précipitations de l'ouragan Rita, qui a frappé la côte américaine du golfe du Mexique en 2005,

en comparant des images satellitaires et des sorties de modèles de prévision météorologique à des images radar. Ils ont défini des indices de connectivité, d'organisation et de forme pour décrire le champ de précipitations de l'ouragan.

Certaines études classifient les structures de précipitations en différentes catégories selon les caractéristiques identifiées pour chaque structure (Baldwin & Lakshmivarahan, 2003; Baldwin *et al.*, 2005; Lakshmanan & Smith, 2009). Baldwin *et al.* (2005) ont identifié, caractérisé et classifié des structures de précipitations à partir d'images radar horaires (combinées à des données de pluviomètres) de 148 systèmes de précipitations sélectionnés de façon aléatoire sur les États-Unis continentaux. La classification visait à séparer automatiquement les structures convectives/non-convectives (succès à 89 %) et linéaires/en cellules/stratiformes (succès à 85 %) à l'aide de nombreuses caractéristiques relatives à la forme et à l'intensité des structures. Le choix des caractéristiques est particulièrement important dans une classification pour bien distinguer les structures entre elles.

D'autres travaux visent plutôt à évaluer les modèles de prévision météorologique en place en comparant directement une structure de précipitations simulée à une structure observée par radar (Ebert & McBride, 2000; Baldwin & Elmore, 2005; Davis *et al.*, 2006a; Brown & Bullock, 2007). Ebert & McBride (2000) ont défini le concept de *région contiguë de précipitations* (*Contiguous Rain-fall Area*, CRA), qui correspond au chevauchement entre une zone de précipitations simulées et une zone de précipitations observées. Ils évaluent ensuite les erreurs de position, de volume, d'intensité et de taille pour chaque CRA. Les événements de pluie simulés par le modèle numérique de prédiction LAPS du Bureau de météorologie de l'Australie ont été comparés à des observations radar selon cette méthode. Les résultats montrent que 45 % de tous les événements de précipitations ont été bien simulés avec principalement des erreurs de position et que 45 % des événements de précipitations intenses ont été bien simulés avec principalement une sous-estimation de l'intensité. Brown & Bullock (2007) présentent une méthode complètement automatisée d'évaluation des structures imitant l'analyse exécutée par un humain (*Method for Object-based Diagnostic Evaluation*, MODE). La méthode comprend l'identification, la mesure des attributs, l'association entre les structures simulées et observées (approche par logique floue) et la comparaison. La méthode est testée avec le modèle de prévision WRF et des données radar (combinées à des données de pluviomètres) pour quelques structures de précipitations sur les États-Unis. Les résultats présentent généralement des erreurs de position et de surestimation de l'intensité.

Plusieurs études s'intéressent plus spécifiquement à la dynamique des systèmes de précipitations en analysant le déplacement des structures dans le temps (Steinacker *et al.*, 2000; Davis *et al.*, 2006b; Baldwin, 2009; Choi *et al.*, 2009; Lakshmanan & Smith, 2009). Ces études passent aussi par l'identification et la caractérisation des structures, mais considèrent le suivi des structures dans le temps. Dans ce cas, la difficulté principale consiste à associer une structure située à un pas de temps donné à la structure correspondante au pas de temps suivant en considérant les particularités du cycle de vie d'un système de précipitations (*naissance, division, fusion, mort*). Avant les années 2000, les travaux visaient à automatiser le processus d'identification et de suivi des systèmes de précipitations sur les images radar pour la prévision à court terme de conditions météorologiques intenses (Crane, 1979; Dixon & Wiener, 1993; Johnson *et al.*, 1998). Plus récemment, d'autres études ont analysé le déplacement des structures à d'autres fins (p. ex. pour l'étude de la météorologie d'une région ou l'évaluation de modèles de prévision météorologique). Par exemple, Choi *et al.* (2009) se sont intéressés à l'identification et au suivi des systèmes de précipitations à un pas de temps horaire au-dessus d'une région spécifique du Texas à partir d'images radar. Le suivi se base sur le chevauchement des structures d'un pas de temps à un autre et sur la direction du déplacement précédent pour faciliter l'association des structures entre chaque pas de temps. Davis *et al.* (2006b) ont validé la représentation des systèmes de méso-échelle et de leur déplacement dans un modèle de prévision météorologique à partir de données radar horaires (combinées à des données de pluviomètres) en associant les systèmes un à un (simulé avec observé). Les systèmes simulés par le modèle étaient typiquement trop longs et décalés de une à deux heures. Les différences relatives à la taille et à l'intensité des systèmes étaient plus prononcées pour les régions du Midwest américain et de la vallée du Mississippi. Baldwin (2009) présente un cadre pour déterminer de façon automatisée si les modèles de prévision météorologiques représentent bien l'évolution temporelle des caractéristiques des systèmes convectifs observés. Plusieurs problèmes liés au développement d'un tel outil sont évoqués (p. ex. le choix de caractéristiques appropriées, la sélection des seuils, la détection de la *naissance* et de la *mort* d'un système).

2.3.2 Séries temporelles de précipitations : tendances historiques et projections climatiques

Du côté des analyses climatiques, de nombreux travaux ont été effectués à partir de séries temporelles de précipitations observées ou simulées. Les tendances historiques et les projections à

l'échelle du globe tirées du dernier rapport d'évaluation du GIEC sont illustrées aux figures 1.1 et 1.2 du chapitre 1 (IPCC, 2013a). Les tendances et les projections varient grandement d'une région à l'autre et les incertitudes sont importantes.

De nombreux travaux ont analysé les tendances historiques et les projections en climat futur des précipitations à partir d'observations, de MCG et de MRC (section 1.2 de l'article en seconde partie). Quelques études concernant particulièrement l'Amérique du Nord, zone d'intérêt du projet, sont présentées ici :

- Chen *et al.* (2005) ont utilisé un MRC développé par Chen *et al.* (2003) dont la composante atmosphérique est le MM5 (*Pennsylvania State University/National Center for Atmospheric Research*) couplé avec le modèle de transfert sol-surface LSX. Quatre régions sont étudiées aux États-Unis (centre, nord-est, sud-est et nord-est du Pacifique) avec deux simulations de 10 ans : une couvrant la période historique 1991-1999 et l'autre la période future 2090-2099. Leurs résultats suggèrent que les événements intenses de précipitations seront plus fréquents et les événements de faible intensité moins fréquents. De plus, les précipitations seraient plus convectives et les totaux journaliers plus grands, malgré un nombre de jours avec des précipitations à la baisse.
- Plummer *et al.* (2006) ont analysé quatre simulations du MRCC pour le Canada pour la période de référence 1971-1990 et la période future 2041-2060. Ils ont noté des changements entre les deux périodes de plus ou moins 10 % dans les précipitations moyennes saisonnières pour la majorité des régions et des saisons. Cependant, ils ont observé des augmentations plus importantes des précipitations moyennes au printemps sur l'intérieur du continent (Alberta, Saskatchewan, Manitoba) ainsi qu'en hiver sur l'est de l'Arctique (Nunavut).
- Sushama *et al.* (2006) ont effectué leur analyse à partir de trois simulations du MRCC couvrant la période future 2041-2070 pour six bassins versants de l'Amérique du Nord (Fraser, Mackenzie, Yukon, Nelson, Churchill et Mississippi). En comparant avec des simulations de la période historique 1961-1990, ils ont observé une augmentation des précipitations moyennes annuelles sur tous les bassins excepté celui du Mississippi.
- Dominguez *et al.* (2012) ont analysé les précipitations quotidiennes à partir de huit simulations de combinaisons distinctes MRC-MCG, dont sept proviennent du projet *North American Regional Climate Change Assessment Program* (NARCCAP). La huitième simulation a été générée de façon indépendante par les auteurs (*University of Arizona*). Entre la période

historique 1968-1999 et la période future 2038-2070, ils ont noté une augmentation statistiquement significative de l'intensité des précipitations hivernales (augmentation de 12,6 % pour la période de retour de 20 ans et de 14,4 % pour la période de retour de 50 ans). Pour les précipitations moyennes, leurs résultats montrent une diminution dans les précipitations hivernales d'environ 7,5 % pour le sud-ouest des États-Unis, tandis que l'intérieur montre une augmentation moins significative.

- Mailhot *et al.* (2012) se sont intéressés aux maxima annuels de précipitations au Canada pour différentes durées (6, 12, 24, 72 et 120 heures) et périodes de retour (2, 5, 10 et 20 ans). Les changements sont analysés à partir de quatre simulations climatiques de NARCCAP couvrant la période future 2041-2070 et des simulations correspondantes sur la période historique 1971-2000. Les résultats montrent une augmentation de 12 % à 18 % selon les durées et les périodes de retour. Les plus fortes augmentations se produiraient dans le sud de l'Ontario, les Prairies et le sud du Québec.
- Wehner (2012) a également utilisé les simulations de NARCCAP, cette fois sur les périodes 1968-1999 et 2038-2070 pour analyser les précipitations quotidiennes par saison. Il a noté des augmentations relatives atteignant 25 % (statistiquement significatives) concernant les précipitations moyennes quotidiennes pour le nord des États-Unis et le Canada durant l'hiver et pour le Canada durant les autres saisons. Il a noté des diminutions relatives du même ordre (25 %; statistiquement significatives) pour l'ouest des États-Unis durant l'été et pour le sud-ouest au printemps. Les projections concernant les extrêmes quotidiens et les valeurs pour des périodes de retour de 20 ans suivent généralement la même répartition spatiale, mais montrent des changements plus faibles et moins significatifs.

Chapitre 3

Méthodologie

Ce chapitre présente les éléments méthodologiques du projet ainsi que des informations complémentaires concernant les origines de la méthodologie, la zone d'étude, les données utilisées et la méthode de traitement elle-même.

3.1 Fondements de l'analyse des structures de précipitations

La présente étude porte sur les structures de précipitations issues des champs de précipitations horaires simulés par le MRCC. Rappelons qu'un champ de précipitations correspond à toutes les valeurs de précipitations à un moment spécifique sur un territoire et se compose de plusieurs structures de précipitations, zones contiguës de précipitations supérieures à un seuil donné. À notre connaissance, aucun article publié à ce jour n'a porté spécifiquement sur l'analyse des structures de précipitations simulées par un MRC.

La méthodologie, qui vise à explorer la dimension spatiale des précipitations par l'analyse de leur structure, provient du domaine de la météorologie (voir la section 2.3.1). Plus particulièrement, de nombreux travaux de recherche ont porté sur le développement de méthodes de validation des modèles de prévision météorologique. Dans ce domaine, la validation consiste à déterminer dans quelle mesure les prévisions correspondent aux observations, ce qui permet d'évaluer la performance des modèles de prévision (Gilleland *et al.*, 2009; Jolliffe & Stephenson, 2012). Par ailleurs, plusieurs projets internationaux d'intercomparaison des méthodes de validation ont été mis sur pied au cours

des dernières années (Ebert *et al.*, 2004; Baldwin & Elmore, 2005; Gilleland *et al.*, 2010). Traditionnellement, les méthodes de validation comparent les précipitations simulées aux précipitations observées à chaque point de grille. Cependant, quatre grandes familles de méthodes ont été proposées pour analyser spécifiquement la dimension spatiale des précipitations (Jolliffe & Stephenson, 2012) :

- Méthodes par voisinage : comparaison du champ de précipitations simulé et observé selon différentes échelles spatiales en appliquant un filtre moyen pour réduire la résolution spatiale. Les erreurs sont déterminées pour chaque échelle spatiale.
- Méthodes par séparation d'échelle : filtrage spatial du champ de précipitations simulé et observé (décomposition de Fourier ou par ondelettes) pour isoler les différents niveaux de détails, associés à différentes échelles spatiales. Les erreurs sont déterminées pour chaque niveau de détails.
- Méthodes par objets : Identification et caractérisation des objets distincts présents dans le champ de précipitations, suivi d'une association des objets du champ simulé à ceux du champ observé selon leurs similarités. Les erreurs correspondent aux différences entre les caractéristiques des paires d'objets associés.
- Méthodes par séparation du champ : transformation du champ de précipitations simulé vers le champ de précipitations observé. Les transformations nécessaires correspondent aux erreurs de simulation.

Toutes ces méthodes s'intéressent au caractère spatial des précipitations, mais les méthodes par objets reposent spécifiquement sur la caractérisation des structures de précipitations (Casati *et al.*, 2008; Gilleland *et al.*, 2009; Jolliffe & Stephenson, 2012). Par conséquent, une méthode d'analyse par objets a été développée pour les besoins du projet (voir la section 3.4) en s'inspirant fortement des méthodes existantes de cette famille. Généralement, les objets sont comparés par paires (chaque objet simulé est associé à un objet observé), mais dans le contexte du projet, la méthode est adaptée pour analyser statistiquement les caractéristiques des structures de précipitations regroupées par région et par période de plusieurs années, en plus de travailler à une résolution spatiale plus large (résolution du MRCC). Dans cette méthode, le terme *objet* fait référence à une *structure de précipitations*.

3.2 Zone d'étude

La zone d'étude correspond au domaine de simulation du MRCC qui englobe l'Amérique du Nord (AMNO; figure 3.1). L'étude s'intéresse plus spécifiquement aux structures de précipitations qui couvrent la partie terrestre du continent correspondant au Canada et aux États-Unis.

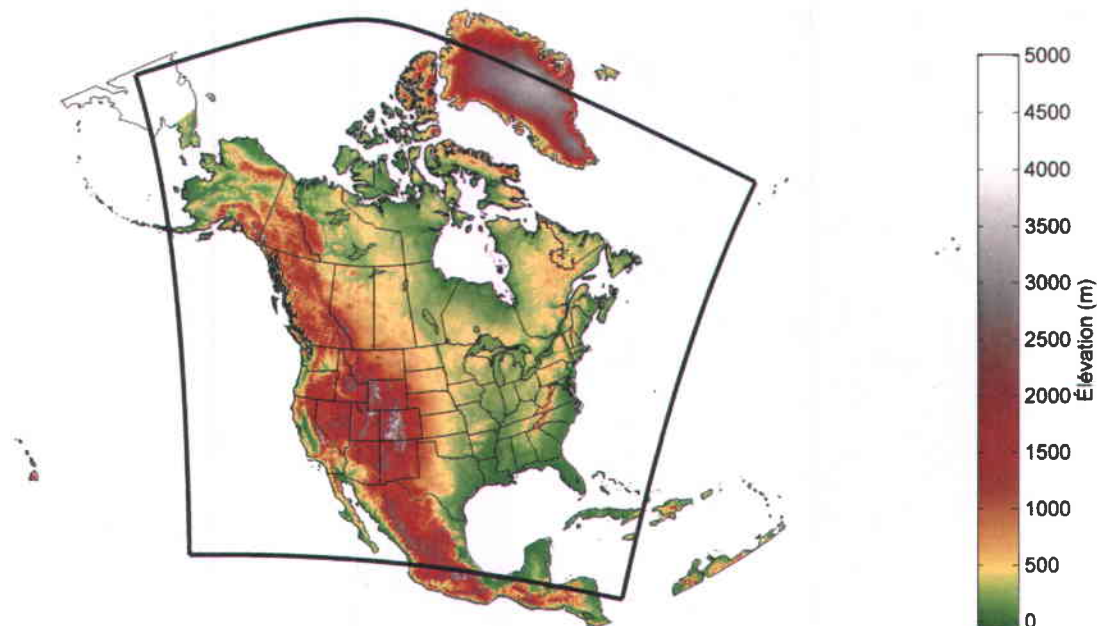


Figure 3.1 – Carte topographique de l'Amérique du Nord. Les frontières du domaine AMNO (zone d'étude) sont indiquées par un trait noir.

3.2.1 Topographie

La topographie du continent influence grandement le régime des précipitations. Par exemple, la présence de montagnes force les masses d'air à monter en altitude, ce qui entraîne un refroidissement de la vapeur d'eau et des précipitations (voir la section 2.1.2). Ce processus, appelé effet orographique, explique la présence accrue de précipitations dans les régions montagneuses (Whiteman, 2000). Globalement, le continent se caractérise par la présence de hautes chaînes de montagnes et de vallées à l'ouest. Le centre laisse place à d'immenses plaines tandis que l'est présente un relief plus hétérogène à faible altitude.

Les données d'élévation proviennent du modèle numérique d'altitude *Global Land One-kilometer Base Elevation* (GLOBE) disponible pour les zones terrestres de la planète (GLOBE Task Team and others, 1999). Ces données révèlent un écart de plus de 5000 mètres entre le point le plus haut et

le point le plus bas du continent (figure 3.1) avec une résolution spatiale de 1 km x 1 km. En réalité, le point le plus haut, Mount McKinley (Alaska), est situé à 6194 m et le point le plus bas, Badwater Basin (Death Valley, Californie), est situé à -86 m, ce qui donne un écart réel de 6280 m. La différence entre l'écart réel et l'écart obtenu en utilisant les données GLOBE s'explique par la résolution spatiale des données GLOBE, puisque les variations topographiques sont moyennées sur 1 km x 1 km. Une sous-estimation des altitudes se fait particulièrement sentir en régions montagneuses. Malgré la résolution, les données représentent bien les variations présentes dans la topographie de l'Amérique du Nord. Il faut noter que la topographie est représentée plus grossièrement dans le MRCC, puisque sa résolution spatiale est de 45 km x 45 km. Cette représentation demeure toutefois plus précise que celle d'un MCG.

3.2.2 Régions climatiques

Pour simplifier l'analyse, le continent a été subdivisé en 16 régions climatiques (D. Plummer, communication personnelle; figure 3.2). Onze de ces régions climatiques sont définies dans les travaux de Plummer *et al.* (2006). La division se base principalement sur la physiographie du territoire, mais considère également les variations climatiques à grande échelle (Plummer *et al.*, 2006). Les régions sont donc relativement homogènes sans être trop nombreuses ou trop petites. Le tableau 3.1 présente une brève description de chaque région.

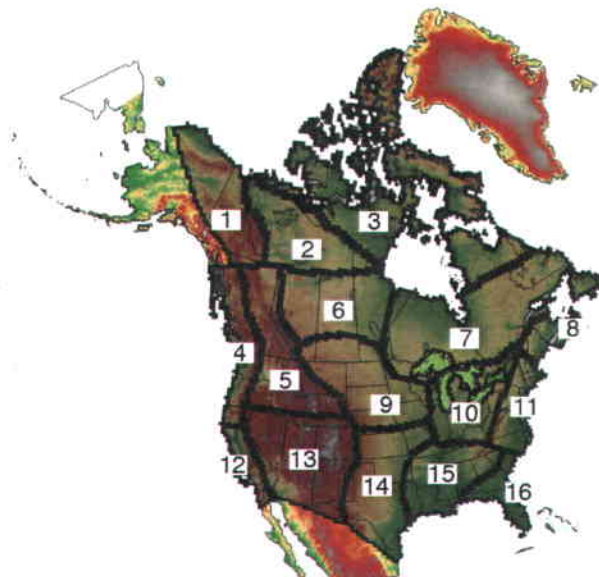


Figure 3.2 – Carte des 16 régions climatiques définies pour les besoins de l'étude (voir le tableau 3.1 pour l'identification des régions selon leur numéro).

Tableau 3.1 – Description sommaire des régions climatiques (voir la carte des régions à la figure 3.2).

No	Nom	Abréviation	Description
1	Yukon	Yukon	Région nordique montagneuse
2	Mackenzie	Mack	Région nordique incluant le delta du fleuve Mackenzie
3	Est de l'Arctique	EArct	Région nordique peu habitée au relief accidenté avec une végétation de toundra
4	Côte ouest	WCoast	Région côtière du Pacifique allant du sud de l'Alaska au nord de la Californie
5	Cordillère de l'ouest	WCord	Région montagneuse de l'ouest
6	Forêt nord-ouest	NWForest	Région forestière centrale bordée par la Baie d'Hudson
7	Forêt nord-est	NEForest	Région forestière de l'est incluant les basses-terres du fleuve St-Laurent et les plaines de la baie d'Hudson
8	Maritimes	Marit	Région côtière de l'Atlantique incluant le golfe du St-Laurent et ses îles
9	Plaines du nord	NPlains	Région centrale au relief plat où l'agriculture domine
10	Grands Lacs	GrtLakes	Région intérieure incluant les Grands Lacs
11	Côte Atlantique	MidAtl	Région côtière de l'Atlantique allant du sud du Maine au nord de la Caroline du sud
12	Californie	Calif	Région côtière du Pacifique au relief de montagnes et de vallées avec un climat méditerranéen
13	Intérieur sud-ouest	SWInt	Région intérieure au relief accidenté avec un climat désertique
14	Plaines du sud	SPlains	Région centrale du sud au relief plat où l'agriculture domine
15	Intérieur sud-est	SEInt	Région bordée par le golfe du Mexique incluant le delta du fleuve Mississippi
16	Côte sud-est	SECoast	Région côtière de l'Atlantique bordée par le golfe du Mexique incluant principalement la Floride

3.3 Données de précipitations utilisées

Plusieurs ensembles de données ont été utilisés afin de répondre aux objectifs du projet. Le premier objectif nécessite des données observées et simulées pour évaluer la performance du MRCC,

Tableau 3.2 – Description des ensembles de données utilisés.

Nom	Description	Période disponible	Résolution temporelle	Couverture spatiale	Résolution spatiale	Type
AET	MRCC piloté par MCGC (4 ^e membre)	1961-2100	15 min	AMNO	45 km	simulé
AEV	MRCC piloté par MCGC (5 ^e membre)	1961-2100	15 min	AMNO	45 km	simulé
AGO	MRCC piloté par ERA40	1958-2002	15 min	AMNO	45 km	simulé
ST4	NCEP Stage IV	2002-2012	1 h	É-U	4 km	observé
CRU	CRU TS 3.20	1901-2012	1 mois	Globe	0.5°	observé

tandis que le deuxième objectif repose uniquement sur des données simulées pour établir les projections futures. Un résumé des données est présenté au tableau 3.2.

Le projet utilise deux simulations (AET; AEV) de la version 4.2.3 du MRCC piloté par le MCGC de troisième génération et une simulation (AGO) du MRCC piloté par une réanalyse du *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) à une résolution de 40 km (ERA40). Les simulations AET et AEV se distinguent par le membre du MCGC qui a servi à la simulation (AET : 4^e membre; AEV : 5^e membre). Les membres sont des simulations exécutées avec la même version du modèle, mais considérant des conditions initiales différentes. Ils servent notamment à explorer la variabilité interne du climat. Les projections futures des simulations AET/AEV reposent sur le scénario d'émission de GES A2 du SRES (voir la section 2.2.1), un scénario très utilisé dans la projection de changements climatiques. Les données du MRCC ont été générées et fournies par Ouranos, consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques.

Le projet utilise également un ensemble de données observées de *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) nommé *Stage IV* (ST4), construit à partir de données provenant de radars WSR-88D et de pluviomètres (Lin & Mitchell, 2005). Cet ensemble de données est un produit d'estimation quantitative des précipitations (*Quantitative Precipitation Estimation*, QPE) disponible sur une projection stéréographique polaire de 4 km x 4 km (dimension réelle de 4,7625 km à 60° N) couvrant la partie continentale des États-Unis. Fulton *et al.* (1998) détaillent l'algorithme général de traitement des données pour obtenir un produit QPE. Dans le cas de ST4, le traitement est effectué par les centres de prévision régionaux (*River Forecast Centers*, RFC) et les produits obtenus sont ensuite combinés par NCEP dans une mosaïque nationale pour les États-Unis.

Un ensemble de données supplémentaire a été utilisé dans le but de vérifier certaines hypothèses de travail et de contrôler la qualité des ensembles de données précédents. Les séries de précipitations mensuelles sur grille à haute résolution (*Time Series*, TS 3.20) sont fournies par le groupe Climate Research Unit (CRU) de l'université d'East Anglia (Harris *et al.*, 2013). Les données couvrent la période allant de 1901 à aujourd'hui sur une grille régulière de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ en latitude et longitude incluant tous les continents excepté l'Antarctique. La base de données CRU est construite à partir d'observations mensuelles homogénéisées du climat provenant de stations météorologiques dispersées sur le globe. Les données disponibles pour l'Amérique du Nord ont été projetées sur la grille du MRCC de 45 km x 45 km pour fin de comparaison.

3.4 Méthode d'analyse des structures de précipitations

La méthode d'analyse par objets adaptée pour le projet se divise en quatre étapes principales (figure 3.3). D'abord, un traitement préliminaire consiste à uniformiser les échelles temporelle et spatiale des données. Ensuite, il s'agit d'identifier les structures présentes dans les champs de précipitations et de caractériser chacune d'entre elles. La méthode se termine avec l'analyse statistique de l'ensemble des caractéristiques. Les trois premières étapes sont inspirées des travaux de Davis *et al.* (2006a) et Baldwin *et al.* (2005).



Figure 3.3 – Étapes de la méthode d'analyse par objets.

Tous les traitements ont été automatisés par programmation avec le logiciel MATLAB en utilisant les boîtes à outils *Mapping*, *Statistics*, *Parallel Computing* et *Image Processing*. MATLAB a été choisi par souci de compatibilité avec certains ensembles de données partiellement traités et par souci de réutilisation des fonctions au sein de l'équipe de recherche.

3.4.1 Traitement préliminaire des données

Séries de précipitations horaires

Le MRCC fournit des données aux 15 minutes, mais il n'est pas recommandé de travailler directement avec le pas de temps le plus petit du modèle. Les séries de précipitations aux 15 minutes des simulations AET, AEV et AGO (tableau 3.2) ont donc été agrégées au pas de temps horaire pour chaque tuile. À noter, plus le pas de temps choisi est grand, plus la corrélation spatiale entre les valeurs de précipitations de tuiles avoisinantes devient élevée à cause de l'intégration du déplacement des systèmes de précipitations. Pour étudier les structures de précipitations, il est donc préférable de travailler avec la résolution temporelle la plus fine possible (p. ex. une heure versus une journée).

Grille de projection des données

Pour assurer une cohérence dans la comparaison des résultats, les ensembles de données observées, ST4 et CRU (tableau 3.2), ont été projetés sur une grille commune, à savoir la grille de simulation du MRCC, une projection stéréographique polaire avec des tuiles de 45 km de côté (dimensions vraies à 60° N). Dans le cas de ST4, la résolution native est de 4 km x 4 km sur une projection stéréographique polaire différente de celle du MRCC. Pour CRU, la grille est définie directement en coordonnées géographiques avec une résolution de 0.5° (environ 55 km x 55 km). La résolution spatiale des données ST4 est donc plus fine que celle du MRCC et, dans le cas de CRU, la résolution est similaire.

Les données sont projetées sur la grille commune à l'aide d'une méthode conservative de premier ordre (Jones, 1999). Cette méthode traite les données de la grille de départ selon une pondération proportionnelle à la superficie des tuiles sources qui chevauchent la tuile de destination (Bryan *et al.*, 1996). Les valeurs des tuiles sources sont multipliées par leur poids respectif et additionnées ensemble pour former la valeur de la tuile de destination. La figure 3.4 illustre un exemple de projection des tuiles ST4 sur la grille commune. Une fois les poids calculés, la projection est appliquée à tous les pas de temps étudiés.

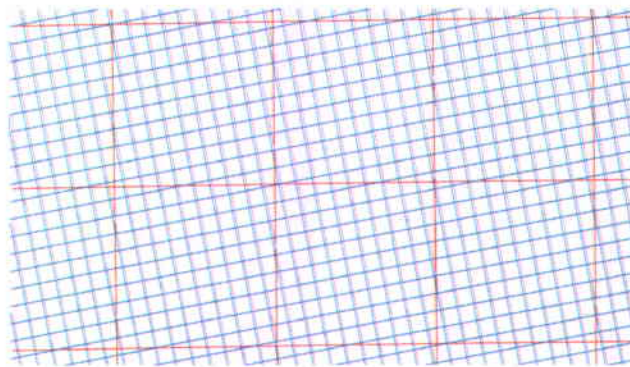


Figure 3.4 – Exemple de projection des tuiles depuis la grille ST4 (en bleu) vers la grille de référence du MRCC (en rouge).

À noter, les tuiles sont déformées par la projection stéréographique polaire du domaine de simulation. Les dimensions de chaque tuile varient selon la latitude avec une taille exacte de 45 km x 45 km à 60° N. La dimension des tuiles en kilomètres est estimée à partir de facteurs d'échelle disponibles pour la grille de simulation du MRCC. Cette transformation, incorporée au calcul des caractéristiques, permet d'assurer une cohérence entre les structures de précipitations situées à différentes latitudes sur le continent.

3.4.2 Identification des structures de précipitations

L'identification des structures de précipitations au sein d'un champ de précipitations repose sur une technique propre au domaine du traitement d'images. À chaque pas de temps, le champ de précipitations est considéré comme une image dans laquelle chaque tuile correspond à un pixel. Les étapes suivantes sont exécutées pour segmenter l'image en objets (figure 3.5) :

1. Retirer les valeurs de précipitations inférieures au seuil de précipitations fixé (figure 3.5b).
2. Créer une copie de la grille en remplaçant toutes les valeurs de précipitations supérieures au seuil fixé par une valeur unique (p. ex. le chiffre un; figure 3.5c).
3. Isoler chaque objet, c'est-à-dire chaque groupe de pixels adjacents contenant la valeur unique (figure 3.5d).
4. Récupérer les valeurs de précipitations associées à chaque objet.

Le seuil de précipitations a d'abord été fixé arbitrairement à 0.2 mm pour éliminer les valeurs faibles de précipitations. Il est essentiel d'éliminer ces valeurs faibles, car les modèles climatiques surestiment de façon importante la fréquence des précipitations de faible intensité (Sun *et al.*, 2006).

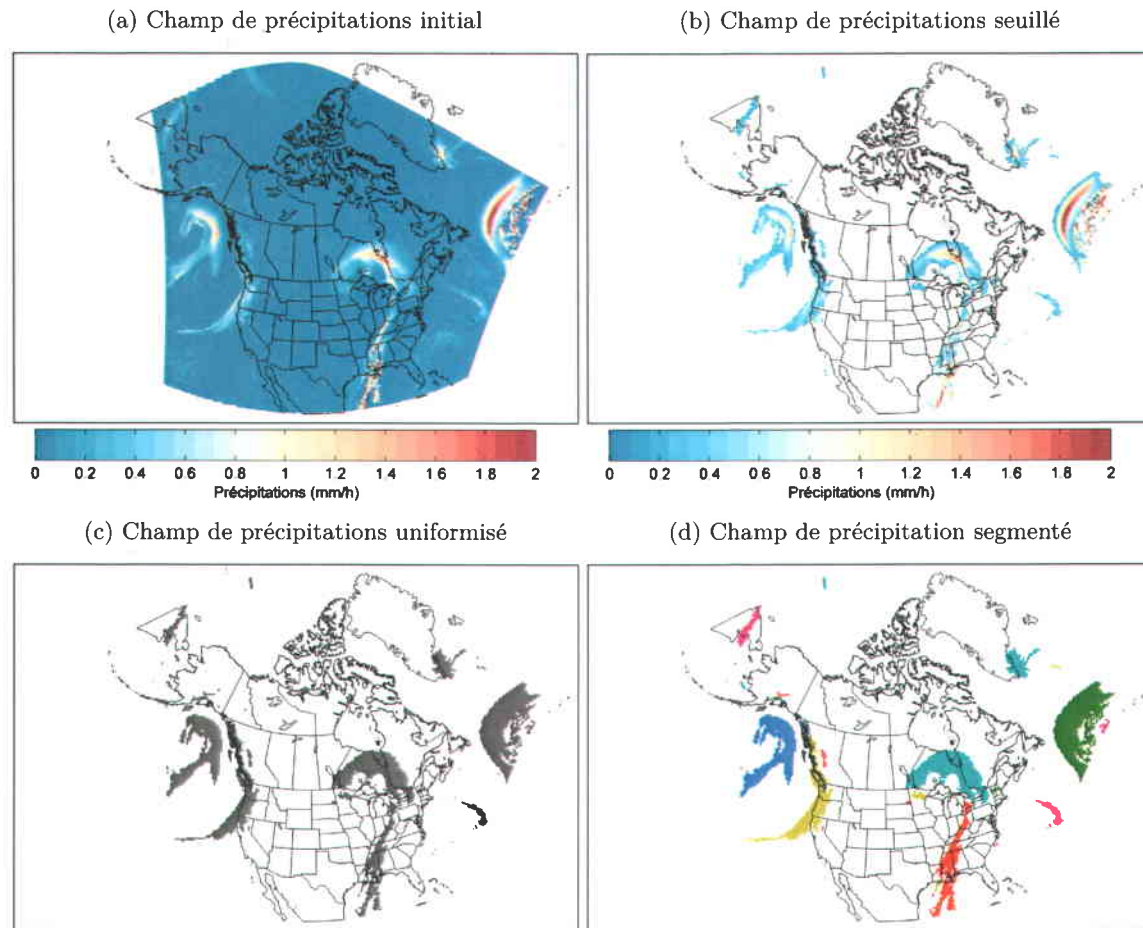


Figure 3.5 – Exemple d'identification des structures d'un champ de précipitations à un pas de temps spécifique.

De plus, l'application d'un seuil permet de distinguer clairement les tuiles avec/sans précipitations. L'analyse complète a été répétée avec un seuil de 0.4 mm pour vérifier l'effet d'une modification du seuil sur les résultats.

À l'étape 3, les différents objets, ou structures de précipitations, sont isolés à l'aide d'un algorithme basé sur le concept de composantes connexes (Shapiro & Stockman, 2001). Une composante connexe correspond à une région où tous les pixels adjacents ont une valeur donnée, ici selon un voisinage de huit pixels (figure 3.6). L'algorithme fonctionne selon le principe suivant :

1. Parcourir la grille pixel par pixel pour trouver le prochain pixel qui n'est pas étiqueté comme un objet.
2. Vérifier si le pixel courant est voisin d'un pixel déjà parcouru.
 - Si oui, lui donner la même étiquette.

- Si non, lui donner une nouvelle étiquette.
 - S'il est voisin de plus d'un pixel déjà parcouru possédant des étiquettes différentes, attribuer une des étiquettes à ce pixel et noter que ces étiquettes sont équivalentes.
3. Parcourir la grille à nouveau pour remplacer les étiquettes équivalentes par une étiquette unique.

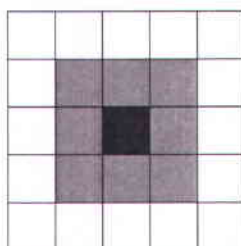


Figure 3.6 – Voisinage de huit pixels. Le pixel noir représente la position du pixel courant et les pixels gris, la position de ses voisins.

Une fois l'algorithme exécuté pour chaque pas de temps, on obtient une liste d'objets. Chaque objet est associé à une liste de pixels contenant les valeurs de précipitations originales pour les tuiles de l'objet. Ensuite, chaque objet peut être traité individuellement pour en établir ses caractéristiques.

3.4.3 Caractérisation des structures de précipitations

Dans le cadre du projet, les structures de précipitations sont étudiées à travers diverses caractéristiques liées à la géométrie des structures et à l'intensité des précipitations au sein des structures (tableau 3.3). La sélection des caractéristiques est inspirée des notions présentées à la section 2.1.2.

Le centroïde, la superficie, le volume de précipitations et les intensités moyenne et maximale sont calculés directement à partir des tuiles composant la structure de précipitations.

Les calculs pour obtenir l'orientation, l'excentricité et la longueur des axes principal et secondaire reposent sur l'approximation de la structure de précipitations par une ellipse. Cette façon de représenter une région bidimensionnelle est propre au domaine du traitement d'images. La région correspondant à la structure de précipitations est d'abord reproduite en remplaçant chaque valeur de précipitations par le chiffre « 1 », ce qui permet de s'intéresser spécifiquement à la forme de la structure et non à son contenu. Ensuite, les moments centraux normalisés de deuxième ordre

Tableau 3.3 – Caractéristiques considérées pour les structures de précipitations.

Caractéristique	Unité	Catégorie
Axe principal	km	Géométrie
Axe secondaire	km	Géométrie
Centroïde	° latitude, ° longitude	Géométrie
Distribution des précipitations (paramètres de la distribution gamma)	α : sans unité β : mm/h	Intensité
Excentricité	sans unité (0 = cercle, 1 = ligne)	Géométrie
Intensité moyenne	mm/h	Intensité
Intensité maximale	mm/h	Intensité
Orientation	° par rapport au Nord (sens horaire)	Géométrie
Superficie	km ²	Géométrie
Volume de précipitations	m ³	Intensité

de la région sont estimés (Haralick & Shapiro, 1992). La normalisation s'effectue selon l'aire de la structure en question. Les moments permettent de calculer l'orientation, l'excentricité et la longueur des axes principal et secondaire de l'ellipse correspondante. L'hypothèse que les objets présentent une forme ellipsoïdale est vérifiée. Un groupe de 100 objets a été sélectionné aléatoirement parmi les 3 466 150 objets (objets identifiés, caractérisés et filtrés pour l'analyse) de l'ensemble AET sur la période 1961-1990 tous mois et régions confondus. Chacun de ces 100 objets est illustré avec l'ellipse ajustée correspondante. Les figures ainsi obtenues sont évaluées visuellement pour déterminer si l'ellipse décrit bien la forme de l'objet. En somme, 86 objets sur 100 sont très bien représentés par l'ellipse et 14 objets sur 100 sont représentés de façon acceptable. Globalement, les objets peuvent être assimilés à des ellipses.

La distribution des précipitations (paramètres α et β de la distribution gamma) permet d'estimer l'hétérogénéité des valeurs d'intensité au sein de la structure de précipitations. Le paramètre de forme, α , contrôle principalement l'asymétrie de la distribution, tandis que le paramètre d'échelle, β , détermine principalement si la distribution est étirée vers la droite ou resserrée vers la gauche (Baldwin *et al.*, 2005; Wilks, 2011). Par exemple, selon cette définition, une distribution asymétrique et étirée est considérée plus hétérogène qu'une distribution symétrique et compacte. Un test visuel similaire à celui de l'ellipse a été utilisé pour vérifier l'hypothèse que les précipitations des objets

suivent une distribution gamma. Cent objets ont été sélectionnés aléatoirement parmi le même groupe de 3 466 150 objets de l'ensemble AET (1961-1990). Un graphique quantile-quantile est tracé pour chaque objet afin de comparer la distribution empirique des précipitations à la distribution gamma ajustée. Cette fois, 53 objets sur 100 ont des précipitations très bien représentées par la distribution gamma (écart moyen inférieur à 0,5 mm/h), 30 objets sur 100 ont des précipitations représentées de façon acceptable par la distribution gamma (écart moyen inférieur à 1 mm/h) et 17 objets sur 100 ont des précipitations représentées de façon douteuse par la distribution gamma.

Les caractéristiques ont été calculées selon des unités de mesure courantes (p. ex. kilomètre, degré, millimètre) pour simplifier l'interprétation et la comparaison des résultats à d'autres études dans la littérature. Notamment, la superficie est calculée en kilomètres carrés en utilisant la dimension exacte des tuiles, plutôt qu'en nombre de tuiles.

Finalement, une caractéristique supplémentaire, le nombre de structures de précipitations, a été considérée pour brosser un portrait plus complet du comportement des précipitations (pour chaque mois et région climatique). Cette caractéristique est classée à part, car elle ne décrit pas une structure de précipitations unique, mais véhicule plutôt une information globale sur les structures de précipitations associées à un mois et une région climatique donnés. À noter, une variation dans le nombre de structures de précipitations peut être attribuable soit à une variation effective du nombre de systèmes de précipitations ou à une variation de la durée de vie moyenne de ces systèmes.

3.4.4 Analyse statistique des caractéristiques

Critères de sélection

Plusieurs critères ont été définis afin de sélectionner les structures de précipitation qui font l'objet de l'analyse statistique. Tout d'abord, toutes les structures touchant une bordure de la zone d'étude, c'est-à-dire une frontière du domaine de simulation du MRCC, sont éliminées. Ce critère vise à exclure de l'analyse les structures de précipitations incomplètes. Ensuite, seules les structures ayant un axe principal d'une longueur entre 200 km et 2 000 km sont retenues. Ces dimensions correspondent aux processus atmosphériques d'échelle méso- α (voir le tableau 2.1). Le fait de travailler avec une seule catégorie de processus atmosphériques (méso- α) assure une certaine cohérence dans l'analyse. Finalement, chaque structure de précipitations est associée à

la région climatique contenant la plus grande proportion de sa superficie totale. Les structures situées entièrement au-dessus d'une étendue d'eau ne sont pas considérées. Ce choix s'avère simple à implémenter et permet d'inclure dans l'analyse les structures de précipitations typiques des systèmes océaniques qui caractérisent plus spécifiquement les régions côtières. L'analyse porte donc seulement sur les structures de précipitations associées à une région climatique. Les mêmes contraintes sont appliquées à tous les ensembles de données utilisés dans cette étude.

Organisation des caractéristiques

Pour fin d'analyse, les caractéristiques sont d'abord groupées par mois, année, région climatique et ensemble de données. La figure 3.7 illustre un exemple de distribution des valeurs originales d'une caractéristique pour un regroupement spécifique (intensité moyenne des structures de précipitations pour le mois de juillet 1961 selon la simulation AET pour la région climatique Forêt nord-est). Toutes les distributions présentent des formes similaires non gaussiennes. Pour chacune de ces distributions empiriques, la médiane est estimée. Ensuite, pour chaque période à l'étude (p. ex. 1961-1990), une série des valeurs annuelles de ces médianes est construite (figure 3.8). Plus spécifiquement, les séries de médianes sont construites pour chaque caractéristique (p. ex. intensité moyenne), ensemble de données (p. ex. AET), mois (p. ex. juillet), période (p. ex. 1961-1990) et région climatique (p. ex. Forêt nord-est). La distribution des valeurs annuelles de médianes se rapproche beaucoup d'une distribution gaussienne.

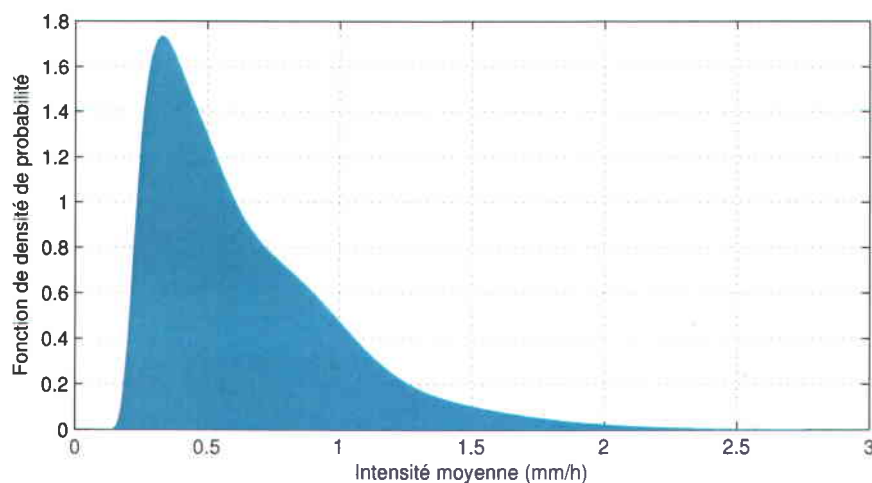


Figure 3.7 – Exemple de distribution empirique des valeurs d'intensités moyennes des structures de précipitations pour le mois de juillet de l'année 1961 selon la simulation AET pour la région climatique Forêt nord-est (NEForest).

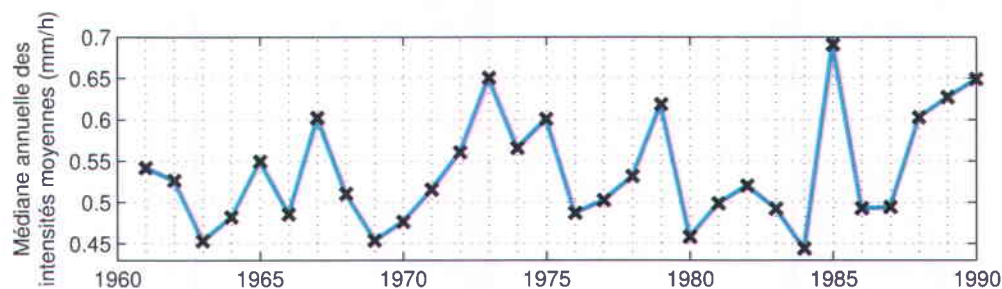


Figure 3.8 – Exemple d’une série de médianes des distributions annuelles des intensités moyennes des structures de précipitations construite pour la période 1961-1990 à partir des valeurs d’intensités moyennes des mois de juillet selon l’ensemble de données AET pour la région climatique Forêt nord-est (NEForest).

Toutes les comparaisons subséquentes portent sur les séries de médianes annuelles et, plus particulièrement, sur les moyennes de ces séries. Le projet s’intéresse donc à la tendance centrale du comportement des précipitations. Notons que l’autocorrélation demeure négligeable puisque des valeurs annuelles (médianes des distributions annuelles) sont considérées.

Considérations sur les incertitudes

Tel que présenté à la section 2.2, certaines incertitudes influencent l’analyse de projections provenant de modèles climatiques. Les différentes incertitudes et sources de variabilité à considérer lors de l’analyse des résultats sont les suivantes :

- Scénario d’émission des GES : Cette incertitude concerne uniquement les simulations futures du MRCC piloté par le MCGC. Un seul scénario d’émission est considéré dans le cadre du projet, le scénario A2 du SRES, vu la disponibilité des données.
- Structure du modèle : Les simulations utilisées proviennent d’un seul MRC. La section 4.2.1 explore spécifiquement les différences entre le MRCC et les observations, ce qui permet de vérifier, dans une certaine mesure, la performance du modèle quant à sa capacité à reproduire les caractéristiques des structures des précipitations observées.
- Conditions aux frontières du modèle : Deux pilotes distincts, la réanalyse ERA40 et le MCGC, sont utilisés aux frontières du MRCC dans le cadre de ce projet. La section 4.2.2 s’intéresse précisément aux différences dans les caractéristiques des structures de précipitations selon le pilote utilisé.
- Variabilité interne du climat : La variabilité interne est considérée en comparant les résultats de deux simulations du MRCC piloté par le MCGC (AET; AEV). La différence entre les

deux simulations en climat historique d'une part et en climat futur d'autre part donne un aperçu de la variabilité interne du climat. Pour établir les changements projetés, un ratio *signal sur variabilité* (*Signal-to-variability ratio*, SVR; équation 3.1), correspondant au signal de changement climatique sur la variabilité interne, est calculé. Ce ratio permet d'identifier les changements qui sont plus grands que la différence entre les deux simulations.

- Variabilité interannuelle : Pour comparer les séries de médianes, la différence entre les moyennes des séries est calculée (pour chaque caractéristique, mois, ensemble de données et région climatique). Cependant, il faut évaluer si cette différence est statistiquement significative selon les deux échantillons considérés (c'est-à-dire les deux séries de médianes à comparer), ce que permet le test statistique de Welch. De plus, des périodes d'un minimum de 10 ans de données sont utilisées et, généralement, des périodes de 30 ans de données, ce qui permet de considérer certaines variations d'une année à l'autre dans une même série de médianes.

Le SVR correspond au rapport entre le changement minimal observé entre climat futur et climat historique selon AET et AEV et la différence maximale entre les deux simulations en climat historique d'une part et en climat futur d'autre part. Ce ratio se calcule selon l'équation suivante :

$$\text{SVR} = \frac{\min(|\bar{x}_{AET,f} - \bar{x}_{AET,h}|, |\bar{x}_{AEV,f} - \bar{x}_{AEV,h}|)}{\max(|\bar{x}_{AEV,h} - \bar{x}_{AET,h}|, |\bar{x}_{AEV,f} - \bar{x}_{AET,f}|)} \quad (3.1)$$

où $\bar{x}$ est la moyenne de la série de médianes annuelles pour chaque caractéristique, ensemble de donnée (AET ou AEV) et période (f = future et h = historique).

Le test statistique de Welch est un test paramétrique basé sur le test de Student. Il permet de comparer des échantillons de variances différentes ne respectant pas de façon stricte des conditions de normalité (Fagerland & Sandvik, 2009), contrairement au test de Student. Le test de Welch est également plus robuste que le test non-paramétrique de Wilcoxon-Mann-Whitney pour des échantillons près de la normalité (Skovlund & Fenstad, 2001). Le test est donc bien adapté à des séries de médianes dont les distributions sont presque normales et les variances différentes.

Visualisation des résultats

Une attention particulière a été accordée à la visualisation des données pour faciliter l'analyse des résultats. L'importance de la visualisation est souvent sous-estimée, mais il s'agit d'un moyen très efficace de synthétiser de l'information. Le cerveau assimile beaucoup mieux un graphique bien construit qu'un tableau de valeurs. Il faut cependant s'assurer que la visualisation véhicule bien l'information et n'induit pas l'observateur en erreur.

Entre autres, un graphique de type *heatmap* (Yau, 2011) a été utilisé pour visualiser d'un seul coup d'oeil les différences entre deux ensembles de données ou deux périodes de temps pour toutes les caractéristiques, mois et régions climatiques. Un *heatmap* est une représentation graphique similaire à un tableau, mais où chaque valeur est remplacée par une couleur (p. ex. voir la figure 4.5). Cette représentation facilite la comparaison entre des variables multiples selon la progression de couleurs utilisée. Malgré la grande quantité d'information affichée, un *heatmap* permet de cibler les caractéristiques, les mois et les régions d'intérêt en plus de comprendre les différences globales (p. ex. les différences sur un groupe de régions) à l'aide d'un seul graphique. Les différences globales sont difficiles à identifier lorsque les résultats sont analysés avec des graphiques individuels.

De plus, les graphiques illustrant les cycles annuels pour chacune des caractéristiques ont été disposés selon la position géographique relative de chaque région (p. ex. voir la figure 4.3). Cette disposition permet de regrouper mentalement les similarités de comportement selon la dimension spatiale.

Finalement, le choix des couleurs associées aux échelles de valeurs des graphiques de type *heatmap* et des cartes se base sur les recherches de Light & Bartlein (2004). L'objectif est de fournir un bon contraste pour améliorer la clarté et la communication, distinguable même par les personnes daltoniennes. Les échelles de valeurs séquentielles utilisent donc le spectre de l'arc-en-ciel modifié, ne contenant pas de tons jaune-vert et variant l'intensité de chaque couleur en plus du ton (figure 3.9a). Les échelles de valeurs divergentes, utilisées pour illustrer des différences, vont plutôt du orange vers le bleu en passant par le blanc (figure 3.9b). Il s'agit simplement d'une progression orange-blanc juxtaposée à une progression blanc-bleu.

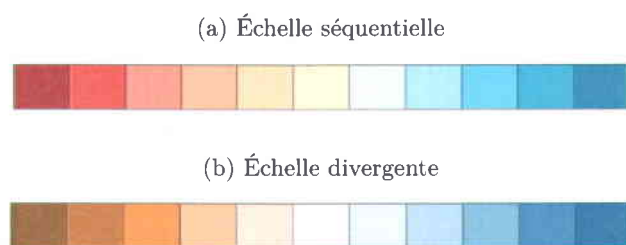


Figure 3.9 – Progressions de couleurs utilisées pour les échelles de valeurs.

Chapitre 4

Résultats et discussion

La présente section propose des résultats complémentaires au projet ainsi qu'un résumé des résultats principaux obtenus accompagné de points de discussion. Le lecteur est invité à consulter les sections 1.5 et 1.6 de l'article en seconde partie de ce mémoire pour les résultats détaillés.

4.1 Climatologie mensuelle des précipitations

Les variations des régimes de précipitations sur l'Amérique du Nord sont étudiées pour chaque mois à l'aide de l'ensemble de données CRU. Tout d'abord, la représentation de ces variations par les ensembles de données ST4 et AGO est validée avant d'utiliser ces derniers pour répondre aux objectifs principaux du projet. Ensuite, les variations interannuelles des précipitations mensuelles sont évaluées pour s'assurer que la période sélectionnée pour la suite du projet est représentative du XX^e siècle. L'objectif n'est pas de faire une analyse exhaustive de la climatologie mensuelle des précipitations, mais plutôt de confronter les ensembles de données du projet à des observations mensuelles pour en évaluer la qualité.

4.1.1 Variabilité spatiale

Les précipitations moyennes de janvier et juillet selon CRU sont illustrées aux figures 4.1 et 4.2 (colonne de gauche) respectivement pour les périodes 2002-2011 (États-Unis) et 1961-1990 (Amé-

rique du Nord). Les mois de janvier et de juillet sont considérés représentatifs des saisons hivernale et estivale. En janvier, la côte ouest reçoit la quantité la plus élevée de précipitations alors que la partie centrale du continent est plus aride et que l'est reçoit une quantité moyenne de précipitations. Le comportement est plutôt différent en juillet avec l'est du continent qui reçoit la majorité des précipitations, particulièrement le sud-est. Durant ce mois, la côte ouest est plus aride tandis que le centre et le nord-ouest reçoivent des précipitations moyennes. Les régimes pluviométriques du continent peuvent s'expliquer en grande partie par les flux de vapeur d'eau influencés par les vents et la topographie. Les vents d'ouest soufflent sur la majeure partie du continent à l'année, mais laissent place aux vents polaires de l'est l'hiver sur les régions de hautes latitudes (Barry & Chorley, 2010). Par contre, les chaînes de montagnes situées à l'ouest agissent comme une barrière pour l'humidité provenant de l'océan Pacifique. Les régions côtières de l'ouest se caractérisent alors principalement par des précipitations de type orographique et peu de vapeur d'eau provenant du Pacifique se déplace vers le reste du continent. Le sud-est du continent est fortement influencé par les vents d'est soufflant aux latitudes plus basses, et ce, de façon plus marquée durant la saison estivale (Barry & Chorley, 2010). La majeure partie de la vapeur d'eau provient alors de l'océan Atlantique et entre sur le continent nord-américain à partir du sud-est en remontant le centre et la côte est à cause de la transition des vents. Finalement, les vents polaires apportent très peu d'humidité sur le continent à cause des températures très froides de l'Arctique limitant l'évaporation et favorisant la condensation directement au-dessus de l'océan.

La distribution spatiale et l'amplitude des précipitations mensuelles sont relativement bien représentées par ST4 pour l'est des États-Unis lorsque comparées à CRU sur la période 2002-2011 (figure 4.1). Cependant, les différences observées pour les autres régions semblent liées à des sources d'erreur diverses. Tout d'abord, une sous-estimation importante par ST4 de la quantité de précipitations est visible en janvier sur la côte ouest. Cette sous-estimation serait causée par le blocage des ondes radar par les montagnes (Westrick *et al.*, 1999), qui sont typiques du relief de la côte avec les nombreuses vallées. Une sous-estimation devrait également se produire en juillet, mais la couverture des données ST4 est incomplète pour ce mois sur la côte ouest. Ensuite, le centre et l'ouest des États-Unis montrent des différences importantes pour ST4 (janvier : surestimation au centre, sous-estimation à l'ouest; juillet : surestimation à l'ouest). Dans ce cas, un effet d'interpolation spatiale semble présent dans les séries de données CRU, puisque les champs de valeurs CRU apparaissent lisses comparativement aux champs ST4 (les champs ST4 ne sont pas illustrés ici).

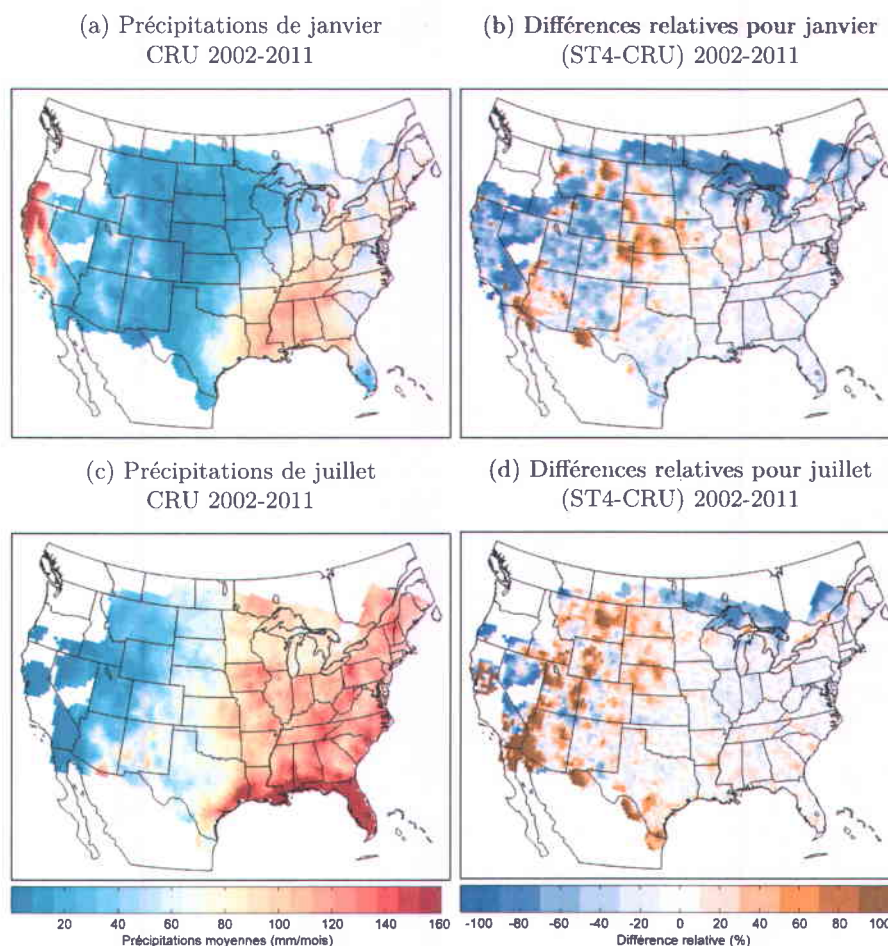


Figure 4.1 – Cartes des précipitations moyennes de janvier et juillet selon CRU (a et c) et des différences relatives entre CRU et ST4 pour la période 2002-2011 (b et d). Seules les tuiles ayant une couverture temporelle supérieure à 80 % sont affichées.

Cet effet d'interpolation pourrait masquer les variations réelles des précipitations sur le centre et l'ouest des États-Unis et expliquerait en partie les différences observées. Finalement, des différences notables sont aussi présentes pour janvier et juillet à la frontière entre les États-Unis et le Canada. Pour construire l'ensemble de données ST4, les observations radar sont combinées avec des données de pluviomètres des États-Unis, alors l'ajustement des données radar pourrait être moins fiable du côté canadien de la frontière, puisqu'il ne s'appuie pas sur des données de pluviomètres locaux. En somme, l'accord entre les valeurs mensuelles de CRU et de ST4 semble meilleur pour les régions à l'est des États-Unis que pour les régions montagneuses à l'ouest. La répartition des différences est similaire pour les autres mois. Considérant ces résultats, pour la suite du projet, les données ST4 seront comparées seulement sur les régions climatiques couvrant le centre et l'est des États-Unis.

Les précipitations moyennes mensuelles de CRU sont également comparées aux précipitations simulées par AGO pour la période 1961-1990 (figure 4.2). En janvier, AGO surestime de façon importante la quantité de précipitations sur les montagnes de l'ouest et du nord du continent en plus de sous-estimer légèrement les précipitations sur l'est. Cependant, la différence observée en régions montagneuses pourrait s'expliquer en partie par la faible densité de pluviomètres servant à construire l'ensemble de données CRU ou bien par une sous-captation de la neige. Les différences sont moins importantes en juillet avec une légère sous-estimation des précipitations par AGO sur le centre des États-Unis et une surestimation sur la côte est ainsi qu'en régions montagneuses à l'ouest et au nord. AGO semble considérer une meilleure représentation de la topographie par rapport à CRU, ce qui pourrait expliquer en partie le fait que les précipitations mensuelles simulées calquent mieux les dénivellations du terrain. Ce comportement est attendu puisque la quantité de

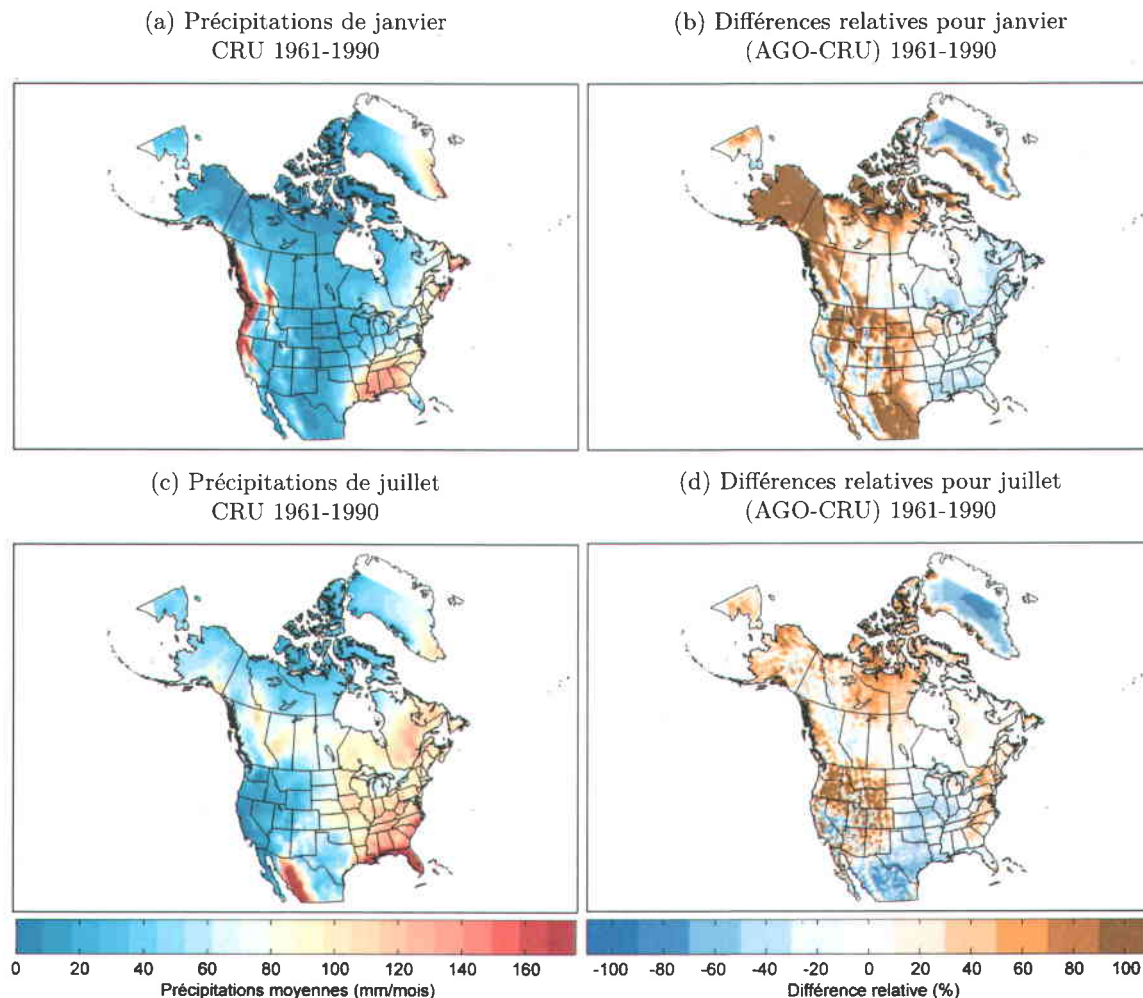


Figure 4.2 – Cartes des précipitations moyennes de janvier et juillet selon CRU (a et c) et des différences relatives entre CRU et AGO pour la période 1961-1990 (b et d). Seules les tuiles ayant une couverture temporelle supérieure à 80 % sont affichées.

précipitations reçue en altitude est généralement plus grande qu'au niveau de la mer. À noter, les différences mensuelles entre CRU et AGO s'expliquent en partie par des erreurs d'estimation dans CRU, mais aussi vraisemblablement par des biais dans le modèle climatique pour AGO. Jiao & Caya (2006) ont exécuté le même type de comparaison sur les précipitations mensuelles entre les données CRU et des simulations issues de deux versions distinctes (version originale et version modifiée) du MRCC de troisième génération piloté par une réanalyse. Parmi les résultats obtenus, la version originale du MRCC surestimait systématiquement les précipitations estivales, mais avec la version modifiée du MRCC, les précipitations étaient mieux représentées. La version modifiée du MRCC dans le cadre de ces travaux a servi au développement du MRCC de quatrième génération utilisé dans le projet actuel. Les différences observées ici pour les précipitations mensuelles sont équivalents à celles de Jiao & Caya (2006) lorsque la version modifiée du MRCC est considérée.

Les résultats suggèrent que les ensembles de données ST4 et AGO représentent de façon acceptable, sur l'est du continent, les précipitations mensuelles observées aux stations météorologiques (CRU) pour chacune des périodes considérées. Par contre, l'accord avec CRU semble moins bon dans le cas des précipitations en régions montagneuses sur l'ouest du continent. À noter, aucun ensemble de données ne peut représenter exactement la réalité, les différences observées pouvant être dues autant aux incertitudes associées aux données ST4 et AGO qu'aux données CRU.

4.1.2 Variabilité interannuelle

La variabilité interannuelle est explorée à travers les cycles annuels de précipitations moyennes mensuelles de CRU sur les 16 régions climatiques de la zone d'étude pour les années 1901 à 2010. L'examen des différences est fait visuellement pour repérer les écarts majeurs entre les périodes étudiées.

Tout d'abord, il faut s'assurer que les périodes de 30 ans de données (p. ex. 1961-1990), utilisées dans la majorité des comparaisons du projet, ne présentent pas de différences majeures par rapport aux autres périodes de 30 ans du siècle. Notamment, l'utilisation de périodes de 30 ans ne permet pas de rendre compte de possibles oscillations décennales ou pluriannuelles (p. ex. oscillation décennale du Pacifique, oscillation nord-atlantique, oscillation arctique). La comparaison des précipitations mensuelles entre différentes périodes du XX^e siècle vise principalement à conforter le choix de la période 1961-1990 pour évaluer la performance du modèle climatique (voir la section 4.2). La figure

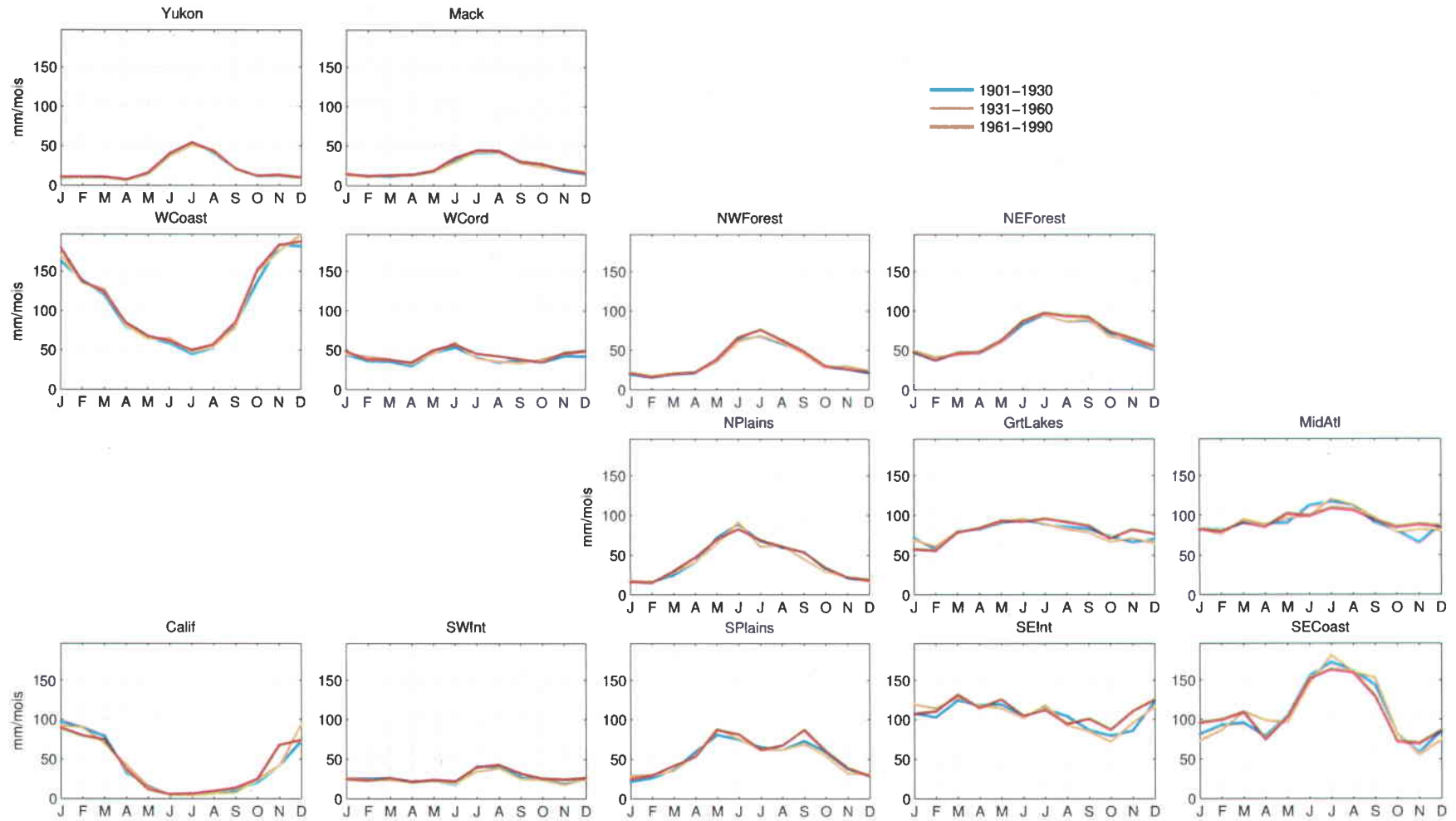


Figure 4.3 – Cycles annuels des précipitations moyennes mensuelles selon CRU pour trois périodes de 30 ans (1901-1930, 1931-1960, 1961-1990). Seules les 14 régions climatiques ayant une couverture temporelle et spatiale supérieure à 80 % sont illustrées.

4.3 illustre les différences entre trois périodes de 30 ans (1901-1930, 1931-1960, 1961-1990) couvrant le XX^e siècle. Chaque graphique est disposé selon la position géographique approximative de la région climatique qui lui est associée. Un examen visuel des graphiques montre qu'aucune différence majeure ne permet de distinguer ces trois périodes sauf pour les régions du sud-est des États-Unis où des différences plus importantes sont observées. Les quelques différences observées sont inférieures à 20 mm/mois, ce qui correspond dans la plupart des cas à une différence relative de moins de 25 %. Les oscillations décennales ou pluriannuelles ne sont pas perceptibles à l'oeil à l'échelle des moyennes sur 30 ans. Ainsi, les moyennes mensuelles de précipitations pour le XX^e siècle semblent similaires lorsque des périodes distinctes de 30 ans sont considérées, ce qui supporte l'hypothèse que la période 1961-1990 est représentative des autres périodes du siècle.

Ensuite, puisque l'ensemble de données ST4 couvre seulement une période de 10 ans, il est important de valider si cette décennie peut être considérée représentative des autres décennies de la fin du XX^e siècle. Plus particulièrement, l'analyse porte sur cinq périodes de 10 ans allant de 1961 à 2011 et inclut les périodes 1992-2001 et 2002-2011 qui seront utilisées pour comparer ST4 et AGO (voir la section 4.2.1). La figure 4.4 illustre les résultats pour six régions climatiques correspondant aux régions utilisées pour la comparaison entre ST4 et AGO. Des variations sont observées au cours de l'année principalement sur l'est des États-Unis (GrtLakes, MidAtl, SEInt, SECoast). Néanmoins, les écarts entre les périodes 1992-2001 et 2002-2011 semblent demeurer dans l'enveloppe de variations des cycles annuels des décennies analysées en termes de précipitations mensuelles. De plus, les résultats suggèrent que la forme des cycles annuels est préservée d'une décennie à l'autre. Par

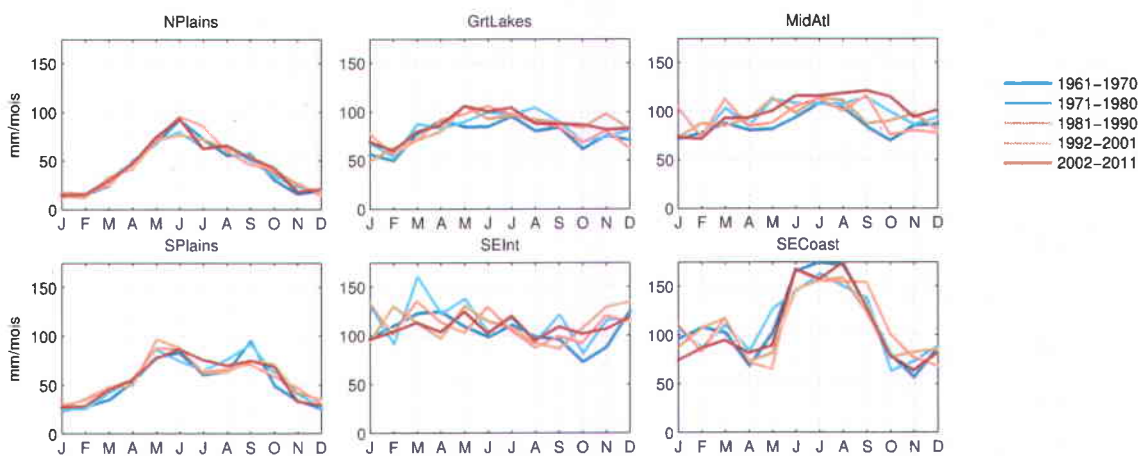


Figure 4.4 – Cycles annuels des précipitations moyennes mensuelles de CRU pour cinq périodes de 10 ans (1961-1970, 1971-1980, 1981-1990, 1992-2001, 2002-2011). Les six régions climatiques illustrées ont une couverture temporelle et spatiale supérieure à 80 %.

conséquent, les ensembles de données ST4 et AGO seront comparés malgré les différences observées entre les périodes 1992-2001 et 2002-2011, mais l'interprétation des résultats devra tenir compte de la présence d'une certaine variabilité des moyennes mensuelles pour les décennies concernées. En effet, si les différences entre ST4 et AGO concernant les structures de précipitations sont faibles, elles pourraient être attribuables à la variabilité entre les périodes respectives de dix ans.

4.2 Performance du modèle climatique

La performance du MRCC est évaluée selon deux perspectives : (1) la physique et la dynamique internes du modèle; (2) le pilote fournissant les conditions aux frontières du domaine. Dans le premier cas, le MRCC piloté par la réanalyse ERA40 (AGO) est comparé aux données observées ST4 en supposant que ces dernières sont une représentation plus exacte des conditions réelles. Dans le deuxième cas, le MRCC piloté par le MCGC (AET; AEV) est comparé au MRCC piloté par ERA40 (AGO).

4.2.1 Effet de la physique et de la dynamique internes

La figure 4.5 résume les différences issues de la comparaison entre AGO et ST4 pour quelques caractéristiques d'intérêt (superficie, volume de précipitations, intensités maximale et moyenne, nombre de structures). Chaque colonne est associée à une caractéristique et chaque ligne à une région climatique. Chaque cellule du tableau est subdivisée en 12 cases correspondant aux 12 mois de l'année. Ainsi, pour chaque mois, la couleur indique la différence relative entre les deux ensembles de données. Les différences peuvent être assimilées à des biais propres au MRCC, puisque son pilote, la réanalyse ERA40, est considéré représentatif du climat historique (ERA40 intègre des observations passées).

En résumé, les résultats obtenus montrent que le MRCC génère des structures de précipitations trop homogènes par rapport aux observations, ce qui s'observe principalement par la différence dans la distribution des précipitations au sein des structures (sous-estimation du paramètre β et surestimation du paramètre α ; figure 1.3 de l'article en seconde partie). La sous-estimation de l'intensité maximale par AGO corrobore ce résultat (figure 4.5). Les structures de précipitations simulées montrent donc une probabilité d'occurrence plus faible des valeurs extrêmes que les données ob-

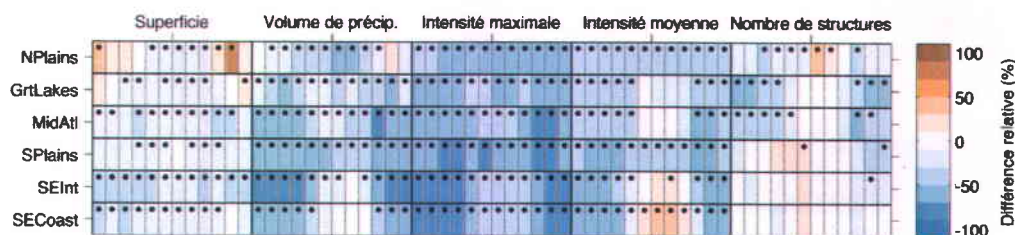


Figure 4.5 – Résumé des différences relatives entre ST4 et AGO des moyennes des séries de médianes annuelles pour cinq caractéristiques des structures de précipitations (superficie, volume de précipitations, intensités maximale et moyenne, nombre de structures) entre les périodes 2002-2011 et 1992-2001. Les points noirs indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).

servées. Les caractéristiques sont similaires pour les six régions climatiques étudiées couvrant le centre et l'est des États-Unis. On note également une légèrement sous-estimation par le MRCC de la superficie des structures et de l'intensité moyenne pour la majorité des régions climatiques. Finalement, le nombre de structures de précipitations est relativement bien reproduit pour la plupart des régions. Il faut noter que, malgré l'ampleur des différences et leur caractère significatif, la forme des cycles annuels des caractéristiques est relativement bien représentée par le MRCC (figures 1.4, 1.5, 1.6 et 1.7 de l'article en seconde partie). Plus spécifiquement, les cycles annuels affichent des coefficients de corrélation supérieurs à 0.9 pour la majorité des caractéristiques et des régions climatiques. Des résultats complémentaires sous forme de cartes sont présentés à l'annexe A pour quatre caractéristiques (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) et quatre mois de l'année représentatifs des quatre saisons (janvier, avril, juillet et octobre).

Les différences entre les caractéristiques observées (estimées par ST4) et simulées (MRCC piloté par ERA40) sont importantes. Les différences relatives atteignent dans certains cas ± 100 %. Il y a donc lieu de se demander dans quelle mesure les différences sont attribuables à la physique et à la dynamique internes du modèle. Tout d'abord, la résolution spatiale native des données ST4 (4 km x 4 km) est beaucoup plus fine que celle des simulations du MRCC (45 km x 45 km). La différence de résolution spatiale des champs originaux de précipitations pourrait avoir un impact même après la projection des données ST4 sur la grille du MRCC. La résolution spatiale du MRCC ne permet pas de simuler la dimension caractéristique de certaines cellules convectives, qui peuvent être plus petites qu'une tuile. Par contre, des cellules convectives de ce type sont présentes dans la résolution native de ST4 et contiennent des précipitations intenses. Durant le processus de projection des données, ces valeurs intenses sont moyennées avec les valeurs voisines pour obtenir une seule valeur de précipitations pour une tuile de 45 km x 45 km. Les valeurs intenses peuvent alors influencer la

moyenne à la hausse pour ST4. Ensuite, on considère que les données ST4 et la réanalyse ERA40 sont des représentations équivalentes des précipitations historiques. Cependant, aucun des deux ensembles de données ne peut prétendre représenter la réalité et ils diffèrent très probablement l'un de l'autre. Les deux ensembles n'ont pas été comparés directement dans le cadre de ce projet. De plus, ST4 et ERA40 considèrent des données observées provenant de différentes sources, alors elles héritent des incertitudes propres aux instruments de mesure utilisés (radar, pluviomètres) et aux modèles d'ajustement (ST4) et d'interpolation (ERA40) des données. Finalement, les précipitations mensuelles montrent certaines différences entre les deux décennies comparées (ST4 : 2002-2011; AGO : 1992-2001; section 4.1.2). Au final, les différences entre ST4 et AGO n'en demeurent pas moins importantes, mais il reste difficile d'établir la part de ces différences attribuables à la physique et à la dynamique internes du MRCC.

4.2.2 Effet du pilote aux frontières du modèle

Les différences entre les simulations AGO et AET/AEV sont résumées à la figure 4.6 pour cinq caractéristiques d'intérêt (superficie, volume de précipitations, intensités maximale et moyenne, nombre de structures). Comme les simulations proviennent du même MRC, les différences observées sont associées à la nature des données fournies comme conditions aux frontières, la réanalyse ERA40 étant considérée moins incertaine (puisque construite en partie avec des valeurs observées) que les données du MCGC.

En bref, le type de pilote semble affecter plus particulièrement le centre et l'est du continent surtout durant les mois d'été. Le fait de piloter le MRCC avec le MCGC génère un volume et des intensités plus faibles de précipitations, en plus de superficies légèrement plus grandes. La Californie semble également touchée par un changement de pilote mais plus particulièrement durant les mois d'hiver, saison où AET/AEV montre un volume et des intensités plus élevés. Des résultats complémentaires sous forme de cartes sont présentés à l'annexe A pour quatre caractéristiques (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) et quatre mois de l'année représentatifs des quatre saisons (janvier, avril, juillet et octobre).

Les résultats montrent que le choix du pilote (réanalyse versus modèle global) a une influence sur la représentation des structures de précipitations par le MRCC, mais que cette influence, généralement dans l'intervalle -50 % à 50 %, demeure plus petite que la différence entre les valeurs simulées

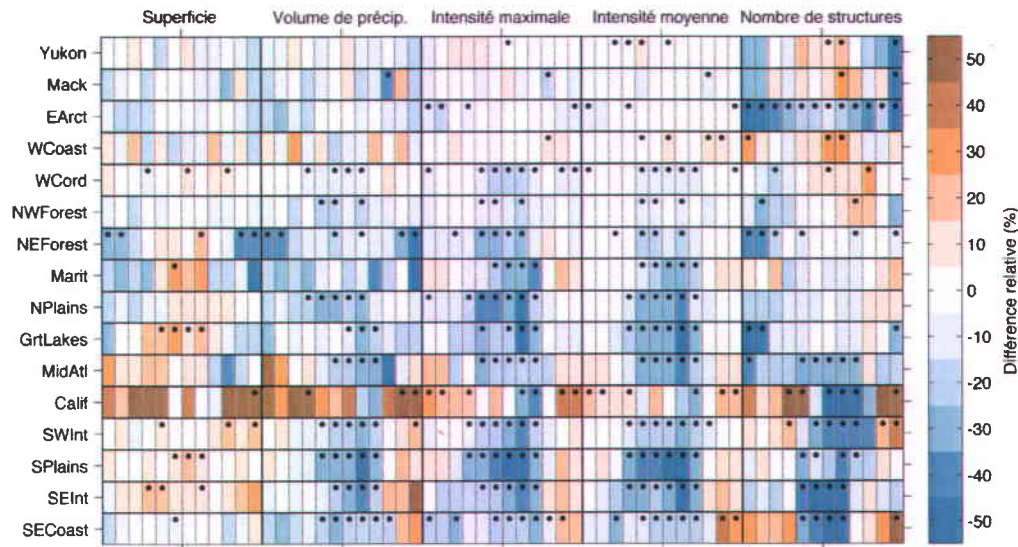


Figure 4.6 – Résumé des différences relatives entre AGO et AET/AEV des moyennes des séries de médianes annuelles pour cinq caractéristiques des structures de précipitations (superficie, volume de précipitations, intensités maximale et moyenne, nombre de structures) pour la période 1961-1990. Les différences indiquées correspondent à la moyenne des différences AET-AGO et AEV-AGO. Les points noirs indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).

et observées (voir la section 4.2.1). Les structures de précipitations simulées par le MRCC piloté par le MCGC sont plus homogènes (probabilité d'occurrence plus faible des valeurs extrêmes) et sont associées à des superficies légèrement plus grandes, des volumes de précipitations plus faibles et des intensités (moyennes et maximales) plus faibles que les structures simulées par le MRCC piloté par la réanalyse. Ces différences s'observent principalement sur les régions du centre, du sud et de l'est durant la saison estivale. À l'opposé, les régions nordiques et de l'ouest montrent des différences moins significatives, alors elles sont moins influencées par le choix du pilote. Les conditions aux frontières fournies par le pilote servent entre autres à injecter dans le MRCC les systèmes météorologiques provenant des océans qui entourent l'Amérique du Nord. La différence entre le MCGC et la réanalyse ERA40 s'observe principalement durant la période estivale pour les systèmes provenant de l'Atlantique, systèmes qui influencent le centre et l'est du continent. Cette période de l'année est généralement caractérisée par des processus convectifs, processus paramétrisés par le MRCC. Cependant, les différences entre les pilotes sont plus marquées durant cette saison, ce qui suggère que le MCGC offre une moins bonne représentation des systèmes estivaux. Il faut tout de même garder en tête que, même si la réanalyse ERA40 est considérée plus près de la réalité que le MCGC, elle peut contenir des biais. De plus, le fait que les différences soient plus importantes l'été pourrait s'expliquer par la grande variabilité spatio-temporelle des systèmes convectifs qui caractérisent cette

saison (durée de vie plus courte, dimension plus petite, nombre plus élevé). Ainsi, la probabilité d'obtenir des structures de précipitations différentes entre AGO et AET/AEV est plus grande. À l'opposé, l'hiver, le déplacement des systèmes est plus lent, donc l'information provenant des pilotes est intégrée sur un nombre plus grand de pas de temps, ce qui pourrait atténuer de possibles différences.

4.3 Projections en climat futur

4.3.1 Effet de la variabilité interne

Les simulations AET et AEV affichent un comportement très similaire en termes de caractéristiques des structures de précipitations pour les deux périodes étudiées (1961-1990 et 2071-2100; figure 4.7). Autant en climat historique qu'en climat futur, les différences entre les simulations sont faibles et peu de différences sont considérées statistiquement significatives. Ces résultats suggèrent que les changements projetés pourront être considérés robustes pour l'ensemble des caractéristiques, des régions climatiques et des mois.

Les différences illustrées à la figure 4.7 sont normalisées pour fournir un résumé statistique non influencé par les différences d'échelle des valeurs de chaque caractéristique. La différence moyenne normalisée (*Standardized mean difference*, SMD) est une mesure de taille d'effet qui illustre la magnitude d'un phénomène (Cohen, 1988). Dans la présente étude, l'effet correspond à la différence entre les séries de médianes des distributions annuelles issues de chaque simulation. Le SMD, aussi nommée d de Cohen, se calcule par la différence entre les moyennes de deux séries divisée par l'écart-type groupé (Cohen, 1988; Hartung *et al.*, 2008) :

$$\text{SMD} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p} \quad \text{où } s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (4.1)$$

$\bar{x}_i$ est la moyenne de la série de médianes annuelles pour l'ensemble de données i , s_p est l'écart-type groupé, s_i est l'estimation non biaisée de l'écart-type de la série de médianes annuelles pour l'ensemble de données i et n_i est le nombre d'éléments dans la série pour l'ensemble de données i . À titre indicatif, un SMD inférieur à 0.2 indique un effet faible, un SMD égal à 0.5 indique un effet moyen et un SMD supérieur à 0.8 indique un effet fort (Cohen, 1988).

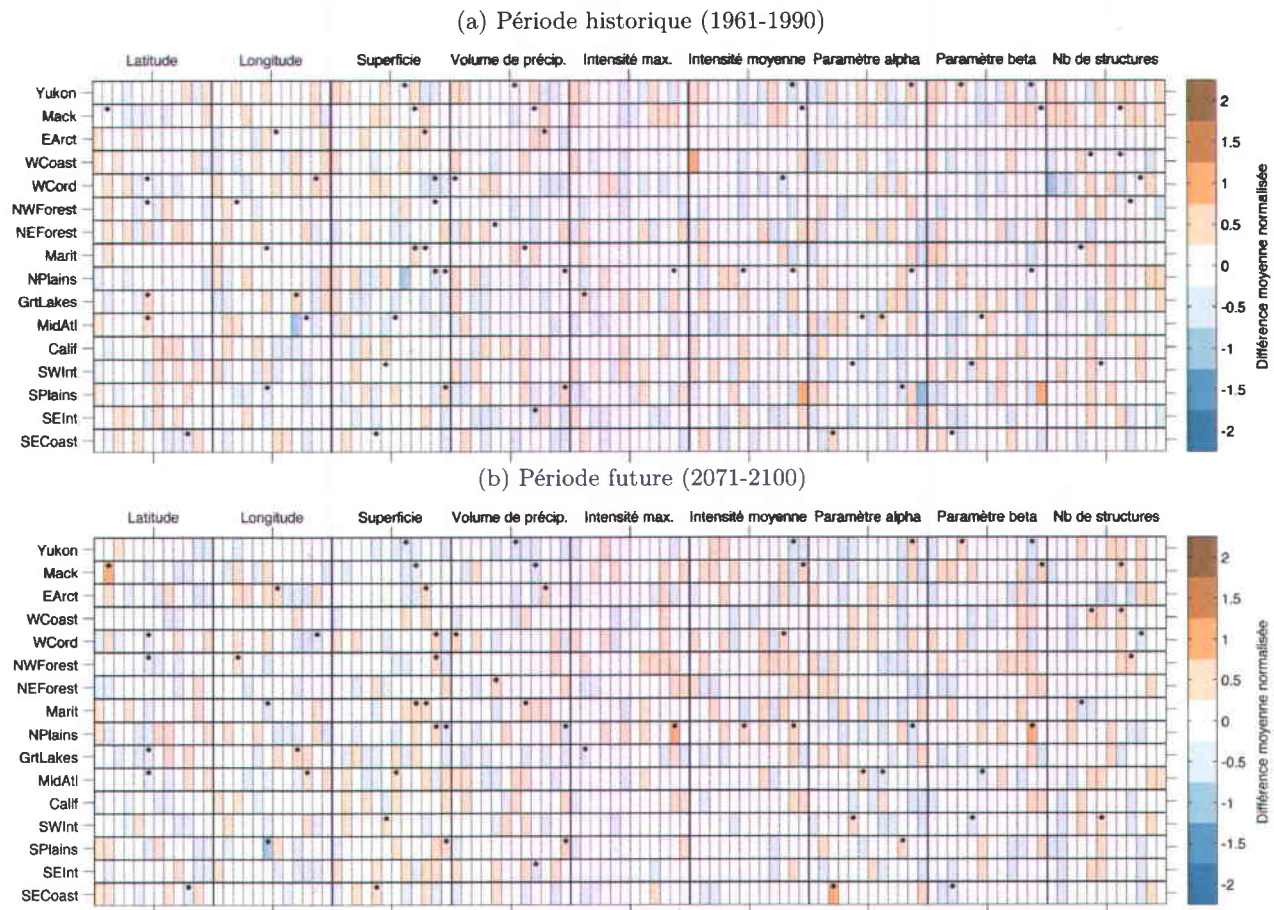


Figure 4.7 – Résumé des différences moyennes normalisées (SMD) entre les simulations AET et AEV des séries de médianes annuelles pour les caractéristiques des structures de précipitations sur (a) la période historique (1961-1990) et (b) la période future (2071-2100). Les points noirs indiquent une différence statistiquement significative entre AET et AEV (selon le test de Welch avec un niveau de confiance de 95 %).

4.3.2 Changements projetés

La figure 4.8 résume les changements projetés les plus significatifs pour cinq caractéristiques (superficie, volume de précipitations, intensités maximale et moyennée, nombre de structures) à l'horizon 2071-2100 par rapport à la période de référence 1961-1990. Les changements en climat futur (période 2071-2100) sont établis en estimant l'écart relatif par rapport à la période 1961-1990. Une telle approche permet de minimiser l'impact des biais (p. ex. biais liés à la performance du modèle identifiés à la section 4.2) dans l'hypothèse où les biais en climat futur sont similaires aux biais en climat historique.

Un ratio *signal sur variabilité* (SVR) a été développé pour évaluer la robustesse du changement par rapport à la variabilité interne du climat, telle qu'estimée avec les deux simulations considérées

dans le projet (AET; AEV; équation 3.1). Un SVR supérieur à un ($SVR > 1$) indique que le changement projeté est plus grand que la différence entre les simulations, et donc que ce changement est robuste. Dans la figure 4.8, un SVR supérieur à un est indiqué par la présence d'une croix pour les changements concernés.

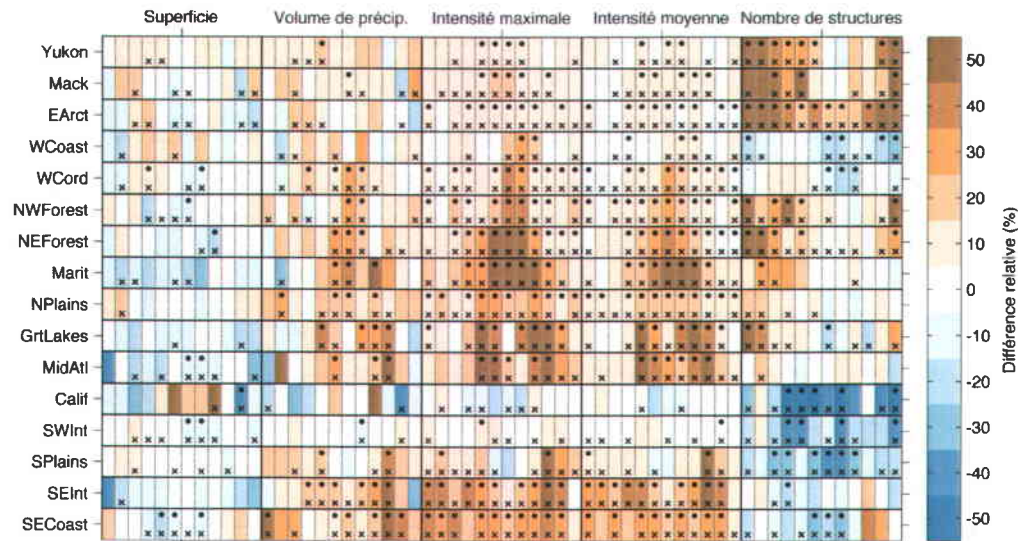


Figure 4.8 – Résumé des changements relatifs projetés selon AET et AEV des moyennes des séries de médianes annuelles pour cinq caractéristiques des structures de précipitations (superficie, volume de précipitations, intensités maximale et moyenne, nombre de structures) entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100. Les changements indiqués correspondent à la moyenne des changements selon AET et AEV. Les points noirs indiquent un changement statistiquement significatif pour AET et AEV selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %). Les croix indiquent un SVR supérieur à un.

En climat futur, les structures spatiales laissent un plus grand volume de précipitations sur le territoire avec des intensités plus élevées, principalement durant la période estivale pour l'est du continent et durant l'année entière pour le sud-est. Les structures de précipitations sont également plus hétérogènes (augmentation de la valeur du paramètre β et diminution de la valeur du paramètre α ; figure 1.14 de l'article en seconde partie). Elles démontrent une plus grande variabilité et une plus grande probabilité d'occurrence des valeurs extrêmes. Cependant, la superficie des structures demeure sensiblement inchangée. Le nombre de structures varie également à la hausse au nord du continent et à la baisse au sud. En bref, les caractéristiques d'intensité et le nombre de structures montrent les plus grands changements. À noter, selon les résultats, la région de la côte ouest (WCoast) semblent moins affectée par les changements climatiques et les régions du sud-ouest (Calif, SWInt, SPlains) montrent principalement des changements dans le nombre de structures. Les cycles annuels demeurent similaires pour l'ensemble des régions en climat futur, mais sont étirés

vers le haut durant les mois estivaux, ce qui indique des valeurs plus élevées pour les intensités maximale et moyenne en été (figure 1.16 de l'article en seconde partie).

Pour bien saisir les changements projetés, quatre cartes par saison, représentée par son mois central (janvier à la figure 4.9, avril à la figure 4.10, juillet à la figure 4.11 et octobre à la figure 4.12), sont présentées pour résumer le comportement des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie). En janvier (figure 4.9), le nombre de structures montre un changement majeur. L'augmentation importante du nombre de structures sur la moitié nord du continent liée à l'absence de changement pour le volume de précipitations et la superficie implique une augmentation dans la quantité de précipitations pour

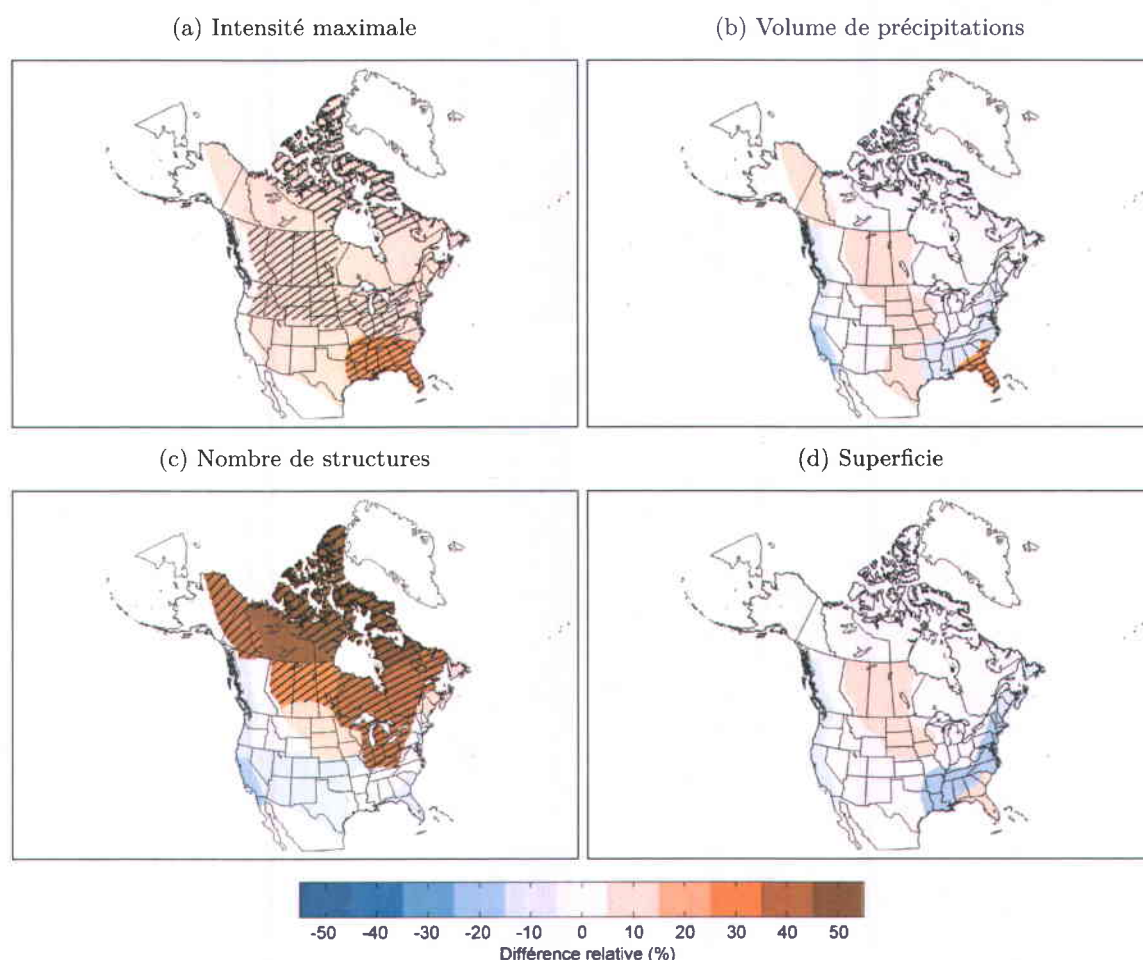


Figure 4.9 – Changements relatifs projetés selon AET et AEV dans les caractéristiques des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois de janvier entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100. Les changements indiqués correspondent à la moyenne des changements selon AET et AEV. Les zones hachurées indiquent un changement statistiquement significatif pour AET et AEV selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %) et un SVR supérieur à un.

ces régions en climat futur. L'intensité maximale augmente également sur les régions du sud-est (SEInt, SECoast) et le volume de précipitations augmente sur la côte sud-est seulement (SECoast).

Durant le mois d'avril (figure 4.10), le nombre de structures varie de façon opposée entre le nord et le sud du continent (augmentation au nord, diminution au sud). L'augmentation au nord est moins prononcée que pour les mois d'hiver et concerne moins de régions (EArct, Yukon, NWForest). Ce changement dans le nombre de structures implique une augmentation de la quantité de précipitations sur ces régions puisque la superficie et le volume demeurent inchangés. À l'inverse, les régions du sud (Calif, SWInt, SPlains) voient une diminution dans la quantité de précipitations reçues puisque la superficie des structures et le volume de précipitations sont inchangés.

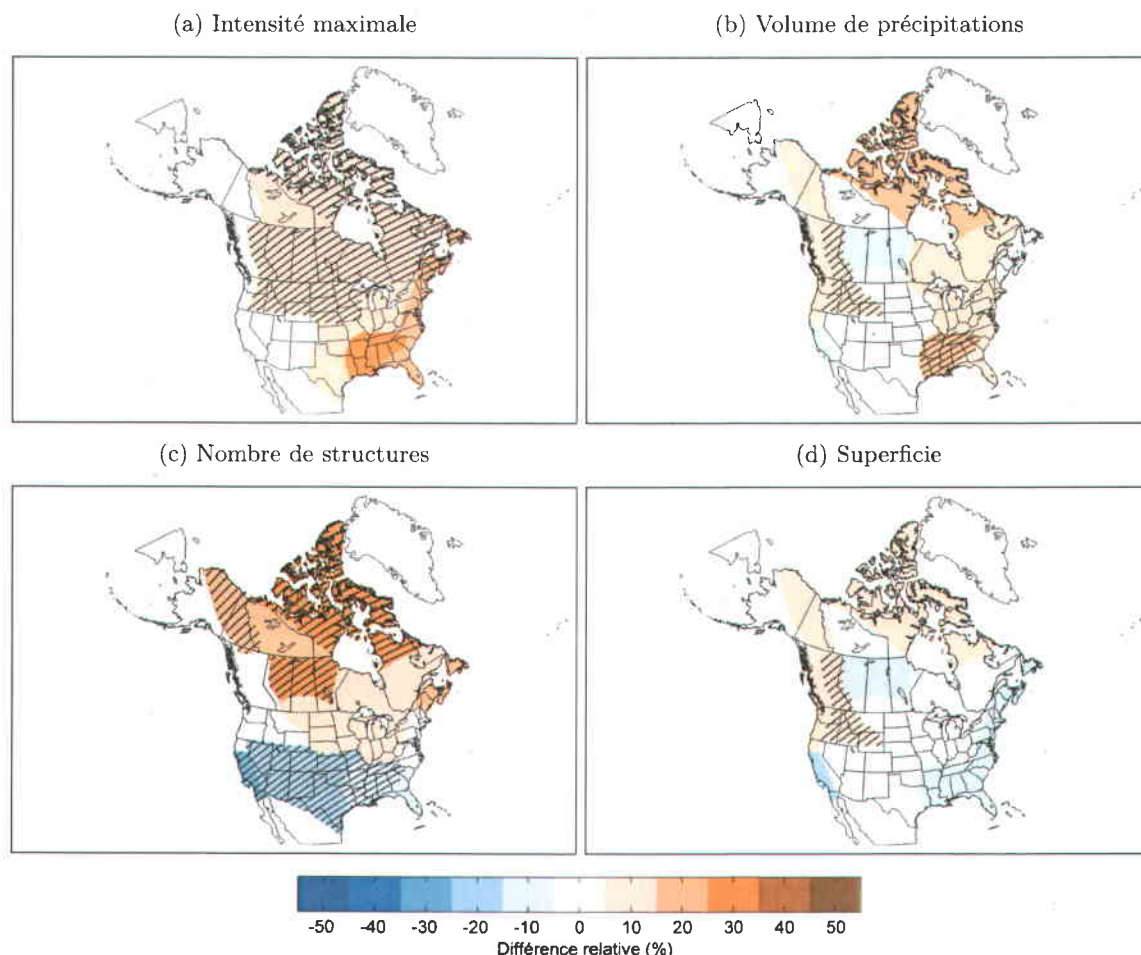


Figure 4.10 – Changements relatifs projetés selon AET et AEV dans les caractéristiques des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois d'avril entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100. Les changements indiqués correspondent à la moyenne des changements selon AET et AEV. Les zones hachurées indiquent un changement statistiquement significatif pour AET et AEV selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %) et un SVR supérieur à un.

En juillet (figure 4.11), l'augmentation de l'intensité maximale montre un gradient d'ouest en est sur les régions du sud du Canada (augmentation significative pour WCord, NWForest, NEForest, Marit). Ce changement est combiné à une augmentation du volume de précipitations et de l'hétérogénéité de la distribution des précipitations au sein des structures (augmentation de la valeur du paramètre β et diminution de la valeur du paramètre α) pour ces mêmes régions. Ces changements indiquent des précipitations plus intenses pour ces régions en climat futur avec une présence accrue de valeurs extrêmes.

En octobre (figure 4.12), les changements concernent principalement l'intensité maximale et le volume de précipitations. Les résultats montrent des augmentations importantes sur les régions

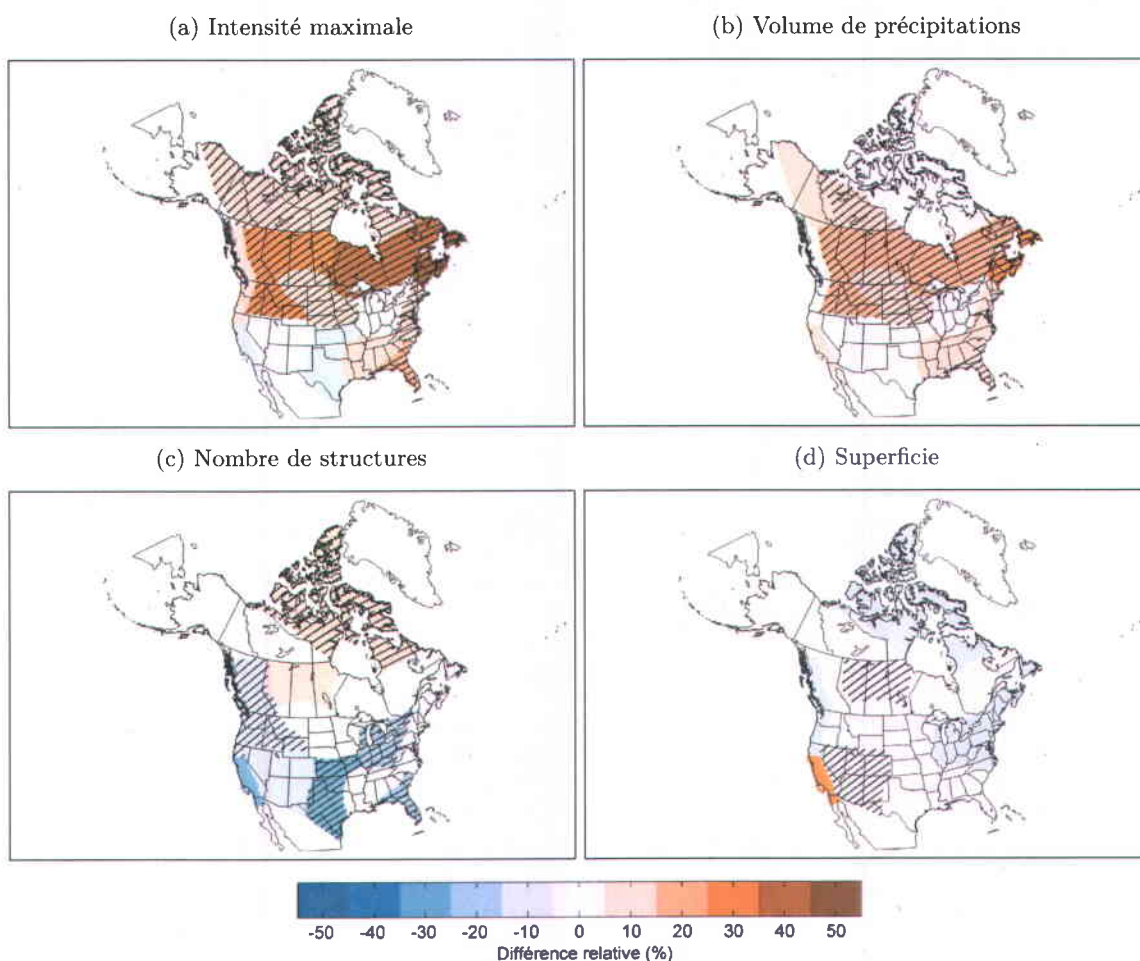


Figure 4.11 – Changements relatifs projetés selon AET et AEV dans les caractéristiques des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois de juillet entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100. Les changements indiqués correspondent à la moyenne des changements selon AET et AEV. Les zones hachurées indiquent un changement statistiquement significatif pour AET et AEV selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %) et un SVR supérieur à un.

du sud-est (GrtLakes, MidAtl, SEInt, SECoast). Les précipitations seraient plus intenses sur ces régions en climat futur et les structures laisseraient une quantité plus grande de précipitations puisque leur superficie demeure inchangée. La région arctique (EArct) voit aussi une augmentation dans le nombre de structures de précipitations, augmentation également projetée pour les mois d'hiver et de printemps.

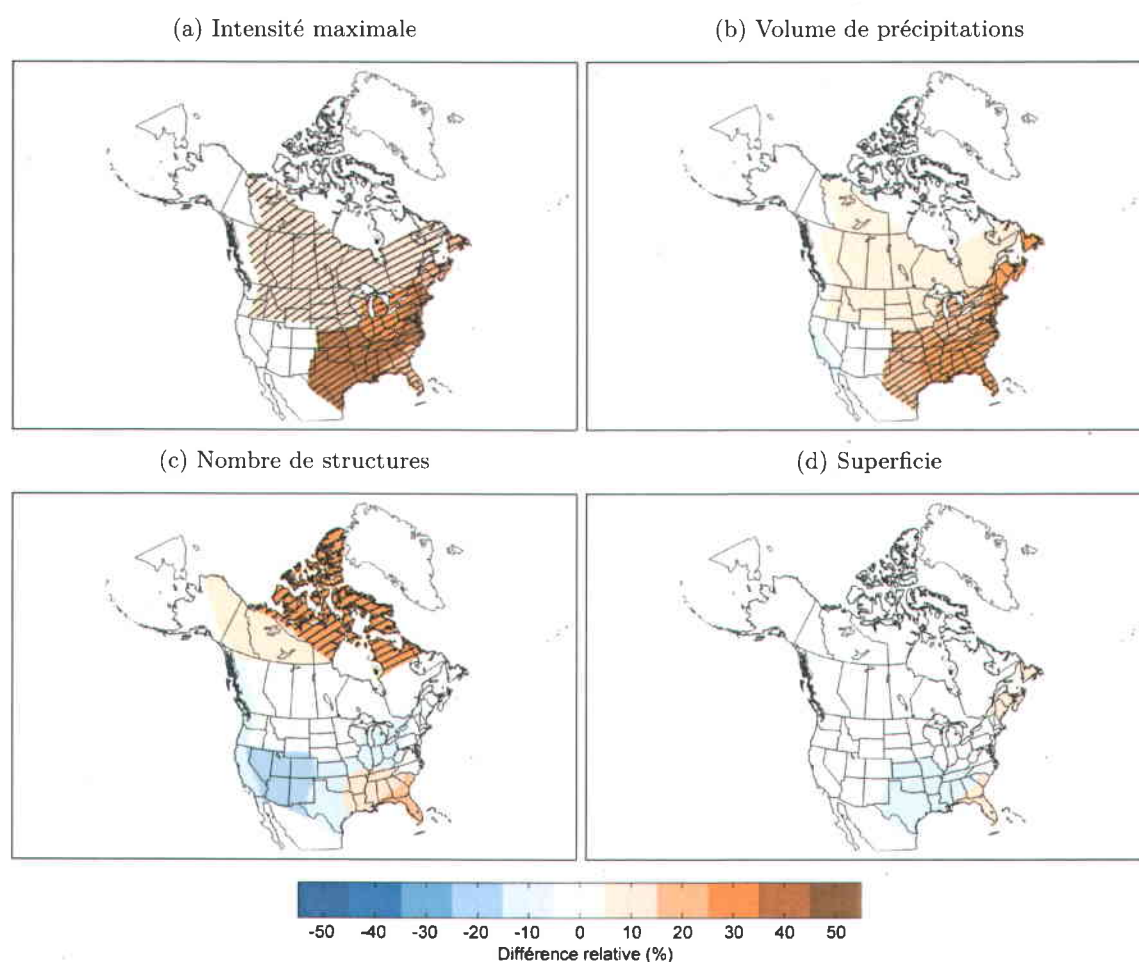


Figure 4.12 – Changements relatifs projetés selon AET et AEV dans les caractéristiques des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois d'octobre entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100. Les changements indiqués correspondent à la moyenne des changements selon AET et AEV. Les zones hachurées indiquent un changement statistiquement significatif pour AET et AEV selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %) et un SVR supérieur à un.

En résumé, les résultats suggèrent un climat futur caractérisé par :

- des conditions hivernales plus humides au nord (augmentation du nombre de structures et absence de changement dans le volume de précipitations et la superficie);
- des conditions printanières plus arides au sud (diminution du nombre de structures et absence de changement dans le volume de précipitations et la superficie);

- des conditions estivales plus convectives au centre (augmentation de l'hétérogénéité des structures, de l'intensité maximale et moyenne et du volume de précipitations);
- des conditions automnales plus humides au sud-est (augmentation des intensité maximale et moyenne et du volume de précipitations).

À l'instar des résultats de la présente étude, Wehner (2012), avec une analyse des précipitations quotidiennes saisonnières à partir de simulations de NARCCAP, montre également une augmentation des précipitations sur le nord du continent durant l'hiver et une diminution sur le sud-ouest des États-Unis au printemps à l'horizon 2038-2070. De plus, les travaux de Plummer *et al.* (2006), effectués avec la version 3.6 du MRCC sur les régions climatiques du Canada, montrent une augmentation des précipitations mensuelles durant les mois d'hiver (décembre, janvier, février). Cette augmentation correspond aux résultats présentés ici pour janvier montrant une augmentation de la quantité de précipitations liée à l'augmentation du nombre de structures. Les changements observés concernant le nombre de structures de précipitations ne permettent pas de statuer si le nombre de systèmes de précipitations ou leur durée de vie change. Seule une analyse de la dynamique des systèmes de précipitations permettrait de répondre à cette question.

Chapitre 5

Conclusions

Dans le contexte actuel de changements climatiques, la température globale augmente et les régimes de précipitations subissent des modifications. Considérant l'importance économique des précipitations et les conséquences majeures des événements météorologiques extrêmes sur les sociétés, il est primordial de comprendre l'évolution des caractéristiques des précipitations en climat futur. Dans la présente étude, ces caractéristiques ont été analysées pour 16 régions climatiques de l'Amérique du Nord à partir des champs de précipitations horaires de simulations du MRCC. Une approche centrée sur les structures présentes dans les champs de précipitations a été utilisée, ce qui a permis de porter un regard complémentaire à celui des études publiées à ce jour sur le sujet. Le projet visait plus spécifiquement à :

- évaluer la capacité du MRCC à reproduire les structures de précipitations observées et;
- définir les changements projetés en climat futur concernant les structures de précipitations.

Pour étudier les structures de précipitations et répondre aux objectifs fixés, une méthode d'analyse par objets a été adaptée aux besoins du projet. La méthode consiste à identifier et caractériser les structures de précipitations, zones contiguës de précipitations au-dessus d'un certain seuil, et à analyser statistiquement les caractéristiques de ces structures. Les caractéristiques étudiées concernent l'intensité (volume de précipitations, intensités moyenne et maximale, distribution des précipitations à l'intérieur d'une structure) et la géométrie (superficie, longueur des axes principal et secondaire, excentricité, orientation) des structures de précipitations.

Pour évaluer la performance du modèle climatique, une simulation du MRCC piloté par la réanalyse ERA40 a d'abord été comparée à des observations provenant de radars et de pluviomètres (NCEP *Stage IV*) sur deux périodes de 10 ans rapprochées (respectivement 1992-2001 et 2002-2011). Les résultats suggèrent des structures de précipitations trop homogènes pour le MRCC par rapport aux observations pour le centre et l'est des États-Unis. De plus, les volumes, les intensités et les superficies des structures simulées par le MRCC seraient plus faibles. Cependant, le MRCC représente bien les cycles annuels des caractéristiques, malgré une différence dans l'amplitude des cycles. Ensuite, pour analyser l'effet du pilote utilisé aux frontières du modèle, deux simulations du MRCC piloté par le MCGC ont été comparées à la simulation du MRCC piloté par la réanalyse ERA40 sur la période historique 1961-1990. Les structures de précipitations simulées par le MRCC piloté MCGC affichaient des volumes et des intensités plus faibles durant les mois d'été pour les régions du sud-est. Ces structures étaient également plus homogènes et légèrement plus grandes que les structures simulées par le MRCC piloté réanalyse. Malgré tout, le pilote aux frontières du modèle semble avoir globalement peu d'influence sur les caractéristiques des structures simulées par le MRCC.

Pour obtenir les projections en climat futur, la période historique 1961-1990 a été comparée à la période future 2071-2100 pour les deux simulations du MRCC piloté par le MCGC. Les résultats suggèrent principalement des changements dans les caractéristiques d'intensité (volume, intensités maximale et moyenne, distribution des précipitations au sein d'une structure) et le nombre de structures de précipitations. En climat futur, les régions du centre et de l'est se caractérisent par des précipitations estivales plus convectives (volume, intensités et hétérogénéité des structures plus élevés). Les régions du sud-ouest se caractérisent plutôt par des conditions printanières et estivales plus arides (moins de structures) et les régions nordiques par des conditions hivernales et printanières plus humides (plus de structures). Enfin, les régions du sud-est se caractérisent par des conditions automnales plus humides (volume et intensités plus élevés).

L'effet de la variabilité interne du climat sur les projections futures a été estimé à partir des deux simulations du MRCC piloté par des membres distincts du MCGC. Malgré la similarité des résultats entre les deux simulations, les différences présentes témoignent d'une certaine variabilité interne du climat. Le fait de considérer la variabilité interne dans l'analyse des résultats permet de statuer sur la robustesse des changements observés en climat futur. Idéalement, l'analyse pourrait

être reproduite avec un ensemble de simulations du MRCC piloté par différents membres du MCGC pour améliorer l'estimation de la variabilité interne du climat.

Cette étude ne représente que le début d'une exploration dans le domaine de la climatologie avec la méthode d'analyse par objets, mais elle assoit solidement les fondations et ouvre la porte à plusieurs avenues à explorer. Pour une utilisation à l'échelle régionale, le fait de travailler avec des régions climatiques plus petites pourrait s'avérer très utile. Pour plusieurs applications, dont la gestion des barrages, des résultats subdivisés par bassins versants seraient plus appropriés. De plus, avec le développement des MRC, on peut s'attendre à une augmentation de la résolution des simulations climatiques. Une meilleure résolution spatiale permettrait de mieux capter les événements convectifs (les SCM) présents à une échelle spatiale plus fine, et qui sont typiques du climat estival nord-américain (Barry & Chorley, 2010). La comparaison avec des données observées en serait améliorée puisque l'écart de résolution spatiale entre les données simulées et observées serait grandement diminué. Par contre, des incertitudes demeurent lorsqu'on évalue des simulations climatiques. Notamment, la variabilité interne du climat influence grandement les conclusions pouvant être tirées d'une analyse de projections futures. Pour mieux quantifier cet effet et ainsi améliorer la confiance dans les résultats, il serait avantageux de travailler avec un plus grand nombre de simulations climatiques issues d'un seul MRC (ensemble de simulations à modèle unique) ou même de différents MRC (ensemble de simulations multi-modèle) piloté par un seul MCG utilisant diverses conditions initiales. La fourchette des valeurs possibles pour chaque caractéristique pourrait alors être mieux définie. Ensuite, l'utilisation de différentes réanalyses et de différents MCG pour piloter un MRC à ses frontières permettrait d'explorer de façon plus approfondie l'effet d'un changement de pilote aux limites du domaine de ce MRC. Finalement, de nouvelles caractéristiques pourraient être calculées à partir soit des données de précipitations seules ou encore à partir d'une combinaison de variables telles que la température, le vent et l'énergie potentielle de convection disponible (*Convective available potential energy*, CAPE).

Une autre avenue possible pour les analyses subséquentes consisterait à analyser la dynamique des systèmes de précipitations dans leur ensemble, considérant ainsi simultanément les dimensions spatiale et temporelle des précipitations. La méthodologie pourrait être conservée, mais des étapes de traitement supplémentaires devraient être ajoutées suite à l'identification des structures de précipitations pour suivre la trajectoire des objets et ainsi identifier chaque système de précipitations. Ce type d'analyse permettrait aussi de déterminer si les changements observés dans le nombre de

structures de précipitations sont dus à un changement dans le nombre de systèmes de précipitations ou à un changement de la durée de vie moyenne des systèmes.

Ce projet soulève également une question concernant l'application d'un seuil aux valeurs de précipitations : comment sélectionner un seuil horaire approprié pour définir les structures de précipitations? Il est essentiel d'utiliser un seuil avec des précipitations simulées, car les modèles climatiques surestiment la fréquence des précipitations de très faible intensité (Sun *et al.*, 2006). Le choix du seuil utilisé dans le cadre de ce projet est arbitraire (0.2 mm). Cependant, l'analyse complète a été effectuée avec un autre seuil (0.4 mm) et les résultats obtenus permettent d'affirmer que la sélection du seuil ne modifie pas de façon majeure les conclusions. De futurs travaux pourraient aborder spécifiquement le choix d'un seuil horaire approprié pour la définition d'événements de précipitations à partir de simulations climatiques.

En terminant, je considère que ce projet et les avenues à explorer représentent de beaux défis informatiques appliqués aux sciences climatiques. Par exemple, la projection des données sur une grille commune, le traitement d'un grand volume d'information, l'intégration de techniques de traitement d'images à la méthode d'analyse ainsi que la visualisation simultanée d'une quantité importante de résultats ont nécessité une réflexion et une adaptation spécifique aux besoins des sciences du climat. Dans le cadre de travaux futurs, la considération de variables autres que les précipitations augmenterait la quantité de données à traiter et le suivi des trajectoires des systèmes de précipitations demanderait l'intégration de connaissances propres au domaine du traitement vidéo. En somme, il est intéressant de constater comment un domaine peut contribuer à un autre pour faire avancer les connaissances scientifiques.

Deuxième partie

Article

Article 1

Projected changes in characteristics of precipitation spatial structures over North America

Titre traduit

Changements projetés dans les caractéristiques des structures spatiales de précipitations sur l'Amérique du Nord

Auteurs

Karine Guinard¹, Alain Mailhot¹, Daniel Caya²

¹ Institut national de la recherche scientifique (INRS), Centre Eau Terre Environnement (ETE), Québec (Québec)

² Consortium Ouranos, Montréal (Québec)

Contribution

Initialement, le projet a été proposé par mon directeur, deuxième auteur, et consistait à analyser la structure spatiale des précipitations à l'aide de simulations du MRCC. Après avoir exploré différentes méthodologies, j'ai suggéré le concept d'analyse par objets. J'ai programmé toutes les fonctions nécessaires au traitement et à la visualisation des données en plus d'effectuer l'analyse des résultats elle-même. Mon directeur a contribué à l'ensemble des travaux et à la rédaction par ses conseils judicieux et ses idées. Mon codirecteur, troisième auteur, a contribué à plusieurs moments au cours

du projet en validant de façon critique l'utilisation des simulations climatiques selon les limites des modèles ainsi que les notions climatologiques et météorologiques abordées dans le projet.

Publication ciblée

International Journal of Climatology, Royal Meteorological Society (ISSN : 1097-0088)

Article soumis le 15 novembre 2013

Article accepté conditionnellement (corrections mineures) le 20 janvier 2014

Article révisé soumis le 30 janvier 2014 (manuscrit présenté ici)

Résumé traduit

Les structures spatiales des champs horaires de précipitations ont été étudiées à partir de trois simulations du Modèle régional canadien du climat (MRCC) et à partir des observations *Stage IV* de *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). Chaque structure de précipitations, définie comme une zone contiguë de précipitations au-dessus d'un certain seuil, a été analysée à travers des caractéristiques géométriques (position, superficie, axes principal et secondaire, excentricité, orientation) et des caractéristiques d'intensité (volume, intensités moyenne et maximum, distribution de précipitations à l'intérieur de la structure) pour 16 régions climatiques de l'Amérique du Nord. Tout en fournissant de nouvelles connaissances sur l'aspect spatial des précipitations, l'étude visait à : (1) évaluer la capacité du MRCC à reproduire les structures de précipitations observées et (2) analyser les changements dans les structures de précipitations entre une période historique (1961-1990) et future (2071-2100). De plus, l'effet de la variabilité interne a été examiné en utilisant deux simulations du MRCC piloté par le MCGC. Pour évaluer la performance du MRCC, une simulation du MRCC piloté par une réanalyse a été d'abord comparée avec des observations et ensuite avec des simulations du MRCC piloté par le MCGC. Les résultats suggèrent que les structures de précipitations du MRCC piloté par une réanalyse affichaient des intensités spatialement plus homogènes que celles observées pour le centre et l'est des États-Unis et montraient des volumes, des intensités et des superficies significativement plus faibles. Cependant, les cycles annuels des valeurs de caractéristiques étaient bien reproduits. De plus, le MRCC piloté par le MCGC a montré des volumes et des intensités significativement plus faibles durant les mois d'été pour les régions du sud-est lorsque comparé au MRCC piloté par une réanalyse. Les structures de précipitations étaient également plus grandes et décalées vers le nord. Les conditions aux frontières semblaient influencer principalement les régions du centre et de l'est de l'Amérique du Nord. En climat futur, les résultats suggèrent des précipitations estivales plus convectives pour les régions du centre et de l'est (augmentation dans

les volumes, les intensités et l'hétérogénéité des structures), des conditions printanières et estivales plus arides pour les régions du sud-ouest (diminution dans le nombre de structures), des conditions hivernales et printanières plus humides pour les régions nordiques (augmentation dans le nombre de structures) et des conditions automnales plus humides pour les régions du sud-est (augmentation dans les volumes et les intensités).

1.1 Abstract

Spatial structures of hourly precipitation fields were studied from three simulations of the Canadian Regional Climate Model (CRCM) and observations of the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Stage IV analysis. Each precipitation structure, defined as a contiguous area of precipitation above a given threshold, was analysed through geometric characteristics (position, area, major and minor axes, eccentricity, orientation) and intensity characteristics (volume, mean and maximum intensities, precipitation distribution within the structure) for 16 climatic regions covering North America. While providing new insights on the spatial facet of precipitation, this study aimed to: (1) assess the performance of the CRCM to reproduce observed precipitation structures and (2) analyse the changes in precipitation structures between historical (1961-1990) and future (2071-2100) periods. In addition, the effect of internal variability was investigated using two CGCM-driven CRCM simulations. In order to assess the CRCM performance, a reanalysis-driven CRCM simulation was first compared with observations and then with CGCM-driven CRCM simulations. Results suggest that reanalysis-driven CRCM precipitation structures displayed intensities spatially more homogeneous than observed ones for the central and eastern United States and showed significantly lower precipitation volumes, intensities and areas. However, annual cycles of characteristic values were well reproduced. In addition, CGCM-driven CRCM showed significantly lower precipitation volumes and intensities during summer months for southeastern regions when compared to reanalysis-driven CRCM. Precipitation structures were also larger and shifted further north. Boundary conditions seemed to influence mainly central and eastern regions of North America. In future climate, results suggest more convective summer precipitations for central and eastern regions (increases in volumes, intensities and heterogeneity of structures), drier spring and summer conditions for southwestern regions (decreases in numbers of structures), wetter winter and spring

conditions for northern regions (increases in numbers of structures) and wetter autumn conditions for southeastern regions (increases in volumes and intensities).

Keywords: spatial pattern; regional climate model; object-based method; precipitation field; radar; climatic regions; extreme precipitation

1.2 Introduction

Higher concentrations of greenhouse gases give rise to an increase in global temperatures, which may alter the global precipitation regime and lead to an intensification of the hydrological cycle (Trenberth, 1999, 2011; IPCC, 2007). Trenberth *et al.* (2003) suggested that, as the moisture holding capacity of the atmosphere increases with temperature, extreme precipitation events may become more intense and more frequent in a future climate. Numerous studies have therefore focused on extreme precipitations due to their important socio-economic impacts (Zwiers & Kharin, 1998; Tebaldi *et al.*, 2006; Kharin *et al.*, 2007; Mladjic *et al.*, 2011; Mailhot *et al.*, 2012; Monette *et al.*, 2012).

In order to investigate the existence of a historical signal of climate change, many trend analyses of precipitation have been carried out in recent years using time series from weather stations (Zhang *et al.*, 2000; Alexander *et al.*, 2006; Vincent & Mekis, 2006; Peterson *et al.*, 2008). Alexander *et al.* (2006), with an analysis of daily precipitation series from various observation networks around the world, showed a tendency toward wetter conditions over the Northern Hemisphere mid-latitudes and parts of Australia. Local trends have a lower statistical significance and are spatially less coherent than global trends, but a statistically significant increase of heavy precipitation (> 10 mm/day) is seen over the south-central United States (US) and parts of South America. Peterson *et al.* (2008) analysed daily weather station precipitation series from Canada, the US and Mexico and reported heavier average daily precipitation for the last half of the century over North America. However, trends differ from region to region.

Future projections are estimated through the analysis of simulated precipitation series from Global Climate Models (GCMs) (Zwiers & Kharin, 1998; Dai *et al.*, 2001; Meehl *et al.*, 2005; Tebaldi *et al.*, 2006; Kharin *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2007) or Regional Climate Models (RCMs) (Chen *et al.*, 2005; Frei *et al.*, 2006; Sushama *et al.*, 2006; Fowler *et al.*, 2007; Mailhot & Duchesne,

2010; Mladjic *et al.*, 2011; Monette *et al.*, 2012; de Elía *et al.*, 2013). Among these studies, Tebaldi *et al.* (2006) indicated greater precipitation intensities on a global scale based on simulated series from nine GCMs. However, consensus between models and statistical significance remain weak for regional patterns. Using future simulations from 14 GCMs with various emission scenarios, Sun *et al.* (2007) also reported an increase in precipitation frequency and intensity over high latitudes, over wet regions located in the low and mid-latitudes, and a decrease over dry regions in the subtropics.

Additionally, published studies with a regional focus have shown changes in precipitation for North America. The Canadian Regional Climate Model (CRCM) was widely used to simulate precipitation changes over the continent (Plummer *et al.*, 2006; Sushama *et al.*, 2006; de Elía & Côté, 2010; Mladjic *et al.*, 2011; Monette *et al.*, 2012; de Elía *et al.*, 2013). For instance, Plummer *et al.* (2006) demonstrated that increases in seasonal precipitation over a few climatic regions can be expected (North West Forest and Northern Plains in spring; East Arctic in winter), while Sushama *et al.* (2006) have indicated increases in annual precipitation over several river basins (Fraser, Mackenzie, Yukon, Nelson, Churchill). Apart from these studies, Chen *et al.* (2005), with an independent RCM, suggested an increase in the frequency and intensity of daily heavy precipitation events (> 32 mm/day) over the eastern US, leading to more convectively-driven precipitation. More recently, several studies analysed simulations from an ensemble of RCMs (driven by distinct GCMs and reanalyses) provided by the North American Regional Climate Change Assessment Program (NARCCAP) (Dominguez *et al.*, 2012; Mailhot *et al.*, 2012; Sobolowski & Pavelsky, 2012; Wehner, 2012). Wehner (2012) suggested increases in seasonal mean precipitation for Canada and the northern US in winter and for most parts of Canada during the other seasons. Decreases were projected for the western US in summer and for the southwestern US in spring. Dominguez *et al.* (2012) found increases in the intensity of 20- and 50-year return period winter precipitation events over the western US, while over Canada, Mailhot *et al.* (2012) showed that the intensity of annual maxima precipitation would increase, with the largest increases for Ontario, the Prairies and Southern Quebec.

Most published studies (historical trend analyses; future projections) have addressed the issue of precipitation change through a time perspective, i.e. by analysing time series at a specific site (e.g. grid cells of a climate model or weather stations). In the present study, precipitation fields over a specific area are subdivided into spatial structures (or objects) made of contiguous grid cells with a precipitation amount above a given threshold. As far as we know, no study has analysed the spatial structures of precipitation fields as simulated by climate models and how the characteristics

of these structures will evolve in a future climate. The current study intends to bring insights into the spatial aspect of precipitation as simulated by climate models and focuses on precipitation fields at the hourly resolution.

Spatial structures of precipitation have been investigated in meteorology, mainly for forecast verification. The purpose of forecast verification is to evaluate how a forecast matches observations (Jolliffe & Stephenson, 2012). Among the verification methods proposed in the literature, object-based methods are considered in this study since they specifically address the identification of spatial structures of precipitation. Object-based methods were initially developed to analyse radar data (Crane, 1979; Dixon & Wiener, 1993; Johnson *et al.*, 1998) and were refined to compare forecast data to radar observations (Ebert & McBride, 2000; Davis *et al.*, 2006b; Baldwin, 2009).

In the present study, an object-based method was modified and applied to simulated precipitation fields from a RCM, which are available at a coarser spatial resolution than what is generally used in meteorology. Two specific questions were addressed: (1) How well do the characteristics of simulated precipitation structures compare to the observed ones? (2) How will these structures of precipitation evolve in a future climate?

The paper is divided as follows. Section 2 presents a description of the datasets used in this study (simulated and observed) and details the study area. Section 3 describes the methodology. Results and discussions for each objective of this work are presented in Sections 4 and 5. Section 4 investigates climate model performance while future projections established from model output are examined in Section 5. Section 6 concludes with a summary and provides some perspectives for future works.

1.3 Precipitation datasets and study area

Four precipitation datasets were considered in this study (Table 1.1). Simulated precipitation datasets were obtained from the CRCM version 4.2.3 (Music & Caya, 2007; de Elía & Côté, 2010; Paquin, 2010). CRCM simulations were generated and supplied by Ouranos. The 15-minute precipitation output of the CRCM is available over a domain covering North America (200 x 192 grid points) with a horizontal resolution of 45 km (true at 60° N) on a polar stereographic projection. Two runs (AET; AEV) were driven by atmospheric fields taken from the third generation Cana-

Tableau 1.1 – Description of the datasets used in this study

Dataset	Description	Period	Time resolution	Space resolution	Domain	Type
AET	CRCM driven by CGCM3 (4 th member)	1961-2100	15 min	45 km x 45 km	North America	Simulated
AEV	CRCM driven by CGCM3 (5 th member)	1961-2100	15 min	45 km x 45 km	North America	Simulated
AGO	CRCM driven by ERA40	1958-2002	15 min	45 km x 45 km	North America	Simulated
ST4	NCEP Stage IV	2002-2011	1 h	4 km x 4 km	United States	Observed

dian Coupled Global Climate Model (CGCM3; 4th and 5th members) having a spatial resolution of approximately 3.75° x 3.75° latitude-longitude (Flato *et al.*, 2000; Flato & Boer, 2001; Scinocca *et al.*, 2008). Each CGCM member is a simulation with distinct initial conditions. CGCM data were generated by the Canadian Center for Climate Modelling and Analysis (CCCma). Both runs (AET; AEV) cover the period 1961-2100, but only two 30-year periods (1961-1990 and 2071-2100) were considered in this study. Both simulations use the IPCC SRES A2 greenhouse gas and aerosol projected evolution (IPCC, 2000). A third run (AGO), covering the period 1958-2002, was driven by the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMRWF) ERA40 global reanalyses (Uppala *et al.*, 2005) publicly available on a regular 2.5° x 2.5° latitude-longitude global grid.

The observed dataset was obtained from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Stage IV hourly precipitation analysis. The NCEP Stage IV (ST4) dataset is a mosaic of regional multi-sensor (radar and rain gauges) analysis produced by the 12 River Forecast Centers (RFCs) covering the contiguous United States (Lin & Mitchell, 2005). Details about the radar algorithm can be found in Fulton *et al.* (1998). Each RFC applies a manual quality control after combining data from radar and rain gauges. The mosaic is defined on a 4 km x 4 km polar stereographic grid (1 121 x 881 grid points). Stage IV data have been archived since 2002, therefore, a 10-year period (2002-2011) was used in this study. The observed data grid (4 km x 4 km) was remapped onto the simulated data grid (45 km x 45 km) with a first-order conservative remapping scheme (Jones, 1999) to ensure coherence for all ensuing comparisons. The NCEP Stage IV dataset was chosen mainly for its time resolution and spatial coverage, which are crucial for an object-based analysis.

The area of interest covers the North American domain as simulated by the CRCM (Figure 1.1). Plummer *et al.* (2006) proposed 11 climatic regions, which were considered nearly homogeneous in

terms of physiographic and climatic variations and covered Canada and the northern US. Five other regions were added to cover the southern US (D. Plummer, personal communication). Thus, the area of interest was divided into 16 climatic regions (Figure 1.1).

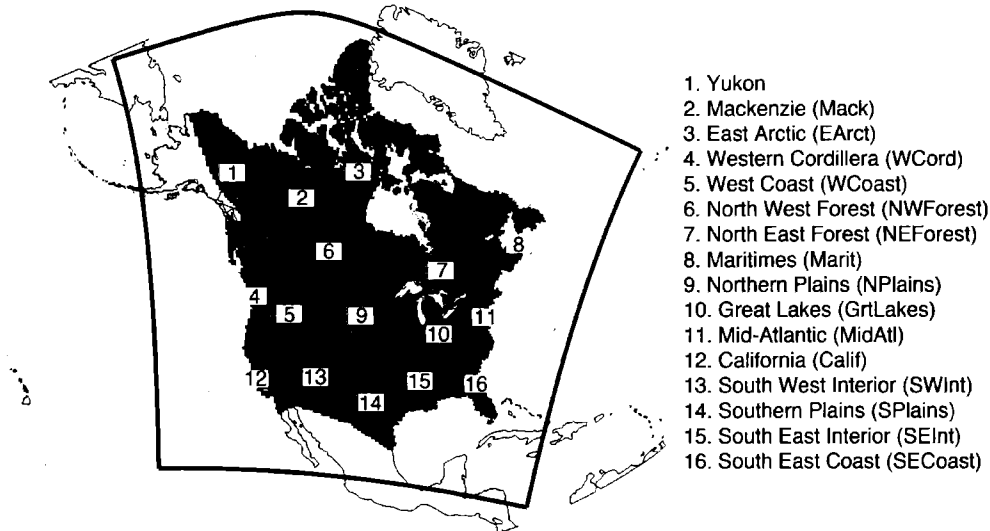


Figure 1.1 – Name and abbreviation of the 16 climatic regions covering North America (Canada and United States). The external border identifies the limits of the CRCM North American domain.

1.4 Methodology

Data were processed through an object-based method strongly inspired from Davis *et al.* (2006b). First, CRCM 15-minute simulated precipitation series were aggregated to construct hourly precipitation series at each grid cell. Series were then handled separately for each month to allow an intra-annual analysis of precipitation characteristics. Second, spatial structures of precipitation were identified from hourly precipitation fields considering a threshold of 0.2 mm. The threshold value was selected to remove very light precipitation, which frequency is greatly overestimated by climate models (Sun *et al.*, 2006). Thus, any contiguous area with precipitation values above this threshold within the North American domain was labelled as an object, i.e. as a precipitation structure.

Once identification was complete, characteristics of precipitation structures were estimated. The characteristics were classified into two categories: geometric and intensity characteristics. Geometric characteristics are illustrated in Figure 1.2 and include the following:

- Centroid (latitude, longitude): Geometric center of the precipitation structure. Grid coordinates (x and y) of the centroid have been converted to corresponding latitude and longitude.

- Major and minor axes (km): Axis lengths of the ellipse used to approximate the precipitation structure according to its normalized second central moments (Haralick & Shapiro, 1992). Extremities of axes were converted to latitudinal and longitudinal positions to allow the computation of distance in kilometers.
- Eccentricity: Ratio between the foci of the ellipse and its major axis length. Value is between 0 (circle) and 1 (straight line).
- Orientation ($^{\circ}$ from North): Angle between the major axis and the meridian traversing the westernmost extremity of the major axis (clockwise from North).
- Area (km^2): Sum of all grid cell areas within the precipitation structure.

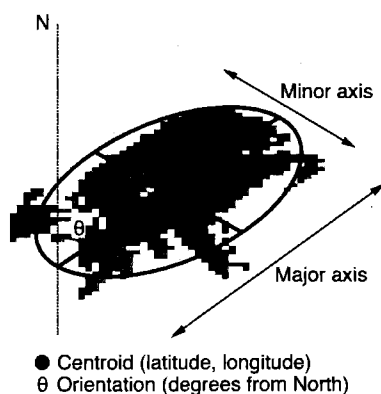


Figure 1.2 – Example of the computation of geometric characteristics (centroid, area, major axis, minor axis, orientation).

Intensity characteristics were computed directly with grid cell precipitation values and included the following:

- Precipitation volume (m^3): Sum of each precipitation value multiplied by its grid cell area.
- Mean intensity (mm/h): Precipitation volume divided by the precipitation structure area.
- Maximum intensity (mm/h): Highest grid cell precipitation value within the precipitation structure.
- Precipitation distribution (α, β): Gamma distribution fitted to grid cell precipitation intensities within each spatial structure. Shape and scale parameters ($\alpha; \beta$) of the gamma distribution provide information about the spatial heterogeneity of intensities within the precipitation structure according to the dispersion of values in the distribution (Baldwin *et al.*, 2005).

The gamma distribution was selected since it is often used to represent precipitation data (Baldwin *et al.*, 2005; Wilks, 2011). In this study, it is used to represent the spatial distribution of

precipitation within a structure. Its probability density function (Wilks, 2011) is:

$$f(x) = \frac{(x/\beta)^{\alpha-1} \exp(-x/\beta)}{\beta \Gamma(\alpha)} \quad (1)$$

where $\Gamma(\alpha)$ is the gamma function, α is the shape parameter and β is the scale parameter. Parameters were estimated using the maximum-likelihood estimation method.

Description and computation of these characteristics can be found in Baldwin *et al.* (2005) and Davis *et al.* (2006b). Here, because grid cells have unequal areas due to the polar stereographic projection, grid scale factors were used to obtain real grid cell areas (Laprise, 2008). Furthermore, only objects having a major axis length between 200 km and 2 000 km were considered for further analysis. These values were chosen as being representative of the size of meso-alpha scale precipitation systems, corresponding to fronts and hurricanes (Orlanski, 1975). Afterward, each precipitation structure was assigned to the climatic region containing the greatest proportion of its total area excluding the area over water bodies.

Finally, characteristics were analysed through their statistical distributions. Only marginal distributions of characteristics were analysed and correlations between characteristics were not investigated. Characteristic values were first pooled by dataset, month, climatic region and year. Then, the yearly median of each sample was estimated to build series of characteristics for each dataset, month and climatic region. For example, the series of maximum intensities for July on NEForest for AET 1961-1990 contains 30 values, i.e. annual medians of characteristic values for 30 years of data. Median was selected over mean to represent central tendency since most annual distributions are strongly skewed to the right.

The subsequent analysis was carried out on these series of annual medians (one series per characteristic, dataset, month and climatic region). They were compared from dataset to dataset for specific time periods to detect statistically significant differences in characteristics. A Welch's t-test was used to determine if differences between two mean values (i.e. the means of each series of medians) were statistically significant at a 95 % confidence level. This is a modified two-sample t-test that is robust to unequal variances, supports small departures from normality (Skovlund & Fenstad, 2001; Fagerland & Sandvik, 2009), and has already been used in some climate studies (Luterbacher *et al.*, 2007; Zanis *et al.*, 2009).

1.5 Assessment of climate model performance

The proposed methodology was first applied to assess the CRCM performance. Following Su-shama *et al.* (2006), two types of errors can be defined: CRCM errors (intrinsic dynamics and physics) and CGCM errors (boundary forcing). CRCM errors were assessed through the comparison of reanalysis-driven CRCM simulated data (AGO) with observed data (ST4), while errors associated with CGCM were evaluated with a comparison between reanalysis-driven (AGO) and CGCM-driven CRCM simulations (AET/AEV). It is important to look separately at both types of errors because their effects can partially cancel out. Another important source of uncertainty is the internal variability, which refers to the natural variability of the climate system in the absence of radiative forcing (Hawkins & Sutton, 2010; Deser *et al.*, 2012). This uncertainty is usually assessed through the use of various ensemble members simulated with distinct initial conditions (Lucas-Picher *et al.*, 2008). In our case, since only two ensemble simulations were available, internal variability could not be thoroughly investigated. Nevertheless, results from these two simulations were compared to find out if both simulations were consistent.

In the following comparisons, major and minor axes demonstrated approximately the same annual cycle as areas (for all datasets). In addition, all differences from comparisons between datasets (ST4 and AGO; AGO and AET/AEV) for major and minor axes were smaller than a grid cell (45 km). Thus, the real significance of these differences and of the ones for eccentricity was questionable considering the spatial resolution of the model. Some differences were observed for the orientation; however they were noisy and smaller than 10° . Thus, these characteristics will not be discussed any further in this section.

1.5.1 Comparison of ERA40-driven CRCM simulation and NCEP Stage IV dataset

AGO was compared to the ST4 dataset for the nearest 10-year period available, i.e. 1992-2001 (AGO) and 2002-2011 (ST4). Monthly mean precipitation differences between these two periods were investigated using the Climate Research Unit monthly precipitation dataset (CRU TS 3.20) (Harris *et al.*, 2013). Since these differences were small (not shown here), it remained meaningful to compare dataset results from these two periods. AGO's driving data, ERA40, were considered

as a good representation of historical climate, therefore, differences should be reasonably attributed to CRCM structural errors. The comparison was carried out for six climatic regions covering the central and eastern United States (NPlains, GrtLakes, MidAtl, SPlains, SEInt, SECoast), because of the availability of NCEP Stage IV data and potential errors of radar data in mountainous regions.

Each difference between AGO and ST4 datasets for precipitation structure characteristics was standardized to allow for comparison among all climatic regions and months. The standardized mean difference (SMD) is computed following:

$$\text{SMD} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p} \quad \text{where } s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (2)$$

$\bar{x}_i$ is the mean of the series of annual medians for dataset i (AGO or ST4), s_p is the pooled standard deviation, s_i is the unbiased estimate of the standard deviation of the series of annual medians for dataset i (AGO or ST4) and n_i is the number of elements in the series for dataset i (AGO or ST4).

Figure 1.3 summarizes the differences between AGO and ST4 for all characteristics, months and climatic regions. Differences are expressed in terms of SMD. The largest differences were related to intensity characteristics (maximum intensity, mean intensity, α and β) and were relatively similar from region to region.

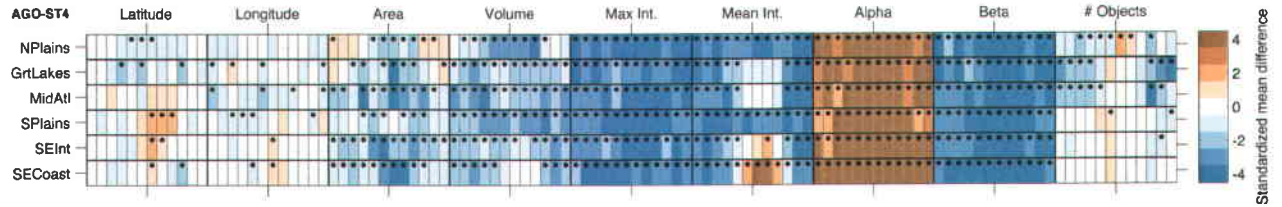


Figure 1.3 – Standardized mean differences in precipitation structure characteristics according to ST4 (2002–2011) and AGO (1992–2001) datasets. Each table cell intersecting a region and a characteristic is subdivided into 12 rectangles corresponding to the 12 months of the year. Dots indicate a statistically significant difference according to Welch's t-test (95 % confidence level). Blue indicates smaller values for AGO compared to ST4 and orange higher values.

For the number of spatial structures, AGO underestimated ST4 values from October to April over GrtLakes and MidAtl regions (Figure 1.4). The number of spatial structures for NPlains region was underestimated by AGO from March to June and then overestimated in July and August (Figure 1.4). Observed and simulated numbers of precipitation structures were very similar for other regions (SPlains, SEInt, SECoast; Figure 1.3).

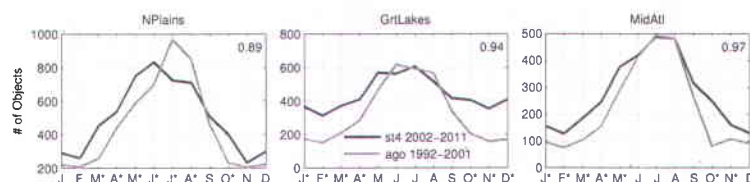


Figure 1.4 – Annual average number of precipitation structures according to ST4 (2002-2011) and AGO (1992-2001). Differences for starred months are statistically significant according to Welch's t-test (95 % confidence level). Correlation coefficients are indicated in the top-right corner.

Globally, simulated precipitation structure areas were smaller than observed ones (Figure 1.3). Precipitation structure areas were underestimated by about 20 % almost all year round over MidAtl, SEInt and SECoast regions and this underestimation reached approximately 45 % over SEInt region in January (Figure 1.5). However, areas were underestimated only during summer months over NPlains, GrtLakes and SPlains and were even overestimated in January and November over NPlains and in December over GrtLakes.

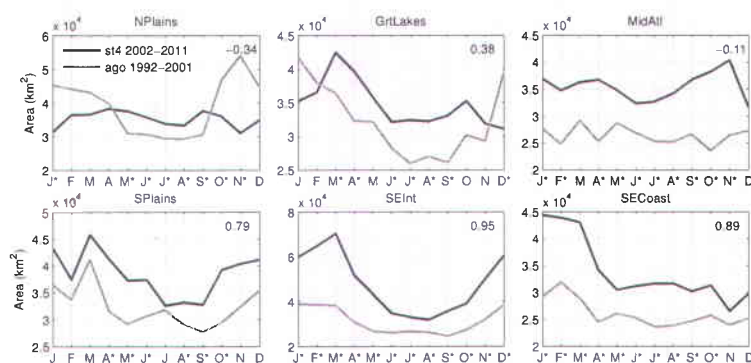


Figure 1.5 – Annual average areas of precipitation structures according to ST4 (2002-2011) and AGO (1992-2001). Differences for starred months are statistically significant according to Welch's t-test (95 % confidence level). Correlation coefficients are indicated in the top-right corner.

Mean precipitation structure intensities combine information on precipitation volumes and areas, which were both globally underestimated by AGO (Figure 1.3). Mean precipitation intensities were underestimated as well for all months and regions except during summer months for coastal regions (MidAtl, SEInt, SECoast). It was underestimated by more than 50 % in winter and spring for all regions and overestimated in summer for SECoast region (Figure 1.6). Central regions (NPlains, SPlains) showed an approximate 50 % year-round underestimation. Despite these differences, simulated and observed annual cycles were similar for most regions (NPlains, GrtLakes, MidAtl, SPlains) as shown with correlation coefficients larger than 0.95.

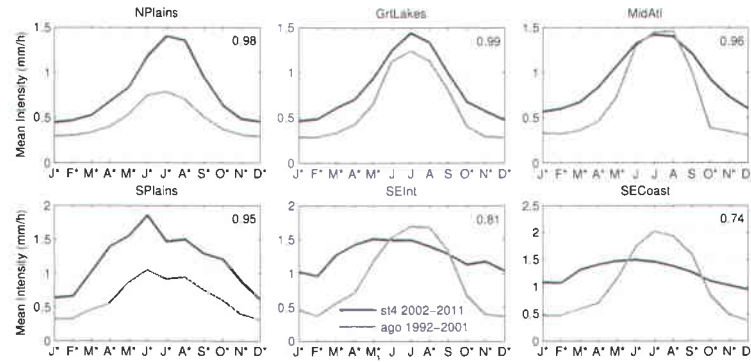


Figure 1.6 – Annual average mean intensities of precipitation structure according to ST4 (2002-2011) and AGO (1992-2001). Differences for starred months are statistically significant according to Welch's t-test (95 % confidence level). Correlation coefficients are indicated in the top-right corner.

Figure 1.7 shows that precipitation structure maximum intensities were largely underestimated by AGO (by more than 50 %) year-round over all six regions. The observed annual cycle was well reproduced by the model for most regions (NPlains, GrlLakes, MidAtl, SPlains) as shown with correlation coefficients larger than 0.94, but relative differences were important. The distributions of intensities within each precipitation structure were consistent with this result as a systematic underestimation of the scale parameter (β) was observed along with an overestimation of the shape parameter (α), demonstrating the less extreme character of precipitation in AGO. The gamma distribution of a representative precipitation structure, built using the mean values of shape and scale parameters (α ; β) over all precipitation structures, can be drawn for selected regions and months (NPlains, SECoast; Figure 1.8). Other regions and months displayed precipitation distributions between those of NPlains and SECoast regions. The CRCM generated more homogeneous spatial structures of precipitation year-round over all six regions. Precipitation distributions within spatial structures associated to ST4 were generally more right-skewed and more spread out. These diffe-

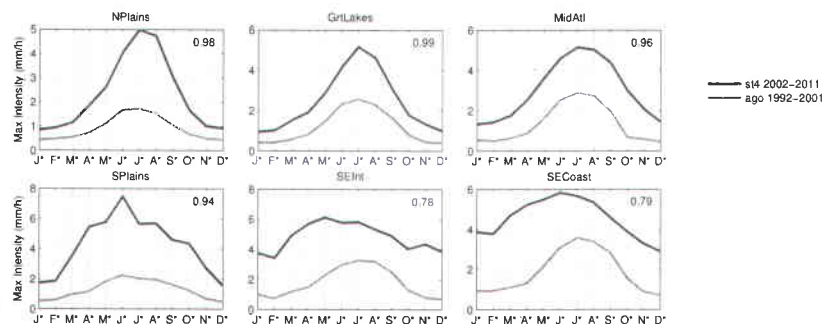


Figure 1.7 – Annual average maximum intensities of precipitation structure according to ST4 (2002-2011) and AGO (1992-2001). Differences for starred months are statistically significant according to Welch's t-test (95 % confidence level). Correlation coefficients are indicated in the top-right corner.

rences in the asymmetry and dispersion of distributions indicate higher probabilities of occurrence for small precipitation values and extreme precipitation values in spatial structures from ST4.

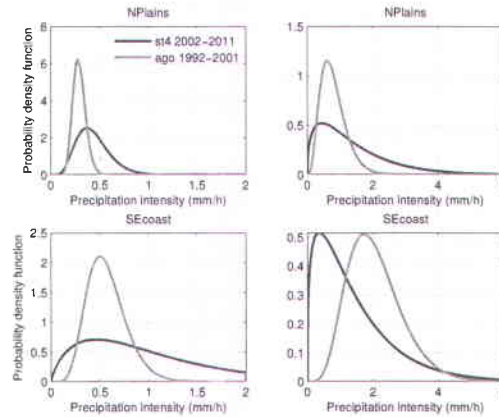


Figure 1.8 – Gamma distributions of precipitation intensities within a representative January (1st column) and July (2nd column) precipitation structure according to ST4 (2002-2011) and AGO (1992-2001). Representative precipitation structures are built using mean values of α and β parameters for the given month and region.

No significant difference was found in the longitudinal position of spatial structures, except for an underestimation of 0.5° over SPlains in spring. Large differences in latitudinal positions of precipitation structures were also observed with AGO overestimating ST4 values by approximately 2° over SPlains from July to September, and by 0.5° over SEInt in July and August.

In summary, the CRCM simulated significantly fewer extreme values and more homogeneous precipitation structures than observed with the NCEP Stage IV dataset. Nevertheless, the annual cycle was well reproduced for most intensity characteristics, mainly for NPlains, GrtLakes, MidAtl and SPlains (correlation coefficients larger than 0.9), even if monthly differences can be important. Differences may be attributed to the multiple uncertainties related to the use of a RCM, but importantly, large uncertainties and possible errors may also be present in the ST4 dataset especially in mountainous areas. Also, ERA40 data, supplied as driving conditions for AGO, and ST4 are both representations of reality but they are not the reality. Still, CRCM errors were non-negligible, and often exceeded 50 % in relative differences for many precipitation structure characteristics.

1.5.2 Comparison of CGCM3-driven and ERA40-driven CRCM simulations

AGO was compared to AET and AEV simulations for all 16 climatic regions over the 1961-1990 period. ERA40-driven CRCM (AGO) should be a more reliable representation of historical climate

than CGCM-driven CRCM (AET/AEV) since the boundary conditions supplied to the regional model integrate observations from a historical period. By looking at the differences between these datasets, impacts of using a GCM to drive the RCM can be partly assessed.

A summary of the differences between AET/AEV and AGO is shown in Figure 1.9. The largest differences occurred over the southern regions for intensity characteristics (volume, maximum intensity, mean intensity, α and β) and the number of precipitation structures. Northern and western regions seemed to be particularly less sensitive to boundary conditions for the above characteristics. Agreement between both AET and AEV simulations was very good. Both simulations displayed differences with AGO for mostly the same regions, months and characteristics.

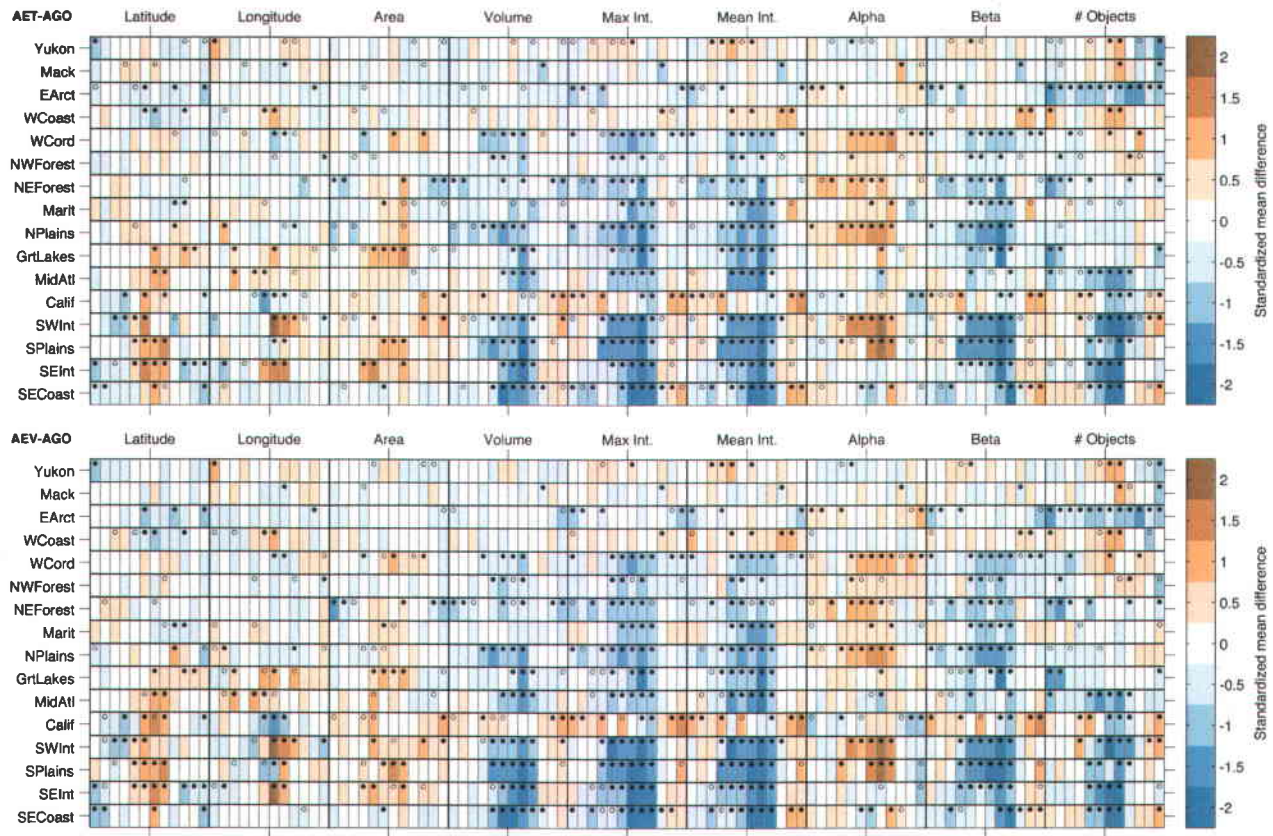


Figure 1.9 – Standardized mean differences in precipitation structure characteristics according to AET-AGO (top) and AEV-AGO (bottom) over 1961-1990 period. Each table cell intersecting a region and a characteristic is subdivided into 12 rectangles corresponding to the 12 months of the year. Dots indicate a statistically significant difference for both AET and AEV according to Welch's t-test (95 % confidence level), while open circles indicate a statistically significant difference only for the corresponding simulation. Blue indicates smaller values for AET/AEV compared to AGO and orange higher values.

A look at the number of precipitation structures shows lower values for AET/AEV compared to AGO during summer months for MidAtl and southern regions (Calif, SWInt, SPlains, SEInt,

SECoast; Figure 1.10). The number of precipitation structures was also lower over EArct all year round and over NEForest and GrtLakes during winter months. Additionally, the number of structures generated by AGO was larger over Yukon and WCoast in July and August and in April and May over California. Still, annual cycles agreed generally well between AET/AEV and AGO.

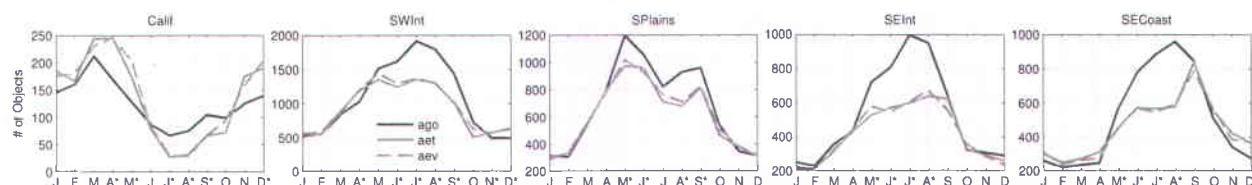


Figure 1.10 – Annual average number of precipitation structures according to AGO and AET/AEV over 30-year period 1961-1990 for southern regions (Calif, SWInt, SPlains, SEInt, SECoast). Differences for starred months are statistically significant for both simulations according to Welch's t-test (95 % confidence level).

Precipitation volumes simulated by AET/AEV were lower than those obtained by AGO in the summer over central and eastern regions (WCord, NWForest, NEForest, NPlains, GrtLakes, MidAtl, SWInt, SPlains, SEInt, SECoast; Figure 1.11). Over California, the precipitation volume was larger for AET/AEV by about 40 % in November and December (Figure 1.9). In contrast to other regions, California showed a distinct behaviour for all intensity characteristics with differences in the opposite direction and occurring during winter months instead of summer months.

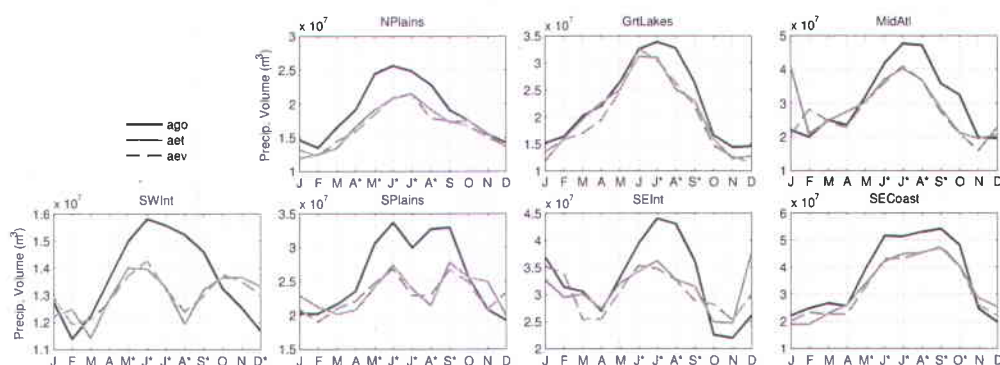


Figure 1.11 – Annual average precipitation structure volumes according to AGO and AET/AEV over 30-year period 1961-1990 for selected regions (NPlains, GrtLakes, MidAtl, SWInt, SPlains, SEInt, SECoast). Differences for starred months are statistically significant for both simulations according to Welch's t-test (95 % confidence level).

Few differences were statistically significant for precipitation structure areas. Smaller values for AET/AEV were observed from May to August over GrtLakes and in April, May and August over SEInt. However, from November to February, AET/AEV areas were smaller by about 30 % over NEForest. Once combined, precipitation volumes and areas led to clear lower values of mean intensities (lower of about 20 %) for AET/AEV compared to AGO in summer for central and eastern

regions (WCord, NWForest, NEForest, Maritimes, NPlains, GrtLakes, MidAtl, SWInt, SPlains, SEInt, SECoast; Figure 1.12). Larger values for AET/AEV were also seen during autumn months over WCoast and during winter months over EArct, WCord, Calif and SECoast. Even with these differences, AET/ AEV annual cycles for mean intensities were similar to those from AGO.

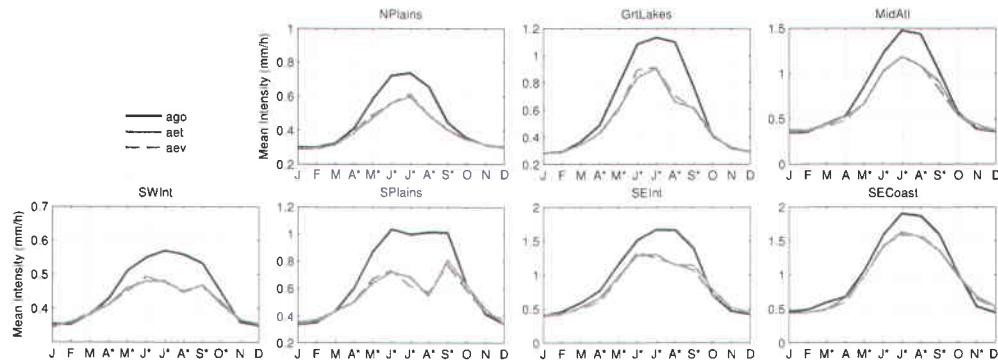


Figure 1.12 – Annual average mean intensities of precipitation structure according to AGO and AET/AEV over 30-year period 1961-1990 for selected regions (NPlains, GrtLakes, MidAtl, SWInt, SPlains, SEInt, SECoast). Differences for starred months are statistically significant for both simulations according to Welch's t-test (95 % confidence level).

The same conclusions can be drawn for maximum precipitation structure intensities. AET/AEV showed lower values compared to AGO in summer over central and eastern regions and over California in August and September. Distribution of intensities within precipitation structures for AET/AEV showed lower probabilities of occurrence of extreme values ("lighter" tails) compared to AGO for the same central and eastern regions during summer. However, this difference was more pronounced over southeastern regions (SPlains, SEInt, SECoast; Figure 1.13). Again, annual cycles for these characteristics were well preserved by AET/AEV compared to AGO.

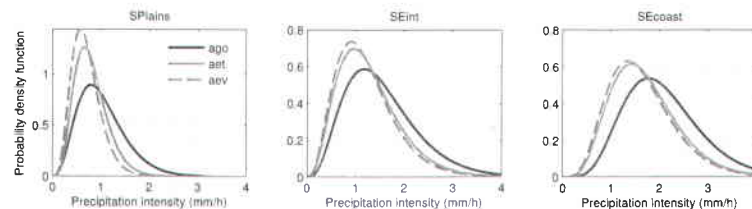


Figure 1.13 – Gamma distributions of precipitation intensities within a representative July precipitation structure according to AGO and AET/AEV over 30-year period 1961-1990 for selected regions (SPlains, SEInt, SECoast). Representative precipitation structures are built using mean values of α and β parameters.

Small differences were found in the remaining characteristics of precipitation structures. Latitudinal positions of precipitation structures were slightly shifted to the north (of about 1°) for

AET/AEV during summer months over SPlains. However, differences for other months and regions were smaller than 0.5° . For the longitudinal position, differences are barely larger than 1° .

Precipitation volumes, numbers of precipitation structures and mean intensities can be linked to the monthly precipitation differences between AGO and AET/AEV (not shown here). Over southeastern regions, AET/AEV showed larger monthly precipitations compared to AGO during winter months and lower values during summer months. Intensity characteristics varied accordingly to these monthly precipitation differences and boundary conditions seemed to influence these characteristics. Boundary conditions reproduce weather systems coming from the oceans and the representation of these systems by ERA40 and CGCM may differ. When the CGCM was used to drive the CRCM, simulated precipitations were associated with slightly larger spatial structures with significantly lower precipitation volumes, lower mean intensities and lower maximum intensities compared to ERA40-driven CRCM. These precipitation structures also displayed a more homogeneous precipitation distribution with fewer extreme values. The largest differences occurred during summer over southeastern regions, but all central, southern and eastern regions showed some significant differences. In contrast, northern and western regions were less influenced by boundary conditions as they showed smaller differences. These results agreed with the ones from Sushama *et al.* (2006) using CRCM version 3.7 and suggesting that CGCM-driven CRCM simulations showed lower summer precipitations over Nelson, Churchill and Mississippi basins compared to reanalysis-driven CRCM simulations. Overall, we conclude that boundary conditions have less impact on precipitation structure characteristics than CRCM's intrinsic dynamics and physics since differences were larger between ST4 and AGO than between AGO and AET/AEV.

1.6 Projected changes

Future projections were established by comparing CGCM-driven CRCM simulations (AET/AEV) over historical (1961-1990) and future (2071-2100) periods. Following the hypothesis that model biases are the same for historical and future periods, this approach reduces the effect of biases by focusing on changes between these periods. Two CRCM simulations were considered, each one driven by a distinct CGCM member (AET: 4th member, AEV: 5th member).

Results of both simulations were used to compare the strength of the climate change signal with respect to the climate internal variability. A ratio, defined as the signal-to-variability ratio (SVR), was estimated as follows:

$$\text{SVR} = \frac{\min(|\bar{x}_{AET,f} - \bar{x}_{AET,h}|, |\bar{x}_{AEV,f} - \bar{x}_{AEV,h}|)}{\max(|\bar{x}_{AEV,h} - \bar{x}_{AET,h}|, |\bar{x}_{AEV,f} - \bar{x}_{AET,f}|)} \quad (3)$$

where $\bar{x}$ is the mean of the series of annual medians for each characteristic, dataset (AET or AEV) and period (f = future or h = historical). This ratio compares the smallest difference between future and historical climate (considered as the strength of the climate change signal) to the largest difference between simulations AET and AEV in either historical or future climate (considered as an estimation of the internal variability). A signal-to-variability ratio larger than one ($\text{SVR} > 1$) indicates a climate change signal stronger than the climate internal variability. More specifically, it implies that the weakest climate change signal (among the two simulations) is larger than the largest inter-simulation difference (in historical or future climate). Therefore, a signal-to-variability ratio larger than one is associated to a robust projected change (indicated with a cross in Figure 1.14). Otherwise, the climate change signal is weaker than the climate internal variability and is considered as noise.

Figure 1.14 summarizes projected changes between historical and future changes according to AET and AEV. This figure includes the results of the signal-to-variability ratio as well as the results of Welch's t-test. Almost a third (about 30 %) of all projected changes were statistically significant for both simulations (indicated with a dot in Figure 1.14) with a robust climate change signal (indicated with a cross in Figure 1.14), while about 40 % of the changes were not statistically significant neither robust. Even if Welch's t-test and the signal-to-variability ratio measure distinct information, their results agreed for more than 70 % of the projected changes. For the remaining changes, either one or both simulations were not statistically significant or the climate change signal was not robust. However, about 16 % of projected changes showed a robust climate change signal, but not statistically significant. In these cases, the inter-annual variability seemed too large for a significant climate change signal to emerge.

Figure 1.14 also reveals that the largest changes were observed for intensity characteristics (maximum intensity, mean intensity, α and β) and the number of precipitation structures, noticeable with the darker color shades. Most significant and robust changes occurred during summer months

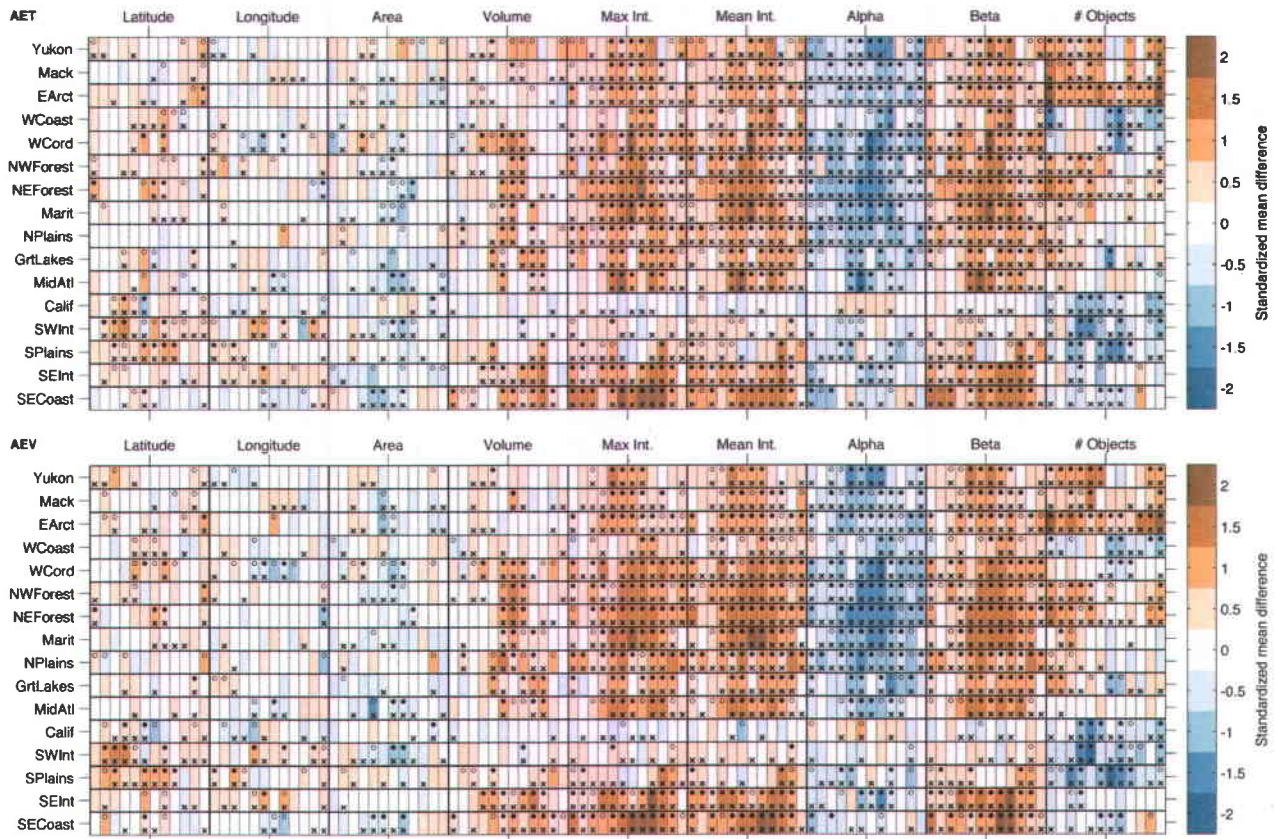


Figure 1.14 – Standardized mean differences in precipitation structure characteristics according to AET (top) and AEV (bottom) over historical (1961-1990) and future (2071-2100) periods. Each table cell intersecting a region and a characteristic is subdivided into 12 rectangles corresponding to the 12 months of the year. Dots indicate a statistically significant difference for both AET and AEV according to Welch's t-test (95 % confidence level), while open circles indicate a statistically significant difference only for the corresponding simulation. Crosses indicate a difference greater than the variation between simulations over historical and future periods (see Equation 3). Blue indicates a decrease in the future period compared to the historical period and orange an increase.

for all regions except southwestern regions (Calif, SWInt and SEInt) where no significant or robust changes were reported concerning intensity characteristics for almost all months. Southwestern regions displayed only small changes in the number of precipitation structures and in the latitudinal position during spring and summer months. It is noteworthy that AET/AEV showed very good agreement for the amplitude of projected changes and the regions and months for which these changes would take place.

In reference to the number of objects, increases mainly affected the northern part of the continent (Yukon: November to June; Mack: December, March and May; EArct: year-round). The number of precipitation structures also increased over NWForest and NEForest from December to May and over GrtLakes in January and February. However, it decreased over WCoast and WCord from July

to September and also from November to January for WCoast. The most important significant decrease was projected over southern regions (Calif: April to June; SWInt: April, May, August; SPlains: March, April, June to September, SECoast: June to August; Figure 1.15).

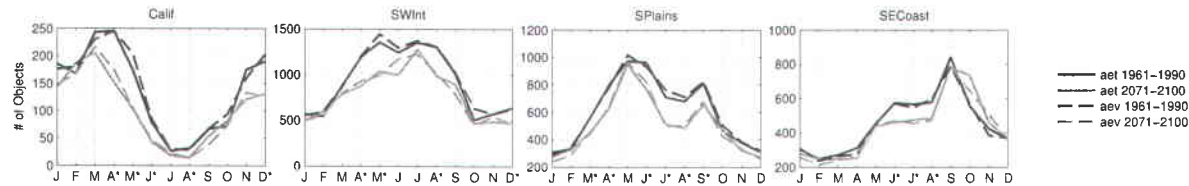


Figure 1.15 – Annual average number of precipitation structures according to AET/AEV over historical (1961-1990) and future (2071-2100) periods for southern regions (Calif, SWInt, SPlains, SECoast). Differences for starred months are statistically significant for both simulations according to Welch's t-test (95 % confidence level).

Precipitation volumes increased over WCord, NWForest, NEForest, Maritimes and NPlains regions during summer months, over NPlains and GrtLakes from August to October, over SEInt from April to October and over SECoast from June to October. No significant change in precipitation volumes was observed over northern and southwestern regions. Mean intensities exhibited a small but significant increase for almost the entire year for all regions except southwestern regions (Figure 1.16). Increases were more important during summer months. Annual cycles did not change, but were stretched toward higher intensities in the middle of the year.

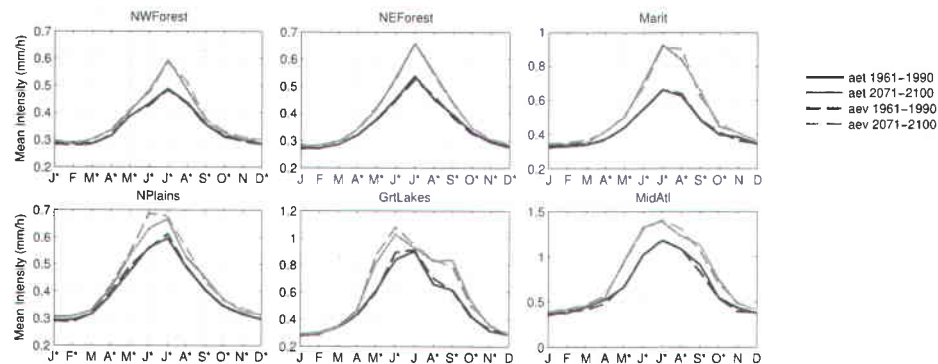


Figure 1.16 – Annual average precipitation structure mean intensities according to AET/AEV over historical (1961-1990) and future (2071-2100) periods for selected regions (NWForest, NEForest, Marit, NPlains, GrtLakes, MidAtl). Other regions show a similar behaviour except southwestern regions. Differences for starred months are statistically significant for both simulations according to Welch's t-test (95 % confidence level).

Changes in precipitation structure areas were much less pronounced and widespread. There was a slight decrease in July and August over SWInt and MidAtl then in May and June over SECoast. However, something interesting and unique occurred for NEForest where areas were smaller in September as the annual cycle was stretched toward October (Figure 1.17). This could mean that

smaller spatial structures typical of the summer season will appear until September, i.e. one month later than between 1961-1990. All other regions displayed very similar precipitation structure areas in a future climate compared to 1961-1990.

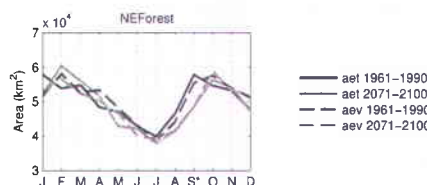


Figure 1.17 – Annual average precipitation structure areas according to AET/AEV over historical (1961-1990) and future (2071-2100) periods for NEForest region. Differences for starred months are statistically significant according to Welch's t-test (95 % confidence level).

As for mean intensities, maximum intensities increased over all regions except southwestern regions (Calif, SWInt, SPlains) mainly during summer months. However, most important relative differences over these regions concerned the scale parameter (β) showing a significant increase during summer months. When combined with the shape parameter (α), the resulting gamma distributions for July showed a stretch to the right for all regions except southwestern regions (Calif, SWInt, SPlains). Still, differences were much more important for WCord, NWForest, NEForest and Maritimes (Figure 1.18). Thus, future precipitation structures will become more heterogeneous and will contain more extreme values for these regions.

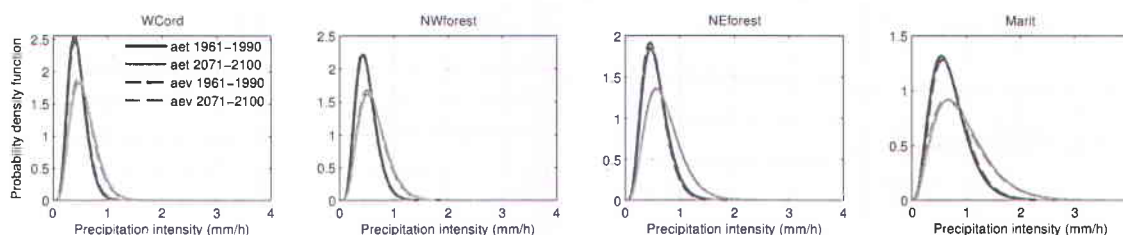


Figure 1.18 – Gamma distributions of precipitation intensities within a representative July spatial structure according to AET/AEV over historical (1961-1990) and future (2071-2100) periods for selected regions (WCord, NWForest, NEForest, Marit). Representative precipitation structures are built using mean values of α and β parameters.

Other characteristics remained almost unchanged in future climate. Nevertheless, latitudinal positions increased from February to April over SWInt, from June to August over SPlains and from July to August over NEForest. In contrast, longitudinal positions stayed quite similar. Eccentricity and orientation were rather similar, but annual cycles remained noisy.

In summary, climate change will mostly affect the number of precipitation structures and intensity characteristics, especially characteristics related to extremes (maximum intensity, distribution

of intensities within precipitation structures). Results indicate that more heterogeneous precipitation structures will prevail for WCord, NWForest, NEForest and Maritimes regions mainly during summer months suggesting a future climate characterized by more convective summer precipitations over these regions. Furthermore, southwestern regions (Calif, SWInt, SPlains) will see fewer precipitation structures during spring and summer months as well as unchanged volumes and intensities, therefore indicating drier conditions. Northern and central regions (Yukon, Mack, EArct, NWForest, NEForest, GrtLakes) will see more precipitation structures during winter months with unchanged volumes and intensities, thus leading to wetter conditions. Finally, larger precipitation volumes and intensities will produce wetter conditions for southeastern and eastern coastal regions (Maritimes, GrtLakes, MidAtl, SPlains, SEInt, SECoast). Importantly, almost all statistically significant projected changes showed a climate change signal stronger than the climate internal variability, as assessed with the computation of a signal-to-variability ratio on the results of two simulations driven by a distinct CGCM member (AET/AEV). Therefore, the climate change signal can be considered robust for these changes. Other characteristics, months and regions showed either no change at all or no significant or robust change. There was also a good agreement on the amplitude of projected changes between both AET/AEV simulations for most characteristics, months and regions. In terms of intensity characteristics, our study agrees with results of published works on climate change for North America (Sushama *et al.*, 2006; Mladjic *et al.*, 2011; Mailhot *et al.*, 2012; Wehner, 2012). As a comparison with other Northern Hemisphere mid-latitude regions, Europe could see similar changes about extreme precipitations over its north, central and eastern regions for both winter and summer months, although the Mediterranean region will become much drier (Frei *et al.*, 2006; Beniston *et al.*, 2007; Fowler *et al.*, 2007; May, 2007). These changes could be explained in part by modifications in storm tracks (Bengtsson *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2010).

1.7 Conclusions

This study analysed the characteristics of precipitation structures as simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). Precipitation structures are defined as contiguous grid cells with precipitation larger than a threshold value (0.2 mm). Hourly time resolution was considered. Characteristics of precipitation structures were classified as intensity characteristics (volume, mean intensity, maximum intensity, precipitation distribution within precipitation structures) and geome-

tric characteristics (centroid position, area, major and minor axes, eccentricity, orientation). Two specific objectives were defined: (1) assess the climate model performance in terms of characteristics of precipitation structures and (2) investigate how precipitation structure characteristics will evolve in a future climate.

For the first part of the study, results from the comparison of a reanalysis-driven CRCM simulation with NCEP Stage IV observations showed that the CRCM underestimates extreme values for the central and eastern United States. These regions also exhibited more homogeneous precipitation structures as well as lower intensities, precipitation volumes and areas when simulated by the CRCM. Nevertheless, the CRCM reproduced annual cycles for all characteristics fairly well. From the comparison of reanalysis-driven and CGCM-driven CRCM simulations, it was shown that the CGCM-driven CRCM simulated lower precipitation volumes and intensities compared to AGO as well as slightly larger precipitation structures located further north during summer months for southeastern regions. Boundary conditions seemed to influence mostly central and eastern North American regions. However, the effect of boundary forcing is smaller than the effect of CRCM's intrinsic physics and dynamics since differences between reanalysis-driven CRCM and NCEP Stage IV are larger.

The second part of the study examined projected changes for the 2071-2100 period. The two CGCM-driven CRCM simulations (AET/AEV) agreed on most changes. In addition, statistically significant changes were associated with a robust climate change signal (climate change signal stronger than the difference between simulations). In future climate, geometric characteristics seemed mostly unchanged (changes not statistically significant), while intensity characteristics changed for most regions (changes statistically significant). Globally, precipitation structures showed a tendency toward larger intensities, larger volumes and a greater heterogeneity, while areas remained almost unchanged. Figure 1.19 presents a summary of the regional projected changes for selected characteristics (maximum intensity and number of precipitation structures) for January, April, July and October, months that are representative of each season. Selected characteristics are among those that display the largest changes for the corresponding seasons. Specific details about future climate conditions predicted by the model are presented below.

- During winter months, northern regions (Yukon, Mack, EArc), NEForest, NEForest and GrtLakes would see an important increase in the number of precipitations structures (Figure 1.19) together with unchanged volumes and unchanged areas, therefore indicating wetter

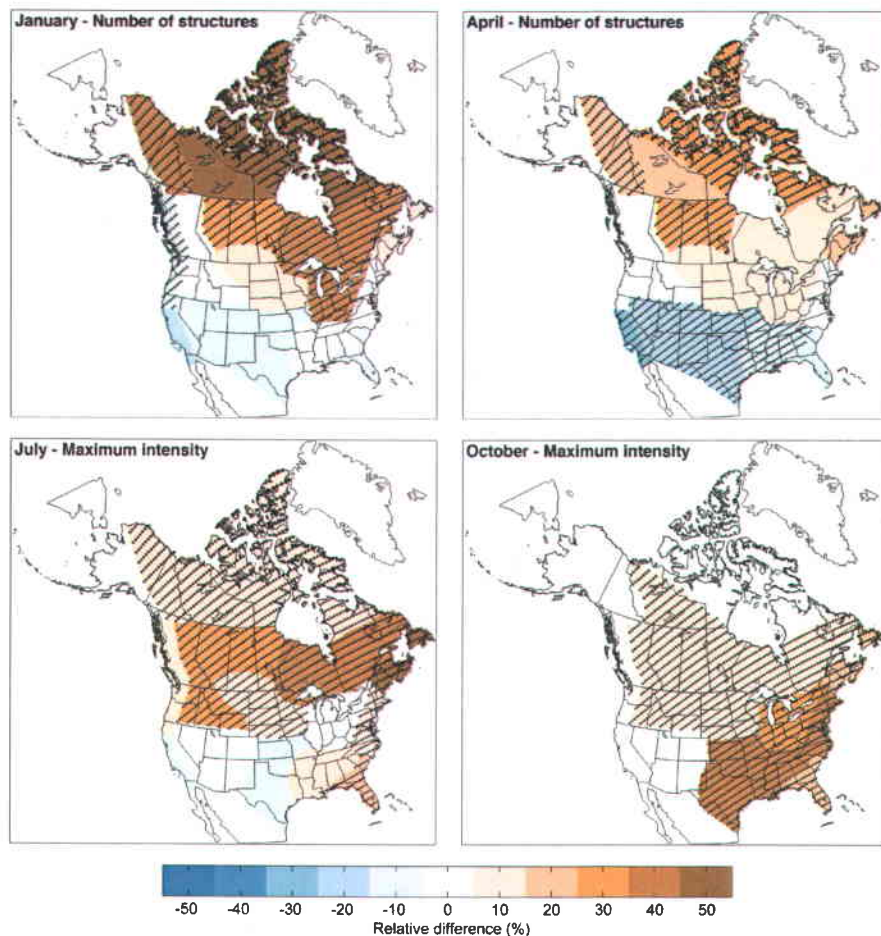


Figure 1.19 – Differences in precipitation structure characteristics (number of structures and maximum intensity) according to AET/AEV over historical (1961-1990) and future (2071-2100) periods for January, April, July and October. Blue indicates a decrease in the future period compared to the historical period and orange an increase. Hatched regions are statistically significant for both simulations according to Welch's t-test (95 % confidence level).

conditions. In contrast, southeastern regions (SEInt, SECoast) would have the same number of structures associated to an increase in intensities and volumes, thus leading to wetter conditions.

- During spring months, numbers of structures increase over Yukon, EArct and NWForest, but a decrease takes place over southern regions (Calif, SWInt, SPlains, SEInt; Figure 1.19). With an increase in intensities over SEInt and unchanged volumes or areas for all these regions, southwestern regions (Calif, SWInt, SPlains) would experience drier conditions, while Yukon, EArct and NWForest would experience wetter conditions. The latitudinal position of precipitations structures was also projected to move slightly further north during for SWInt.
- During summer months, a large increase in maximum intensities was projected for WCord, NWForest, NEForest, Maritimes and SECoast (Figure 1.19) with an increase in precipitation

volumes for the same regions. Probabilities of occurrence of extreme values will also increase with more heterogeneous precipitation structures. Areas would remain almost unchanged, but WCoast, WCord, GrtLakes, SPlains and SECoast would undergo a decrease in the number of structures, thus leading to more convective precipitations for WCord, GrtLakes, SPlains and SECoast and drier conditions for WCoast, GrtLakes and SPlains. In addition, precipitation structures over SPlains were projected to move slightly further north.

- During autumn months, wetter conditions would prevail for southeastern and eastern coastal regions (Maritimes, GrtLakes, MidAtl, SPlains, SEInt, SECoast) with large increases in intensities (mean and maximum) and precipitations volumes associated to unchanged areas (Figure 1.19). EArct would also see wetter conditions with an increase in the number of precipitation structures.

In order to assess possible impacts of the threshold value on results and conclusions, the entire analysis was also performed using a threshold of 0.4 mm to define precipitation structures. Similar results and conclusions were obtained.

Several simulations using distinct initial conditions are required to assess the magnitude of internal variability, which is needed to evaluate the robustness of projected changes (de Elía *et al.*, 2008). In this study, projected changes were established using only two CRCM simulations (AET/AEV). Despite this limitation, comparison between the amplitude of the climate change signal and the difference between the two simulations was achieved to assess the strength of the climate change signal. Future works should consider a larger ensemble of simulations to better capture the natural variability of the climate. Various regional and global climate models could also be considered.

Future work should also study the dynamics of precipitation structures. In this study, each 1-hour precipitation structure was labelled as an individual "object" and characteristics of these objects were analysed. An analysis of the dynamics of precipitation structures could help to better understand, for example, impacts of climate change on storm tracks.

Other aspects are left for future work. First, quantiles other than the median could be studied from the distributions of characteristics (e.g. 95th percentile for extreme values, 25th and 75th percentiles for interquartile range). Next, effects of the RCM convective parameterization have not been assessed here. This parameterization could have an important influence on results for summer

months. Finally, the study could benefit greatly from a finer spatial resolution of RCMs to define precipitation structures with more details and capture smaller structures.

1.8 Acknowledgments

Karine Guinard is grateful for the financial support provided by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and by the "Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies" (FRQNT). The authors would like to thank David Plummer who kindly provided climatic regions masks for North America. The authors also wish to thank Silvia Innocenti who generously offered her expertise and advice in statistics. Finally, the authors are grateful to the anonymous reviewers for their comments that helped to improve this manuscript. CRCM data were generated and supplied by Ouranos. Stage IV data were provided by NCAR/EOL under sponsorship of the National Science Foundation (<http://data.eol.ucar.edu/>).

Références

- AghaKouchak A, Nasrollahi N, Li J, Imam B & Sorooshian S (2011). Geometrical characterization of precipitation patterns. *Journal of Hydrometeorology*, 12(2):274–285. DOI:10.1175/2010JHM1298.1.
- Alexander L, Zhang X, Peterson TC, Caesar J, Gleason B, Klein Tank AMG, Haylock M, Collins D, Trewin B, Rahimzadeh F, Tagipour A, Rupa Kumar K, Revadekar J, Griffiths G, Vincent L, Stephenson DB, Burn J, Aguilar E, Brunet M, Taylor M, New M, Zhai P, Rusticucci M & Vazquez-Aguirre JL (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 111(D5):D05109. DOI:10.1029/2005JD006290.
- Baldwin M (2009). Verification of the time evolution of precipitation systems in numerical weather forecasts. *18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation*. Anderssen R, Braddock R & Newham L (éditeurs), Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand and International Association for Mathematics and Computers in Simulation, pages 4177–4183, Cairns, Australia (13-17 juillet 2009).
- Baldwin M & Lakshmivarahan S (2003). Spatial characterization of rainfall patterns for use in a classification system. *Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks, Volume 13*. Dagli C, Buczak A, Ghosh J, Embrechts M & Ersoy O (éditeurs), ASME Press, pages 683–688, St. Louis, Missouri (novembre 2003).
- Baldwin ME & Elmore KL (2005). Objective verification of high-resolution WRF forecasts during 2005 NSSL/SPC Spring program. *21st Conference on Weather Analysis and Forecasting/17th Conference on Numerical Weather Prediction*, Washington, D.C. (1-5 août 2005).
- Baldwin ME, Kain JS & Lakshmivarahan S (2005). Development of an automated classification procedure for rainfall systems. *Monthly Weather Review*, 133(4):844–862. DOI:10.1175/MWR2892.1.
- Barry RG & Chorley RJ (2010). *Atmosphere, Weather and Climate*. Routledge, London, 9th edition, 516 pages.
- Bengtsson L, Hodges KI & Roeckner E (2006). Storm tracks and climate change. *Journal of Climate*, 19(15):3518–3543. DOI:10.1175/JCLI3815.1.
- Beniston M, Stephenson DB, Christensen OB, Ferro CAT, Frei C, Goyette S, Halsnaes K, Holt T, Jylhä K, Koffi B, Palutikof J, Schöll R, Semmler T & Woth K (2007). Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81(S1):71–95. DOI:10.1007/s10584-006-9226-z.

- Berne A, Delrieu G & Boudevillain B (2009). Variability of the spatial structure of intense Mediterranean precipitation. *Advances in Water Resources*, 32(7):1031–1042. DOI:10.1016/j.advwatres.2008.11.008.
- Betts AK, Zhao M, Dirmeyer PA & Beljaars ACM (2006). Comparison of ERA40 and NCEP/DOE near-surface data sets with other ISLSCP-II data sets. *Journal of Geophysical Research*, 111(D22): D22S04. DOI:10.1029/2006JD007174.
- Blanco-Canqui H & Lal R (2010). *Principles of Soil Conservation and Management*. Springer Netherlands, 617 pages.
- Bosilovich MG, Chen J, Robertson FR & Adler RF (2008). Evaluation of global precipitation in reanalyses. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(9):2279–2299. DOI:10.1175/2008JAMC1921.1.
- Bouwer LM (2011). Have disaster losses increased due to anthropogenic climate change? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(1):39–46. DOI:10.1175/2010BAMS3092.1.
- Brooks HE & Stensrud DJ (2000). Climatology of heavy rain events in the United States from hourly precipitation observations. *Monthly Weather Review*, 128(4):1194–1201. DOI:10.1175/1520-0493(2000)128<1194:COHREI>2.0.CO;2.
- Brown BG & Bullock RR (2007). Application of the MODE object-based verification tool for the evaluation of model precipitation fields. *22nd Conference on Weather Analysis and Forecasting/18th Conference on Numerical Weather Prediction*, American Meteorological Society, Park City, UT (25–29 juin 2007).
- Bryan F, Kauffman BG, Large WG & Gent PR (1996). *The NCAR CSM flux coupler*. NCAR Technical Note NCAR/TN-424+STR, 50 pages.
- Casati B, Wilson LJ, Stephenson DB, Nurmi P, Ghelli A, Pocerich M, Damrath U, Ebert EE, Brown BG & Mason S (2008). Forecast verification: current status and future directions. *Meteorological Applications*, 15(1):3–18. DOI:10.1002/met.52.
- Caya D & Biner S (2004). Internal variability of RCM simulations over an annual cycle. *Climate Dynamics*, 22(1):33–46. DOI:10.1007/s00382-003-0360-2.
- Caya D & Laprise R (1999). A semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model: the Canadian RCM. *Monthly Weather Review*, pages 341–362.
- Changnon SA (2005). Economic impacts of climate conditions in the United States: past, present, and future. *Climatic Change*, 68(1-2):1–9. DOI:10.1007/s10584-005-1673-4.
- Changnon SA, Pielke RA, Changnon D, Sylves RT & Pulwarty R (2000). Human factors explain the increased losses from weather and climate extremes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3):437–442. DOI:10.1175/1520-0477(2000)081<0437:HFETIL>2.3.CO;2.
- Chen M, Mao H, Talbot R & Pollard D (2005). Changes in precipitation characteristics over North America for doubled CO₂. *Geophysical Research Letters*, 32(19):L19716. DOI:10.1029/2005GL024535.
- Chen M, Pollard D & Barron E (2003). Comparison of future climate change over North America simulated by two regional models. *Journal of Geophysical Research*, 108(D12):4348. DOI:10.1029/2002JD002738.

- Choi J, Olivera F & Socolofsky SA (2009). Storm identification and tracking algorithm for modeling of rainfall fields using 1-h NEXRAD rainfall data in Texas. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(7):721–730. DOI:10.1061/(ASCE)1084-0699(2009)14:7(721).
- Cohen J (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Lawrence Erlbaum Associates, second edition, 567 pages.
- Crane R (1979). Automatic cell detection and tracking. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 17(4):250–262. DOI:10.1109/TGE.1979.294654.
- Dai A, Wigley T & Boville B (2001). Climates of the twentieth and twenty-first centuries simulated by the NCAR climate system model. *Journal of Climate*, pages 485–519.
- Davis CA, Brown BG & Bullock RR (2006a). Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas. *Monthly Weather Review*, 134(7):1772–1784. DOI:10.1175/MWR3145.1.
- Davis CA, Brown BG & Bullock RR (2006b). Object-based verification of precipitation forecasts. Part II: Application to convective rain systems. *Monthly Weather Review*, 134(7):1785–1795. DOI:10.1175/MWR3146.1.
- de Elía R, Biner S & Frigon A (2013). Interannual variability and expected regional climate change over North America. *Climate Dynamics*, pages 1–23. DOI:10.1007/s00382-013-1717-9.
- de Elía R, Caya D, Côté H, Frigon A, Biner S, Giguère M, Paquin D, Harvey R & Plummer D (2008). Evaluation of uncertainties in the CRCM-simulated North American climate. *Climate Dynamics*, 30(2-3):113–132. DOI:10.1007/s00382-007-0288-z.
- de Elía R & Côté H (2010). Climate and climate change sensitivity to model configuration in the Canadian RCM over North America. *Meteorologische Zeitschrift*, 19(4):325–339. DOI:10.1127/0941-2948/2010/0469.
- Deser C, Knutti R, Solomon S & Phillips AS (2012). Communication of the role of natural variability in future North American climate. *Nature Climate Change*, 2(11):775–779. DOI:10.1038/nclimate1562.
- Deser C, Phillips A, Bourdette V & Teng H (2010). Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability. *Climate Dynamics*, 38(3-4):527–546. DOI:10.1007/s00382-010-0977-x.
- Di Luca A, de Elía R & Laprise R (2011). Potential for added value in precipitation simulated by high-resolution nested Regional Climate Models and observations. *Climate Dynamics*, 38(5-6):1229–1247. DOI:10.1007/s00382-011-1068-3.
- Dixon M & Wiener G (1993). TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting - a radar-based methodology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 10(6):785–797. DOI:10.1175/1520-0426(1993)010<0785:TTITAA>2.0.CO;2.
- Dominguez F, Rivera E, Lettenmaier DP & Castro CL (2012). Changes in winter precipitation extremes for the western United States under a warmer climate as simulated by regional climate models. *Geophysical Research Letters*, 39(5). DOI:10.1029/2011GL050762.
- Ebert EE & McBride J (2000). Verification of precipitation in weather systems: determination of systematic errors. *Journal of Hydrology*, 239(1-4):179–202. DOI:10.1016/S0022-1694(00)00343-7.

- Ebert EE, Wilson LJ, Brown BG, Nurmi P, Brooks HE, Bally J & Jaeneke M (2004). Verification of nowcasts from the WWRP Sydney 2000 forecast demonstration project. *Weather and Forecasting*, 19(1):73–96. DOI:10.1175/1520-0434(2004)019<0073:VONFTW>2.0.CO;2.
- Environnement Canada (2004). Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada. Institut national de recherche scientifique, Rapport no 3, Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE et Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC. Burlington, Ontario, 148 pages.
- Environnement Canada (2013). *Modélisation et analyse climatique*. <http://www.ec.gc.ca/ccmac-ccma>. (Consulté le 7 novembre 2013).
- Fagerland MW & Sandvik L (2009). The Wilcoxon-Mann-Whitney test under scrutiny. *Statistics in medicine*, 28(10):1487–97. DOI:10.1002/sim.3561.
- Flato GM (2011). Earth system models: an overview. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6):783–800. DOI:10.1002/wcc.148.
- Flato GM & Boer GJ (2001). Warming asymmetry in climate change simulations. *Geophysical Research Letters*, 28(1):195–198. DOI:10.1029/2000GL012121.
- Flato GM, Boer GJ, Lee WG, McFarlane N, Ramsden D, Reader MC & Weaver AJ (2000). The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis global coupled model and its climate. *Climate Dynamics*, 16(6):451–467. DOI:10.1007/s003820050339.
- Fowler HJ, Ekström M, Blenkinsop S & Smith AP (2007). Estimating change in extreme European precipitation using a multimodel ensemble. *Journal of Geophysical Research*, 112(D18):D18104. DOI:10.1029/2007JD008619.
- Frei C, Schöll R, Fukutome S, Schmidli J & Vidale PL (2006). Future change of precipitation extremes in Europe: intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of Geophysical Research*, 111(D6):D06105. DOI:10.1029/2005JD005965.
- Fulton RA, Breidenbach JP, Seo DJ, Miller DA & O'Bannon T (1998). The WSR-88D rainfall algorithm. *Weather and Forecasting*, 13(2):377–395. DOI:10.1175/1520-0434(1998)013<0377:TWRA>2.0.CO;2.
- Geerts B (1998). Mesoscale convective systems in the Southeast United States during 1994–95: a survey. *Weather and Forecasting*, 13(3):860–869. DOI:10.1175/1520-0434(1998)013<0860:MCSITS>2.0.CO;2.
- Gilleland E, Ahijevych DA, Brown BG, Casati B & Ebert EE (2009). Intercomparison of spatial forecast verification methods. *Weather and Forecasting*, 24(5):1416–1430. DOI:10.1175/2009WAF2222269.1.
- Gilleland E, Ahijevych DA, Brown BG & Ebert EE (2010). Verifying forecasts spatially. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(10):1365–1373. DOI:10.1175/2010BAMS2819.1.
- GLOBE Task Team and others (1999). The Global Land One-kilometer Base Elevation (GLOBE) digital elevation model. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center. 325 Broadway, Boulder, Colorado 80305-3328, U.S.A. Digital database on the World Wide Web (URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html>) and CD-ROMs.

- Haralick RM & Shapiro LG (1992). *Computer and robot vision, volume I*. Addison-Wesley, Reading, MA, 672 pages.
- Harris I, Jones P, Osborn T & Lister D (2013). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 dataset. *International Journal of Climatology*. DOI:10.1002/joc.3711.
- Hartung J, Knapp G & Sinha BK (2008). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Wiley Series in Probability and Statistics. Wiley, Hoboken, New Jersey, 248 pages.
- Hawkins E (2011). Our evolving climate: communicating the effects of climate variability. *Weather*, 66(7):175–179. DOI:10.1002/wea.761.
- Hawkins E & Sutton R (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8):1095–1107. DOI:10.1175/2009BAMS2607.1.
- Hawkins E & Sutton R (2010). The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate Dynamics*, 37(1-2):407–418. DOI:10.1007/s00382-010-0810-6.
- Houze R (1997). Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological paradox? *Bulletin of the American Meteorological Society*, pages 2179–2196.
- Houze RA, Smull BF & Dodge P (1990). Mesoscale organization of springtime rainstorms in Oklahoma. *Monthly Weather Review*, 118(3):613–654. DOI:10.1175/1520-0493(1990)118<0613:MOOSRI>2.0.CO;2.
- IPCC (2000). *Special report on emissions scenarios. A special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Nakicenovic N & Swart R (éditeurs). Cambridge University Press, New York, NY, 599 pages.
- IPCC (2001). *Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Houghton J, Ding Y, Griggs D, Noguer M, van der Linden P, Dai X, Maskell K & Johnson C (éditeurs). Cambridge University Press, New York, NY, 881 pages.
- IPCC (2007). *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K, Tignor M & Miller H (éditeurs). Cambridge University Press, New York, NY, 996 pages.
- IPCC (2013a). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker T, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V & Midgley P (éditeurs). Cambridge University Press, New York, NY.
- IPCC (2013b). *Organization*. <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml>. (Consulté le 29 octobre 2013).
- Jiao Y & Caya D (2006). An investigation of summer precipitation simulated by the Canadian Regional Climate Model. *Monthly Weather Review*, 134(3):919–932. DOI:10.1175/MWR3103.1.

- Johnson JT, MacKeen PL, Witt A, Mitchell EDW, Stumpf GJ, Eilts MD & Thomas KW (1998). The Storm Cell Identification and Tracking algorithm: an enhanced WSR-88D algorithm. *Weather and Forecasting*, 13(2):263–276. DOI:10.1175/1520-0434(1998)013<0263:TSCIAT>2.0.CO;2.
- Jolliffe IT & Stephenson DB (2012). *Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science*. Wiley, Chichester, 292 pages.
- Jones PW (1999). First- and second-order conservative remapping schemes for grids in spherical coordinates. *Monthly Weather Review*, 127(9):2204–2210. DOI:10.1175/1520-0493(1999)127<2204:FASOCR>2.0.CO;2.
- Kharin V, Zwiers FW, Zhang X & Hegerl GC (2007). Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of Global Coupled Model simulations. *Journal of Climate*, 20(8): 1419–1444. DOI:10.1175/JCLI4066.1.
- Knutti R & Sedláček J (2012). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3(4):369–373. DOI:10.1038/nclimate1716.
- Lakshmanan V & Smith T (2009). Data mining storm attributes from spatial grids. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(11):2353–2365. DOI:10.1175/2009JTECHA1257.1.
- Laprise R (2008). Regional climate modelling. *Journal of Computational Physics*, 227(7):3641–3666. DOI:10.1016/j.jcp.2006.10.024.
- Light A & Bartlein PJ (2004). The end of the rainbow? Color schemes for improved data graphics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 85(40):385. DOI:10.1029/2004EO400002.
- Lin Y & Mitchell K (2005). The NCEP Stage II/IV hourly precipitation analyses: development and applications. *19th Conference on Hydrology*, American Meteorological Society, San Diego, CA (9-13 janvier 2005).
- Lucas-Picher P, Caya D, de Elía R & Laprise R (2008). Investigation of regional climate models' internal variability with a ten-member ensemble of 10-year simulations over a large domain. *Climate Dynamics*, 31(7-8):927–940. DOI:10.1007/s00382-008-0384-8.
- Luterbacher J, Liniger MA, Menzel A, Estrella N, Della-Marta PM, Pfister C, Rutishauser T & Xoplaki E (2007). Exceptional European warmth of autumn 2006 and winter 2007: historical context, the underlying dynamics, and its phenological impacts. *Geophysical Research Letters*, 34(12):L12704. DOI:10.1029/2007GL029951.
- Maddox R (1980). Mesoscale convective complexes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 61(11):1374–1387.
- Mailhot A, Beauregard I, Talbot G, Caya D & Biner S (2012). Future changes in intense precipitation over Canada assessed from multi-model NARCCAP ensemble simulations. *International Journal of Climatology*, 32(8):1151–1163. DOI:10.1002/joc.2343.
- Mailhot A & Duchesne S (2010). Design criteria of urban drainage infrastructures under climate change. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(2):201–208. DOI:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000023.
- May W (2007). Potential future changes in the characteristics of daily precipitation in Europe simulated by the HIRHAM regional climate model. *Climate Dynamics*, 30(6):581–603. DOI:10.1007/s00382-007-0309-y.

- McAnelly RL & Cotton WR (1989). The precipitation life cycle of mesoscale convective complexes over the Central United States. *Monthly Weather Review*, 117(4):784–808. DOI:10.1175/1520-0493(1989)117<0784:TPLCOM>2.0.CO;2.
- Meehl GA, Arblaster JM & Tebaldi C (2005). Understanding future patterns of increased precipitation intensity in climate model simulations. *Geophysical Research Letters*, 32(18):L18719. DOI:10.1029/2005GL023680.
- Mladjic B, Sushama L, Khaliq MN, Laprise R, Caya D & Roy R (2011). Canadian RCM projected changes to extreme precipitation characteristics over Canada. *Journal of Climate*, 24(10):2565–2584. DOI:10.1175/2010JCLI3937.1.
- Monette A, Sushama L, Khaliq MN, Laprise R & Roy R (2012). Projected changes to precipitation extremes for northeast Canadian watersheds using a multi-RCM ensemble. *Journal of Geophysical Research*, 117(D13):D13106. DOI:10.1029/2012JD017543.
- Mukheibir P (2013). Potential consequences of projected climate change impacts on hydroelectricity generation. *Climatic Change*, 121(1):67–78. DOI:10.1007/s10584-013-0890-5.
- Music B & Caya D (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. DOI:10.1175/JHM627.1.
- Musy A & Higy C (2004). *Hydrologie: Une science de la nature*. Collection G{é}rer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Orlanski I (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56:527–530.
- Panthou G, Mailhot A, Laurence E & Talbot G (2014). Relationship between surface temperature and extreme rainfalls: a multi-timescale and event-based analysis. *Manuscrit soumis pour publication au Journal of Hydrometeorology*.
- Paquin D (2010). *Évaluation du MRCC4 en passé récent (1961-1999)*. Numéro 15. Ouranos, Équipe Simulations climatiques, Rapport interne no 15, 61 pages.
- Peterson TC, Zhang X, Brunet-India M & Vázquez-Aguirre JL (2008). Changes in North American extremes derived from daily weather data. *Journal of Geophysical Research*, 113(D7):D07113. DOI:10.1029/2007JD009453.
- Plummer DA, Caya D, Frigon A, Côté H, Giguère M, Paquin D, Biner S, Harvey R & de Elía R (2006). Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. *Journal of Climate*, 19(13):3112–3132. DOI:10.1175/JCLI3769.1.
- Scinocca JF, McFarlane N, Lazare M, Li J & Plummer D (2008). Technical Note: The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(23):7055–7074. DOI:10.5194/acp-8-7055-2008.
- Shapiro LG & Stockman GC (2001). *Computer vision*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Skovlund E & Fenstad GU (2001). Should we always choose a nonparametric test when comparing two apparently nonnormal distributions? *Journal of Clinical Epidemiology*, 54(1):86–92. DOI:10.1016/S0895-4356(00)00264-X.

- Sobolowski S & Pavelsky T (2012). Evaluation of present and future North American Regional Climate Change Assessment Program (NARCCAP) regional climate simulations over the southeast United States. *Journal of Geophysical Research*, 117(D1):D01101. DOI:10.1029/2011JD016430.
- Steinacker R, Dorninger M, Wölfelmaier F & Krennert T (2000). Automatic tracking of convective cells and cell complexes from lightning and radar data. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 110:101–110.
- Sun Y, Solomon S, Dai A & Portmann RW (2006). How often does it rain? *Journal of Climate*, 19(6):916–934. DOI:10.1175/JCLI3672.1.
- Sun Y, Solomon S, Dai A & Portmann RW (2007). How often will it rain? *Journal of Climate*, 20(19):4801–4818. DOI:10.1175/JCLI4263.1.
- Sushama L, Laprise R, Caya D, Frigon A & Slivitzky M (2006). Canadian RCM projected climate-change signal and its sensitivity to model errors. *International Journal of Climatology*, 26(15): 2141–2159. DOI:10.1002/joc.1362.
- Tebaldi C, Hayhoe K, Arblaster JM & Meehl GA (2006). Going to the extremes. *Climatic Change*, 79(3-4):185–211. DOI:10.1007/s10584-006-9051-4.
- Trenberth KE (1999). Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. *Climatic Change*, 42(1):327–339. DOI:10.1023/A:1005488920935.
- Trenberth KE (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1):123–138. DOI:10.3354/cr00953.
- Trenberth KE, Dai A, Rasmussen RM & Parsons DB (2003). The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9):1205–1217. DOI:10.1175/BAMS-84-9-1205.
- Uppala SM, Kållberg PW, Simmons AJ, Andrae U, Bechtold VDC, Fiorino M, Gibson JK, Haseler J, Hernandez A, Kelly GA, Li X, Onogi K, Saarinen S, Sokka N, Allan RP, Andersson E, Arpe K, Balmaseda MA, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Caires S, Chevallier F, Dethof A, Dragosavac M, Fisher M, Fuentes M, Hagemann S, Hólm E, Hoskins BJ, Isaksen I, Janssen PAEM, Jenne R, McNally AP, Mahfouf JF, Morcrette JJ, Rayner NA, Saunders RW, Simon P, Sterl A, Trenberth KE, Untch A, Vasiljevic D, Viterbo P & Woollen J (2005). The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(612):2961–3012. DOI:10.1256/qj.04.176.
- Vincent LA & Mekis E (2006). Changes in daily and extreme temperature and precipitation indices for Canada over the twentieth century. *Atmosphere-Ocean*, 44(2):177–193. DOI:10.3137/ao.440205.
- Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt GC, Kram T, Krey V, Lamarque JF, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith SJ & Rose SK (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1-2):5–31. DOI:10.1007/s10584-011-0148-z.
- Wehner MF (2012). Very extreme seasonal precipitation in the NARCCAP ensemble: model performance and projections. *Climate Dynamics*, 40(1-2):59–80. DOI:10.1007/s00382-012-1393-1.

- Westrick KJ, Mass CF & Colle BA (1999). The limitations of the WSR-88D radar network for quantitative precipitation measurement over the coastal western United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(11):2289–2298. DOI:10.1175/1520-0477(1999)080<2289:TLOTWR>2.0.CO;2.
- Whiteman D (2000). *Mountain meteorology: fundamentals and applications*. Oxford University Press, New York, NY, 355 pages.
- Wilks DS (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic Press, 676 pages.
- Wu Y, Ting M, Seager R, Huang HP & Cane MA (2010). Changes in storm tracks and energy transports in a warmer climate simulated by the GFDL CM2.1 model. *Climate Dynamics*, 37(1-2):53–72. DOI:10.1007/s00382-010-0776-4.
- Yau N (2011). *Visualize this: the FlowingData guide to design, visualization, and statistics*. Wiley, Indianapolis, IN, 358 pages.
- Zanis P, Kapsomenakis I, Philandras C, Douvis K, Nikolakis D, Kanellopoulou E, Zerefos C & Repapis C (2009). Analysis of an ensemble of present day and future regional climate simulations for Greece. *International Journal of Climatology*, 29(11):1614–1633. DOI:10.1002/joc.1809.
- Zhang X, Vincent LA, Hogg W & Niitsoo A (2000). Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century. *Atmosphere-Ocean*, 38(3):395–429. DOI:10.1080/07055900.2000.9649654.
- Zwiers FW & Kharin V (1998). Changes in the extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO₂ doubling. *Journal of Climate*, 11(9):2200–2222. DOI:10.1175/1520-0442(1998)011<2200:CITEOT>2.0.CO;2.

Annexe A

Résultats complémentaires sur la performance du modèle climatique

Les figures présentées dans cette annexe visent à compléter les résultats de la section 4.2 concernant la performance du modèle climatique. Sous forme cartographique, ils offrent une autre perspective sur les résultats obtenus.

A.1 Différences entre AGO et ST4

Dans cette section, les cartes illustrent les différences entre la simulation AGO (MRCC piloté réanalyse) et les observations ST4. Ces différences donnent des indications quant à l'effet de la physique et de la dynamique internes du modèle sur la performance du MRCC à représenter les structures de précipitations observées. Pour présenter un portrait saisonnier, quatre mois de l'année ont été sélectionnés : janvier, avril, juillet et octobre (correspondant chacun à une figure). Au sein de chaque figure, quatre caractéristiques principales sont exposées (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie).

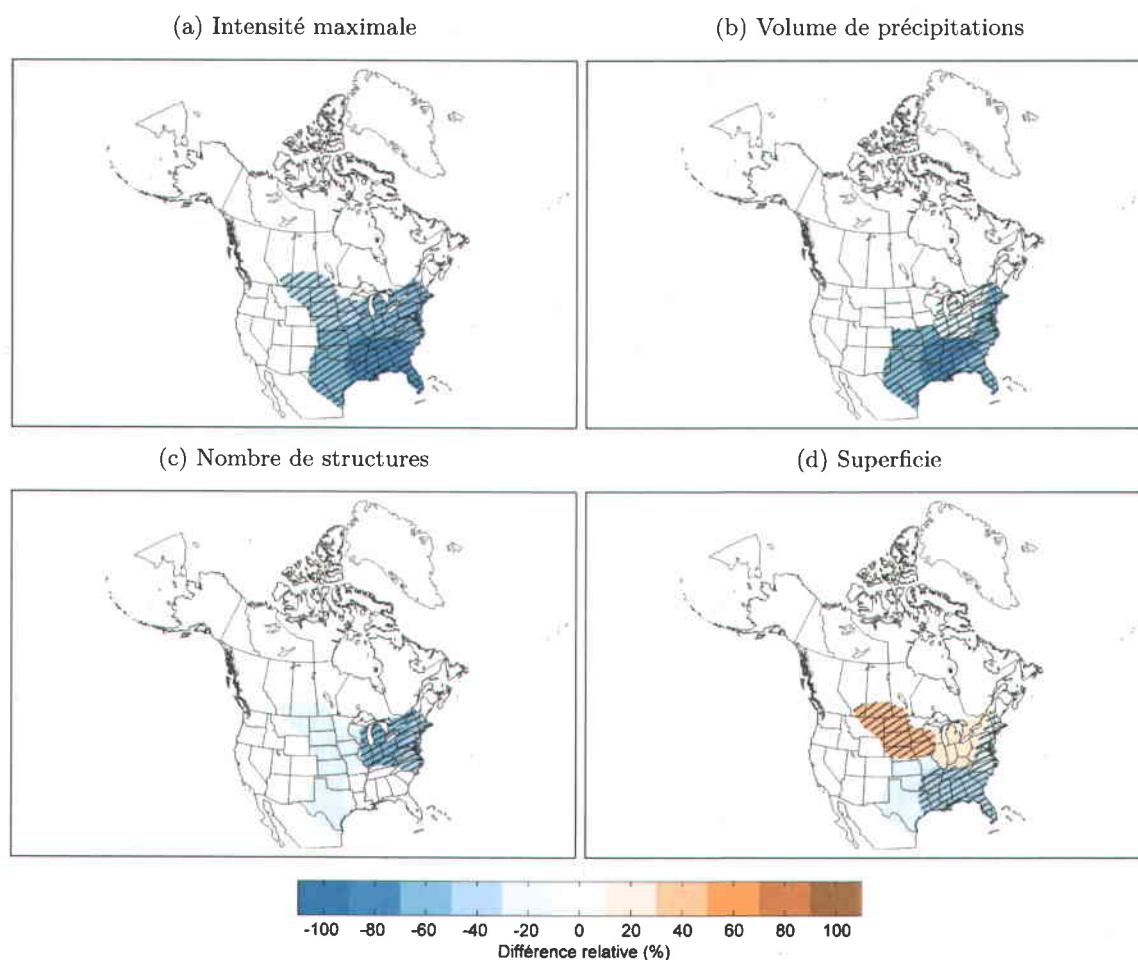


Figure A.1 – Différences relatives entre AGO et ST4 des caractéristiques moyennes des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois de janvier entre les périodes 2002-2011 et 1992-2001. Les zones hachurées indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).

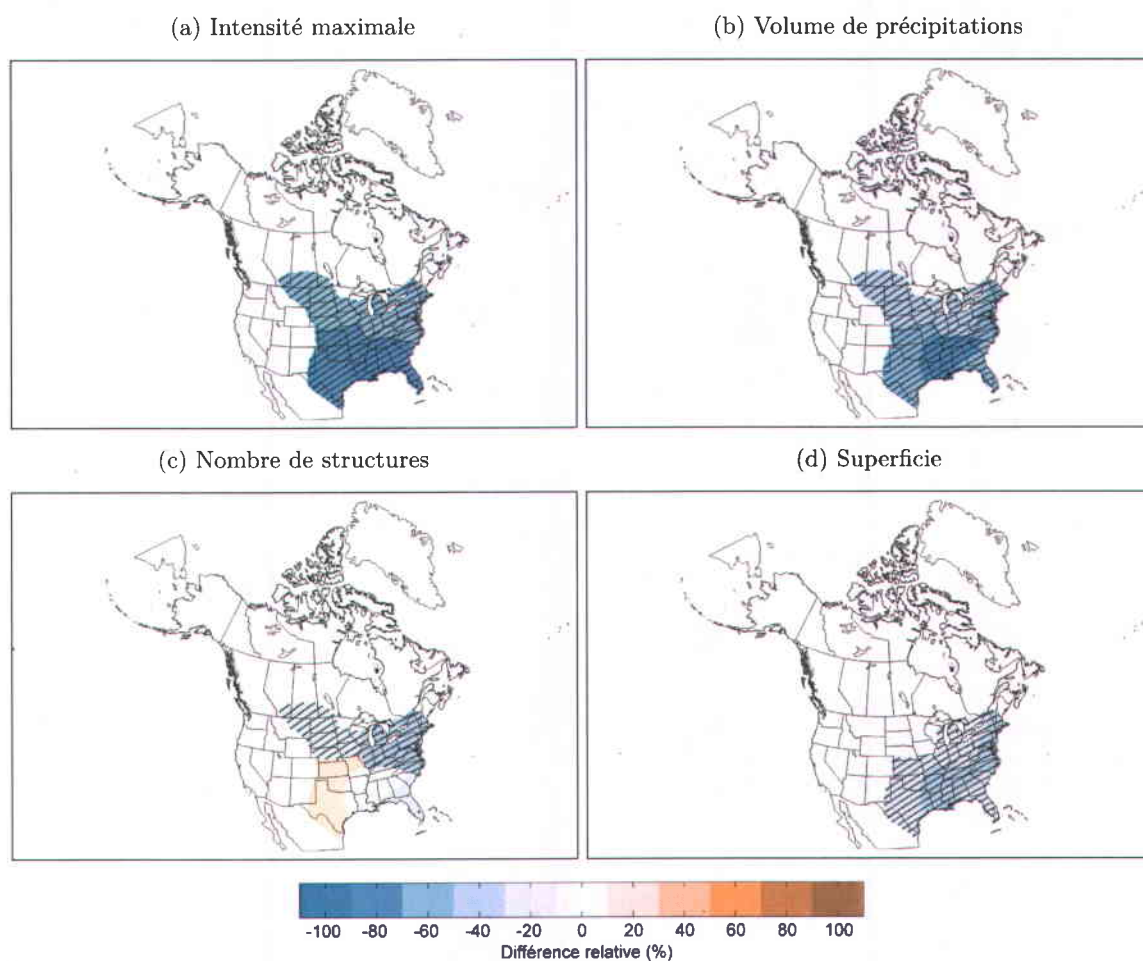


Figure A.2 – Différences relatives entre AGO et ST4 des caractéristiques moyennes des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois d'avril entre les périodes 2002-2011 et 1992-2001. Les zones hachurées indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).

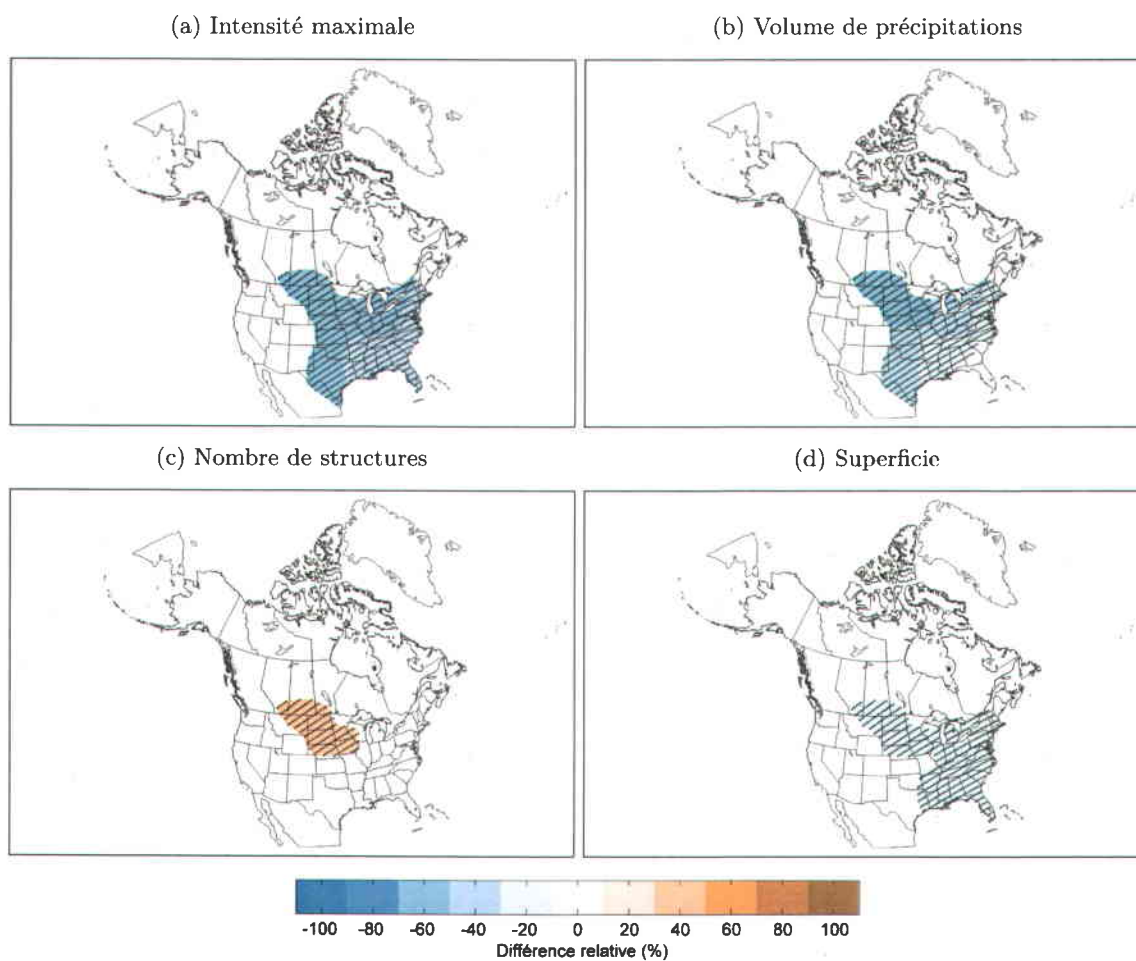


Figure A.3 – Différences relatives entre AGO et ST4 des caractéristiques moyennes des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois de juillet entre les périodes 2002-2011 et 1992-2001. Les zones hachurées indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).

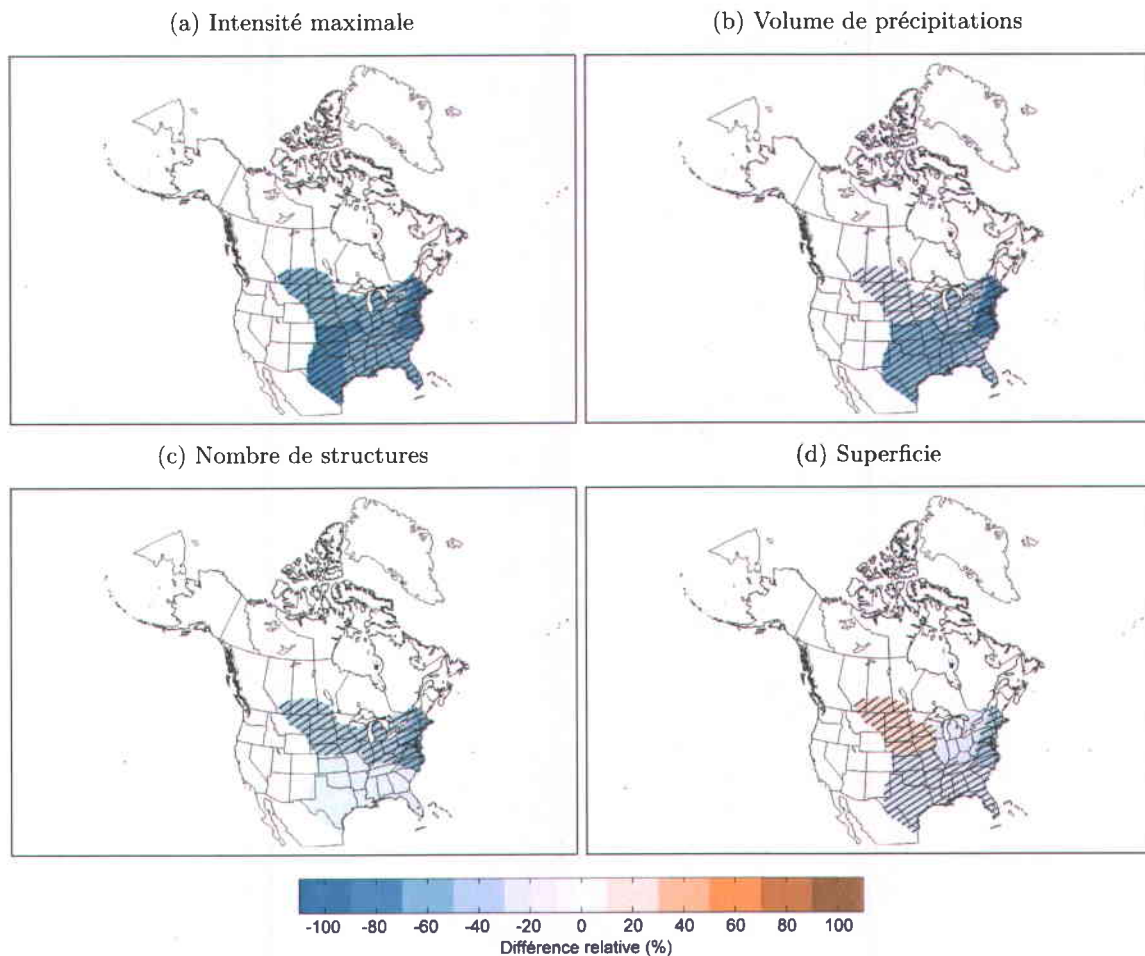


Figure A.4 – Différences relatives entre AGO et ST4 des caractéristiques moyennes des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois d'octobre entre les périodes 2002-2011 et 1992-2001. Les zones hachurées indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).

A.2 Différences entre AET/AEV et AGO

Dans cette section, les différences illustrées sont associées à la comparaison entre les simulations AET/AET (MRCC piloté MCGC) et la simulation AGO (MRCC piloté réanalyse). Les différences illustrent l'effet du pilote aux frontières du modèle sur la performance du MRCC à représenter les structures de précipitations. Chaque carte résume les résultats en considérant la moyenne des différences AET-AGO et AEV-AGO. Tout comme à la section précédente, quatre mois de l'année ont été sélectionnés : janvier, avril, juillet et octobre (correspondant chacun à une figure) et quatre caractéristiques principales sont exposées (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) dans chaque figure.

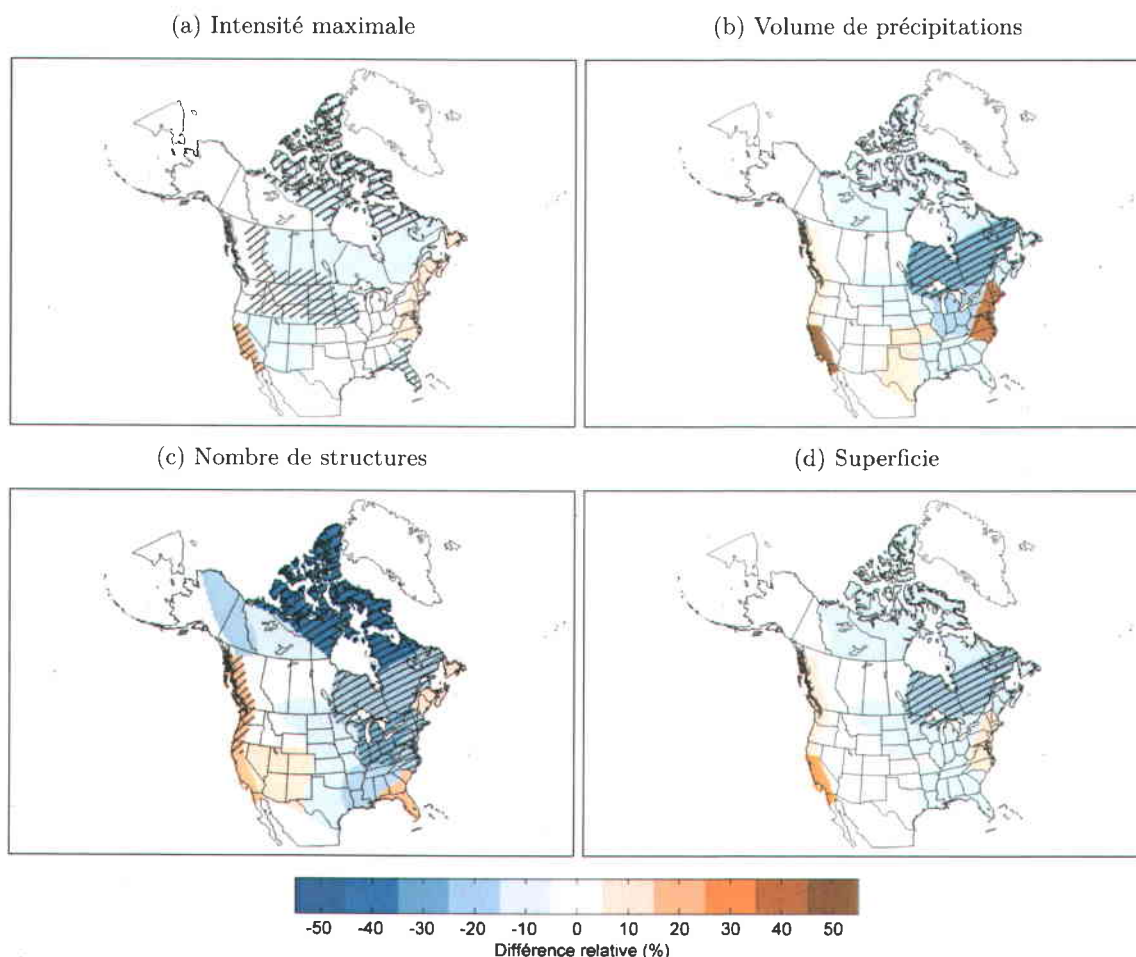


Figure A.5 – Différences relatives entre AET/AEV et AGO des caractéristiques moyennes des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois de janvier pour la période 1961-1990. Les différences indiquées correspondent à la moyenne des différences AET-AGO et AEV-AGO. Les zones hachurées indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).

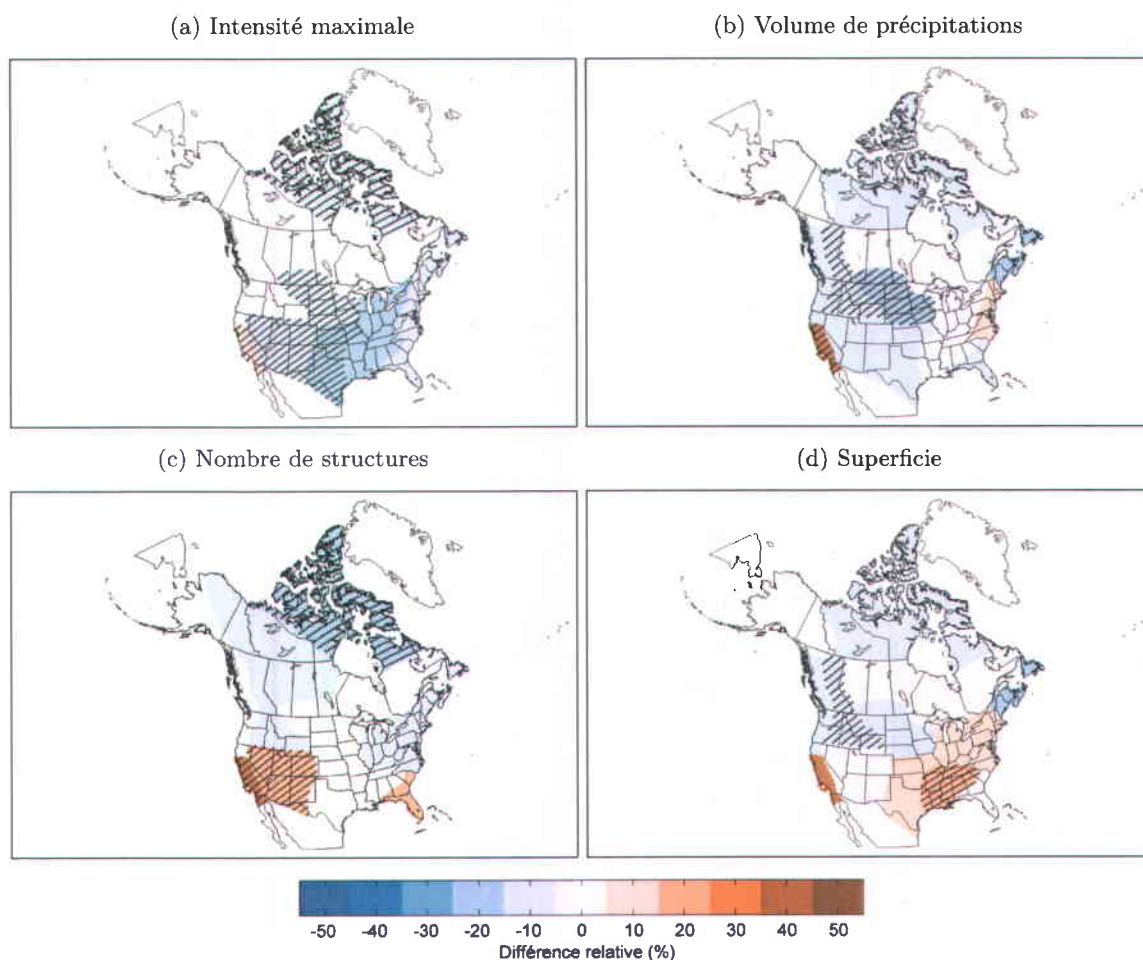


Figure A.6 – Différences relatives entre AET/AEV et AGO des caractéristiques moyennes des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois d'avril pour la période 1961-1990. Les différences indiquées correspondent à la moyenne des différences AET-AGO et AEV-AGO. Les zones hachurées indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).

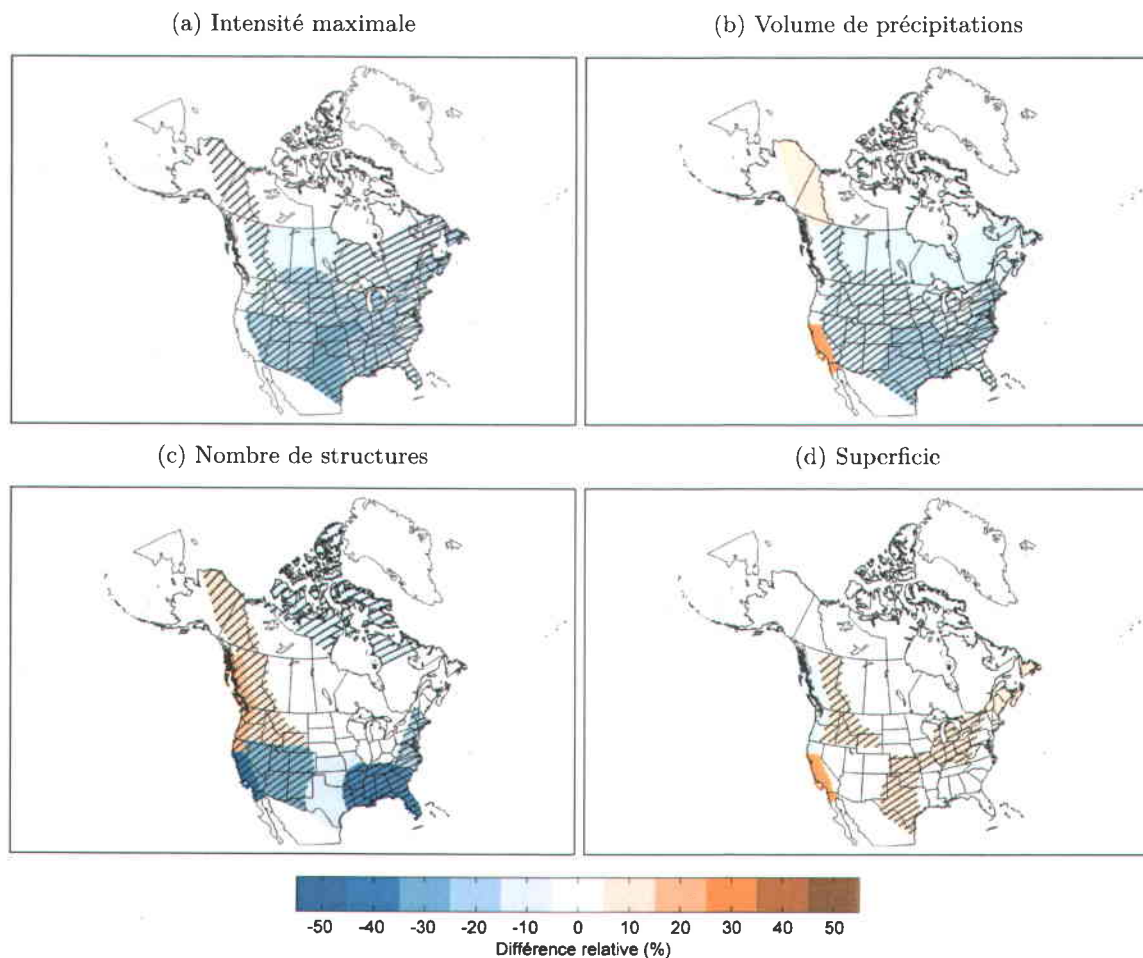


Figure A.7 – Différences relatives entre AET/AEV et AGO des caractéristiques moyennes des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois de juillet pour la période 1961-1990. Les différences indiquées correspondent à la moyenne des différences AET-AGO et AEV-AGO. Les zones hachurées indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).

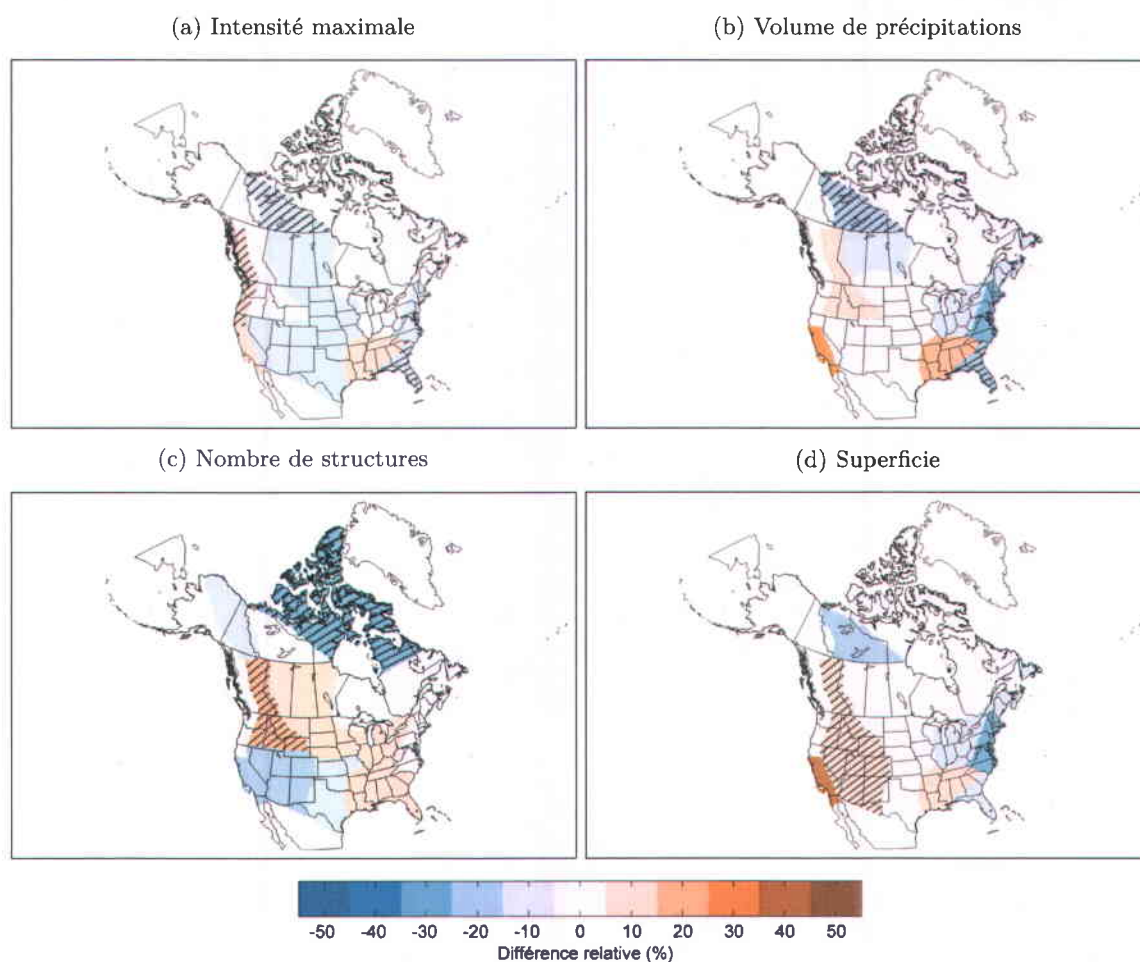


Figure A.8 – Différences relatives entre AET/AEV et AGO des caractéristiques moyennes des structures de précipitations (intensité maximale, volume de précipitations, nombre de structures et superficie) pour le mois d'octobre pour la période 1961-1990. Les différences indiquées correspondent à la moyenne des différences AET-AGO et AEV-AGO. Les zones hachurées indiquent une différence statistiquement significative selon le test de Welch (niveau de confiance de 95 %).

