

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉVALUATION DES SIMULATIONS DE LA VERSION 5 DU MODÈLE  
RÉGIONAL CANADIEN DU CLIMAT (MRCC5) PAR LES ANALYSES DE  
PRÉCIPITATION STAGE IV SUR L'EST DES ÉTATS-UNIS

MÉMOIRE PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ATMOSPHÈRE

PAR  
MAMADOU INSA DIOP

Décembre 2014

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

Je remercie mes encadreurs, les professeurs René LAPRISE et Enrico TORLASCHI, pour leur rigueur scientifique, et aussi pour leurs conseils. Je remercie le Centre ESCER pour les soutiens financier et logistique qui m'ont permis de mener à bien ce projet. Je remercie aussi Katia WINGER, Nadjet LABASSI, Oumarou NIKÉMA, André Martynov et Georges HUARD pour leur soutien informatique, et l'ensemble du corps professoral et les étudiants en maîtrise.

Je ne peux m'empêcher de remercier Éva Rosa MONTEIRO pour ses nombreux conseils. Merci également à mon épouse, Issimatou DIALLO, et ma famille qui m'ont beaucoup soutenu moralement, et à El Hadj DIALLO, Fatoumata Binta Diallo, Abdellah BOUJANNAH et sa famille pour m'avoir bien accueilli au Canada.

## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES .....	v
LISTE DES ACRONYMES .....	viii
LISTE DES SYMBOLES .....	ix
RÉSUMÉ .....	x
CHAPITRE I	
INTRODUCTION .....	11
CHAPITRE II	
DONNÉES ET MÉTHODES D'ANALYSE .....	20
2.1 Données d'observations .....	20
2.1.1 Stage IV .....	20
2.1.2 CPC.....	21
2.1.3 TRMM .....	22
2.2 Simulations du modèle MRCC5 .....	22
2.2.1 Description du modèle .....	22
2.2.2 Configuration des simulations.....	24
2.3 Méthodologie .....	25
2.3.1 Domaine d'étude et sous-domaines étudiés .....	25
2.3.2 Méthodes d'analyse .....	26
CHAPITRE III	
RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS .....	36
3.1 Échantillon de climatologie .....	36
3.1.1 Comparaison des trois bases de données.....	37
3.1.2 Comparaison des précipitations simulées avec les bases d'analyse des observations.....	39
3.2 Évolution des cycles diurnes .....	41
3.3 Distribution de fréquence des précipitations horaires.....	44
3.4 Distribution spatiotemporelle du nombre moyen de jours humides.....	46
3.4.1 Seuil 1 mm .....	46

3.4.2 Seuil 2 mm .....	48
3.4.3 Seuil 3 mm .....	50
3.5 Durée moyenne des évènements pluvieux .....	51
3.5.1 Seuil 1 mm .....	51
3.5.2 Seuil 2 mm .....	53
3.5.3 Seuil 3 mm .....	53
CONCLUSION .....	56
ANNEXES	
Annexe I: Comparaison des valeurs du nombre moyen de jour humides calculés avec les données Stage IV avec celles des données CPC et TRMM .....	85
Annexe II: Diagramme de Taylor Diagramme de Taylor sur les statistiques du nombre moyen de jours humides observés.....	92
RÉFÉRENCES .....	94

## LISTE DES FIGURES

Figure		Page
2.1	Champs de précipitation valide le 15 juillet 2002 à 00Z pour les estimations horaires Stage IV.....	30
2.2	Les domaines des RFC.....	31
2.3	Champs de précipitation valide le 15 juillet 2002 pour les estimations journalières CPC.....	32
2.4	Champs de précipitation valide le 15 juillet 2002 pour les estimations 3-horaires TRMM.....	33
2.5	Champs de précipitation valide le 15 juillet 2002 à 00Z pour les sorties horaires des précipitations simulées par le MRCC5.....	34
2.6	Domaine et sous-domaines étudiés.....	35
3.1	Comparaison entre les précipitations moyennes saisonnières (en mm/day) estimées par CPC (1 <sup>ère</sup> colonne), TRMM (2 <sup>e</sup> colonne), et Stage IV (3 <sup>e</sup> colonne) et simulées par MRCC5 (4 <sup>e</sup> colonne) durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'années.....	60
3.2	Différences absolues (en mm/day) entre CPC et TRMM (1 <sup>ère</sup> colonne), CPC et Stage IV (2 <sup>e</sup> colonne) et Stage IV et TRMM (3 <sup>e</sup> colonne) pour les précipitations moyennes saisonnières durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'années.....	61
3.3	Différences relatives (en %) entre CPC et TRMM (1 <sup>ère</sup> colonne), CPC et Stage IV (2 <sup>e</sup> colonne) et Stage IV et TRMM (3 <sup>e</sup> colonne) pour les précipitations moyennes saisonnières durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'années.....	62
3.4	Diagramme de Taylor sur les statistiques des précipitations moyennes saisonnières sur la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.....	63
3.5	Différences absolues (en mm/day) entre MRCC5 et CPC (1 <sup>ère</sup> colonne), MRCC5 et TRMM (2 <sup>e</sup> colonne) et MRCC5 et Stage IV (3 <sup>e</sup> colonne) pour les précipitations moyennes saisonnières durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'années.....	64
3.6	Différences relatives (en %) entre MRCC5 et CPC (1 <sup>ère</sup> colonne), MRCC5 et TRMM (2 <sup>e</sup> colonne) et MRCC5 et Stage	

	IV (3 <sup>e</sup> colonne) pour les précipitations moyennes saisonnières durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.....	65
3.7	Diagramme de Taylor sur les statistiques des précipitations moyennes saisonnières observées et simulées sur la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.....	66
3.8	Cycles diurnes des précipitations (mm/day) estimées par Stage IV (bleu) et TRMM (vert), et celles simulées par MRCC5 (rouge) dans les différentes sous régions considérées.....	67
3.9	Distributions de fréquences des précipitations horaires estimées par Stage IV (cyan) et celles simulées par MRCC5 (magenta) dans les différentes sous régions.....	68
3.10	Comparaison des nombres moyens de jours humides à seuil 1 mm (days) estimés par CPC (1 <sup>ère</sup> colonne), TRMM (2 <sup>e</sup> colonne) et Stage IV (3 <sup>e</sup> colonne) et simulés par MRCC5 (4 <sup>e</sup> colonne) durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.....	69
3.11	Différences absolues (en days) entre MRCC5 et CPC (1 <sup>ère</sup> colonne), MRCC5 et TRMM (2 <sup>e</sup> colonne) et MRCC5 et Stage IV (3 <sup>e</sup> colonne) sur les statistiques du nombre moyen de jours humides à seuil 1mm durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.....	70
3.12	Différences relatives (en %) entre MRCC5 et CPC (1 <sup>ère</sup> colonne), MRCC5 et TRMM (2 <sup>e</sup> colonne) et MRCC5 et Stage IV (3 <sup>e</sup> colonne) sur les statistiques du nombre moyen de jours humides à seuil 1mm durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.....	71
3.13	Même que la figure 3.10, mais pour un seuil de 2 mm.....	72
3.14	Même que la figure 3.11, mais pour un seuil de 2 mm.....	73
3.15	Même que la figure 3.12, mais pour un seuil de 2 mm.....	74
3.16	Même que la figure 3.10, mais pour un seuil de 3 mm.....	75
3.17	Même que la figure 3.11, mais pour un seuil de 3 mm.....	76
3.18	Même que la figure 3.12, mais pour un seuil de 3 mm.....	77
3.19	Diagramme de Taylor sur les statistiques du nombre moyen de jours pluvieux à seuil 1 mm (1 <sup>ère</sup> colonne), à seuil 2 mm (2 <sup>e</sup> colonne) et à seuil 3 mm (3 <sup>e</sup> colonne) observés et simulés pour la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.....	

	l'année.....	78
3.20	Comparaison de la durée moyenne des précipitations horaires à seuil 1 mm (heures) estimées par Stage IV (1 <sup>ère</sup> colonne) et simulées par MRCC5 (2 <sup>e</sup> colonne) durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.....	79
3.21	Différences absolues en heures (1 <sup>ère</sup> colonne) et relatives en % (2 <sup>e</sup> colonne) entre MRCC5 et Stage IV sur les statistiques de la durée moyenne des précipitations horaires à seuil 1 mm durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.....	80
3.22	Même que la figure 3.20, mais pour un seuil de 2 mm.....	81
3.23	Même que la figure 3.21, mais pour un seuil de 2 mm.....	82
3.24	Même que la figure 3.20, mais pour un seuil de 3 mm.....	83
3.25	Même que la figure 3.21, mais pour un seuil de 3 mm.....	84
AI.1	Différences absolues (en days) entre TRMM et CPC (1 <sup>ère</sup> colonne), CPC et Stage IV (2 <sup>e</sup> colonne) et TRMM et Stage IV (3 <sup>e</sup> colonne) sur les statistiques du nombre moyen de jours humides à seuil 1 mm durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.....	86
AI.2	Différences relatives (en %) entre TRMM et CPC (1 <sup>ère</sup> colonne), CPC et Stage IV (2 <sup>e</sup> colonne) et TRMM et Stage IV (3 <sup>e</sup> colonne) sur les statistiques du nombre moyen de jours humides à seuil 1 mm durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.....	87
AI.3	Même que la figure AI.1, mais pour un seuil de 2 mm.....	88
AI.4	Même que la figure AI.2, mais pour un seuil de 2 mm.....	89
AI.5	Même que la figure AI.1, mais pour un seuil de 3 mm.....	90
AI.6	Même que la figure AI.2, mais pour un seuil de 3 mm.....	91
All.1	Diagramme de Taylor sur les statistiques du nombre moyen de jours pluvieux observés à seuil 1 mm (1 <sup>ère</sup> colonne), à seuil 2 mm (2 <sup>e</sup> colonne) et à seuil 3 mm (3 <sup>e</sup> colonne) durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.....	93

## LISTE DES ACRONYMES

CAPE	Convective Available Potential Energy
Centre ESCER	Centre pour l'Étude et la Simulation du Climat à l'Échelle Régionale
CLASS3.5	Canadian land-surface scheme: version 3.5
CORDEX	COordinated Regional Climate Downscaling EXperiment
CPC	Climate Prediction Center
CRU	Climatic Research Unit
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
Fig.	Figure
GEM	Global Environnemental Multi-échelle
GPCP	Global Precipitation Climatology Project
GPLLJ	Great Plains Low Level Jet
HRAP	Hydrologic Rainfall Analysis Project
MCG	Modèles Climatiques Globaux
MRC	Modèle Régional du Climat
MRCC5	Modèle Régional Canadien du Climat : version 5
MRCC4	Modèle Régional Canadien du Climat : version 4
MRCC3	Modèle Régional Canadien du Climat : version 3
NARCCAP	North American Regional Climate Change Assessment Program
NCDC	National Climate Data Center
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
nmjhs1	nombre moyen de jours humides avec un seuil de 1 mm
nmjhs2	nombre moyen de jours humides avec un seuil de 2 mm
nmjhs3	nombre moyen de jours humides avec un seuil de 3 mm
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PIRCS	Project to Intercompare Regional Simulations
RFC	River Forecast Centers
SO-NE	Sud-ouest – Nord-est
TMPA	TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
UDel	University of Delaware
UQAM	Université du Québec à Montréal
USGS	United States Geological Survey
WSR-88D	Weather Surveillance Radar - 1988 Doppler

## LISTE DES SYMBOLES

$\rho_s$	pression de surface
$R$	coefficient de corrélation spatiale
$d$	écart relatif quadratique moyen centré
$\Gamma$	rapport des écarts types spatiaux
$\Psi$ ou $\phi$	champ de précipitation
$\langle \cdot \rangle$	moyenne spatiale
$\bar{\cdot}$	moyenne temporelle
$T$	nombre total de champs archivés
$I$	nombre total de points suivant les longitudes
$J$	nombre total de points suivant les latitudes
$t$	temps
$\Sigma$	sommation

## RÉSUMÉ

Les analyses de précipitation Stage IV à haute résolution spatiotemporelle (4 km, 1 h) sont utilisées pour évaluer les simulations du modèle MRCC5 piloté par les réanalyses ERA-Interim, sur une période de 11 ans (2002-2012).

Afin d'évaluer la performance des simulations du MRCC5, nous avons comparé les cycles saisonniers, les nombres moyens de jours humides et la durée moyenne des événements précipitants, ainsi que le cycle diurne et la distribution de fréquence des précipitations horaires dans différentes sous-régions du domaine.

Les résultats indiquent que le modèle a eu des difficultés à simuler correctement les précipitations dans certaines régions dont celles où sont situés les maximums de précipitation, présentant des biais humides et secs, selon la région et la saison, de l'ordre de 20-60 %. Il a également des difficultés à capturer les maximums nocturnes des précipitations estivales, surtout dans la sous-région du Centre; le MRCC5 semble avoir des problèmes à bien résoudre les phénomènes responsables de ces importantes précipitations contrairement à ceux responsables des intenses précipitations en fin d'après-midi. Les maximums d'intensité des distributions de fréquences de la simulation du MRCC5 et des analyses Stage IV coïncident généralement, sauf en été et dans la sous-région du Sud où la distribution du modèle a tendance à être décalée vers les faibles intensités. Durant la saison froide, la contribution des faibles intensités de précipitation semble surestimée dans le MRCC5. Ce dernier reproduit presque parfaitement le nombre moyen de jours humides des analyses Stage IV en été. Avec le passage du seuil à 2 mm puis à 3 mm, les différences négatives et positives (20-40 %) deviennent respectivement plus fréquentes dans les régions nord-ouest et au sud de 37° N. Cependant, le modèle a de meilleurs résultats pour les statistiques de la durée moyenne des événements précipitants. Il performe bien dans les régions de précipitations abondantes, surtout en hiver et été où les différences sont généralement négligeables.

## CHAPITRE I

### INTRODUCTION

Au cours des dernières années, la projection du climat futur est devenu un grand défi pour la communauté scientifique. Les scientifiques ont investi beaucoup d'efforts dans le développement de modèles climatiques, et en particulier les modèles climatiques régionaux (MRC), afin qu'ils puissent être plus efficaces et fiables pour évaluer de façon réaliste les changements climatiques prévus. A cet effet, les tests de vérification continuent d'être nécessaires pour évaluer et améliorer la performance des MRC.

Takle et al. (1999) ont étudié la performance de huit modèles régionaux dans le cadre de la première phase du *Project to Intercompare Regional Simulations* (PIRCS). Ils ont montré, par le biais de leurs premiers résultats des simulations de la sécheresse de l'été 1998 sur le centre des États-Unis, que les modèles ont reproduit en général les caractéristiques temporelles et spatiales des variables météorologiques étudiées. En outre, ils ont trouvé que les simulations des modèles dans les épisodes de précipitations dépendent considérablement de l'échelle de la dynamique du forçage. Les modèles participants ont simulé de façon réaliste les précipitations modulées par l'échelle synoptique; les résultats dans les précipitations convectives ou à méso-échelle sont toutefois moins satisfaisants.

Gutowski et al. (2010) ont étudié la capacité de six modèles régionaux à reproduire les précipitations mensuelles extrêmes observées dans certaines régions des États-Unis. Leur étude a été réalisée dans le cadre du *North American Regional Climate Change Assessment Program* (NARCCAP; Mearns et al., 2009 et 2012; Gutowski et al., 2010), et ils se sont intéressés à deux sous-régions dénommées Coastal California et Upper Mississipi. Leurs

études détaillées dans ces deux sous-domaines à différentes caractéristiques climatiques ont montré que tous les modèles participants, pris individuellement ou collectivement (la moyenne d'ensemble), ont bien reproduit la fréquence mensuelle des extrêmes ainsi que la quantité des précipitations extrêmes associées, particulièrement dans la sous-région Costal California.

Mearns et al. (2012), également dans le cadre du projet NARCCAP, ont étudié la performance des six mêmes MRC dans quatre sous-régions ayant des régimes climatiques différents : South California, Great Plains, South Central et Atlantic Coast. Leurs résultats montrent que les modèles performant moins bien quant aux précipitations saisonnières et ont plus de difficulté à reproduire la variabilité des précipitations que celle de la température. Les performances varient d'une sous-région à l'autre. Toutefois, ils ont montré que tous les modèles ont pu bien reproduire les différents aspects du climat; ceci donne confiance qu'ils peuvent fournir des informations utiles sur les changements climatiques. En outre, ils ont montré que la moyenne d'ensemble performe bien sur plusieurs métriques qu'ils ont utilisées pour diagnostiquer les précipitations moyennes.

Martynov et al. (2013) ont également abondé dans ce sens dans le cadre du projet *COordinated Regional Climate Downscaling EXperiment* (CORDEX), en évaluant les performances de la récente version (version 5) du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC5). Ils ont montré que, bien que les conditions de simulations et les méthodes d'analyses diffèrent, les performances du MRCC5 sont considérablement améliorées par rapport aux versions précédentes MRCC3 et MRCC4, particulièrement dans les simulations des précipitations. Ils ont également constaté que le MRCC5 se compare bien à d'autres MRC dans les conditions similaires.

En outre, pour espérer qu'un modèle climatique puisse bien prévoir les changements climatiques futurs, il est primordial qu'il soit capable de simuler les caractéristiques observées du climat récent. La plupart des modèles climatiques réussissent à reproduire les caractéristiques à grande échelle des précipitations moyennes telles que la distribution moyenne zonale. Cependant leurs performances (qui varient fortement d'un modèle à l'autre) sont limitées dans les distributions régionales des précipitations (Covey et al., 2000). Les études menées par Duffy et al. (2003) et Iorio et al. (2004) ont montré que les précipitations moyennes saisonnières simulées se comparaient bien à celles observées en raison de l'augmentation de la résolution de leur modèle. Iorio et al. (2004) ont ajouté que les simulations à haute résolution présentaient des résultats satisfaisants dans les statistiques des précipitations journalières sur l'Amérique du Nord. Wehner et al. (2010) ont postulé que la capacité d'un MCG à simuler les épisodes de précipitations extrêmes sur la partie continentale des États-Unis dépend fortement de sa résolution horizontale. Cependant, l'augmentation de la résolution n'est généralement pas accompagnée d'une amélioration considérable des simulations d'un modèle climatique ou d'un accord parfait entre le modèle et les observations.

L'utilisation d'un modèle régional ne garantit pas une meilleure réponse du simple fait que sa résolution soit plus élevée (Christensen et al., 2007a, p. 889). Même les modèles à plus haute résolution éprouvent des difficultés à reproduire les caractéristiques des précipitations à l'échelle régionale en raison de leur dépendance à l'égard de la paramétrisation de la convection (Liang et al., 2006). Selon certains scientifiques, une grande partie des incertitudes dans les prédictions des précipitations dans les scénarios des changements climatiques est associée à la résolution du modèle et de sa dépendance à la paramétrisation de la convection (Duffy et al., 2003; Leung

et al., 2003; Liang et al., 2004b; Sun et al., 2006). Cependant, une augmentation de la résolution et une paramétrisation adéquate de la convection pourraient-elles résoudre les erreurs dans les simulations du modèle? Autrement dit, existe-t-il d'autres sources d'erreurs? Des études antérieures ont montré en toute évidence que les données utilisées comme conditions aux frontières latérales pour forcer le modèle peuvent également entraîner des incertitudes dans les simulations (e.g. Jiao and Caya, 2006; Sushama et al., 2006; de Elía et al., 2008; Monette et al., 2012; Bouagila and Sushama, 2013; Laprise et al., 2013). En outre, d'autres erreurs peuvent être associées à l'utilisation d'un schéma de surface inadéquat (e.g. Brochu and Laprise, 2007).

L'étude et la compréhension des mécanismes qui gouvernent le cycle diurne sont d'une grande importance. En effet, l'hydrologie de surface est fortement influencée par le cycle diurne des précipitations. Les variations diurnes peuvent moduler la température de surface (Dai et al., 1998) et elles sont étroitement liées aux cycles diurnes de la convection humide, l'activité orageuse, la formation des nuages et l'évolution de la couche limite planétaire (Dai and Trenberth, 2004).

Plusieurs études portant sur le cycle diurne des précipitations et leurs mécanismes sont réalisées sur les États-Unis (e.g., Wallace, 1975; Schwartz and Bosart, 1979; Balling, 1985; Easterling and Robinson, 1985; Englehart and Douglas, 1985; Riley et al., 1987; Landin and Bosart, 1989; Tucker, 1993; Higgins et al., 1996; Dai et al., 1999; Liang et al., 2004; Carbone and Tuttle, 2008; Yamada et al., 2012; Martynov et al., 2013). Ces études ont montré que le cycle diurne des précipitations dénote une forte variabilité spatiale en été, et les maximums de précipitation sont observés durant la nuit sur la région Est des Rocheuses et dans les Grandes Plaines, et en fin d'après-midi dans l'Est, le Sud-est et l'Ouest des États-Unis. Par contre,

durant les autres saisons, les variations diurnes sont moins marquées et les maximums, moins prononcés, se produisent dans la matinée sur la majeure partie des États-Unis (Wallace, 1975; Riley et al., 1987; Landin and Bosart, 1989; Dai et al., 1999). La prépondérance des maximums de précipitation durant la nuit ou en fin d'après-midi est régie par des mécanismes physiques.

Wallace (1975) a montré que les variations diurnes des précipitations convectives sont modulées par des processus dynamiques et l'intensification de la convection est contrôlée par les processus thermodynamiques. Il a ajouté que les précipitations convectives observées en été sont associées aux variations diurnes de la convergence de bas niveau induite par les circulations de brise de mer et de terre, le rayonnement solaire sur les terrains à pente (Holton, 1966; Lettau, 1967) et les variations diurnes de la viscosité (Blackadar, 1957) dans la couche limite. Riley et al. (1987) ont considéré que la propagation des systèmes convectifs de l'après-midi précédent ne peut pas à elle seule expliquer les maximums nocturnes de précipitation sur les Grandes Plaines, en été. Cependant, d'autres auteurs ont associé ces fortes précipitations nocturnes au cycle diurne de la circulation à grande échelle, le courant jet de bas niveau dans les Grandes Plaines (*Great Plains Low Level Jet*, GPLLJ) (Bleeker and Andre, 1951; Hering and Borden, 1962; Pitchford and London, 1962; Reiter and Tang, 1984; Nicolini et al., 1993). Le cycle diurne de la convergence de bas niveau à grande échelle inhibe la convection durant la journée et la favorise durant la nuit sur les régions d'Est des Rocheuses et les plaines adjacentes (Dai et al., 1999). Ils ont également ajouté que la propagation vers l'Est des cellules convectives générées par les Rocheuses en fin d'après-midi a comme effet de renforcer les précipitations nocturnes sur les régions à l'Est. La stabilité statique réduite et la convergence en surface favorisent la convection humide en après-midi, occasionnant d'abondantes précipitations en fin d'après-midi dans le Sud-est

et sur les Rocheuses. Ces mécanismes physiques qui modulent les variations diurnes des précipitations à travers la convection sont représentés par le biais de schémas de paramétrisation de la convection dans les modèles climatiques.

Dai et al. (1999) ont utilisé trois schémas de paramétrisation de la convection (Grell, 1993; Grell et al., 1994; Kuo, 1974; Zhang and McFarlane, 1995) pour étudier les variations diurnes des précipitations sur les États-Unis à l'aide d'un modèle régional. Les résultats ont montré que tous ces trois schémas n'ont pas été capables de reproduire le cycle diurne tel qu'il est observé. Cependant, avec les schémas de Grell et Kuo, leur modèle a pu capturer une partie du cycle. Davis et al. (2003) ont également travaillé avec deux autres schémas différents (Kain and Fritsch, 1993; Betts and Miller, 1993; Janić, 1994). Ils sont arrivés à des conclusions similaires aux études antérieures. Ils ont trouvé qu'avec ces deux schémas le modèle n'a pas pu capturer la propagation vers l'Est des maximums nocturnes des précipitations dans le centre des États-Unis.

Ainsi, certains chercheurs ont commencé à se poser des questions sur la nécessité d'effectuer des ajustements aux schémas de paramétrisation existants, de développer de nouvelles approches de paramétrisation, ou de résoudre de façon explicite la convection humide pour arriver aux résultats souhaités (Knievel et al., 2004). Pourtant, d'autres ont eu des succès en considérant la fermeture de la paramétrisation basée sur le forçage troposphérique à grande échelle à la place de la couche limite (Zhang, 2003) et en prenant en compte l'énergie potentielle disponible (CAPE) dans le déclenchement de la convection (Xie et al., 2004). Ces résultats montrent que la plupart des MRC échouent à reproduire de façon réaliste le cycle diurne en raison de leur dépendance à l'égard de la paramétrisation de la convection.

Martynov et al. (2013) ont diagnostiqué la performance du MRCC5, qui utilise les schémas de convection profonde proposée par Kain and Fritsch (1990) et peu profonde de Kuo (1965) et Bélair et al. (2005), à reproduire le cycle diurne des précipitations dans différentes sous régions en Amérique du Nord. Ils ont trouvé que le MRCC5 performe bien dans la simulation des mécanismes qui contrôlent les maximums de précipitation en fin d'après-midi; mais ceux responsables des maximums nocturnes ne sont pas encore entièrement résolus. La comparaison entre le cycle diurne simulé par le MRCC5 et celui observé est aussi faite par Hernández-Díaz et al. (2012) et Laprise et al. (2013) dans différentes régions de l'Afrique; leurs études montrent que le modèle simule assez bien le cycle diurne.

Plusieurs études sont réalisées à l'aide du MRCC5 pour reproduire le climat présent (e.g., Hernández-Díaz et al. 2012; Martynov et al., 2013) et prévoir les changements climatiques futurs (e.g. Laprise et al. 2013; Šeparović et al., 2013) en Afrique et Amérique du Nord selon les recommandations de CORDEX. Ces études ont montré que MRCC5 reproduit de façon réaliste les caractéristiques du climat présent, notamment la distribution géographique, les cycles annuels, saisonniers et diurnes, et la variabilité temporelle à l'échelle journalière de la température et des précipitations; ainsi que certains phénomènes régionaux tels que le GPLLJ et les moussons de l'Afrique de l'Ouest et de l'Amérique du Nord. Cependant, les habiletés du modèle dans les régions côtières et montagneuses restent encore limitées (Martynov et al., 2013) et sa performance à reproduire certaines caractéristiques régionales telles que la mousson de l'Afrique de l'Ouest et le cycle annuel des précipitations est affectée par les erreurs dans les conditions aux frontières latérales et la température de surface de la mer des MCG (Laprise et al., 2013).

Les données d'observations utilisées dans la plupart des études réalisées avec le MRCC5 proviennent de *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP; Huffman et al., 2001), *Climatic Research Unit* (CRU; Mitchell and Jones, 2005), *University of Delaware* (UDel; Willmott and Matsuura, 1995) et *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM; Huffam et al., 2007). Les estimations satellitaires GPCP et TRMM sont disponibles sur tout le globe et entre les bandes de latitude 50°S-50°N, respectivement. Par contre, les estimations mensuelles CRU et UDel proviennent des réseaux d'observations de surface (pluviomètres) et sont disponibles sur les continents seulement, avec une résolution spatiale de 0.5°. Les estimations journalières du GPCP et aux 3 heures de TRMM ont une résolution de 1° et 0.25°, respectivement. Ces observations, en raison de leur basse résolution spatiale, ne peuvent généralement pas représenter de façon réaliste les caractéristiques des précipitations à la fine échelle. En plus, avec leur résolution temporelle, elles n'offrent pas la possibilité de diagnostiquer les statistiques sur les précipitations horaires. Cependant, la disponibilité des estimations de précipitation à fine résolution spatiotemporelle sur les États-Unis nous offre une grande opportunité d'évaluer les simulations du MRCC5. Ces estimations connues sous le nom de « Stage IV » (voir section 2) constituent une valeur ajoutée par rapport aux observations traditionnelles couramment utilisées pour étudier la performance du modèle à reproduire le climat présent. Ceci nous motive donc à utiliser ces données pour valider les simulations du MRCC5.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les performances du MRCC5 à reproduire les caractéristiques des précipitations observées. La section 2 décrit la configuration du MRCC5 et le protocole de simulation ainsi que les données d'observations utilisées et la méthodologie adoptée pour valider le

modèle. Les résultats et leur interprétation sont exposés dans la section 3. Les conclusions et perspectives sont présentées à la fin de l'étude.

## CHAPITRE II

### DONNÉES ET MÉTHODES D'ANALYSE

#### 2.1 Données d'observations

##### 2.1.1 Stage IV

À la fin 2001, le NCEP a commencé à produire systématiquement l'analyse multi-capteur (radar + pluviomètres) sur les États-Unis, le "NCEP Stage IV" (Lin and Mitchell, 2005). Les estimations horaires Stage IV sont spatialisées sur une grille stéréographique polaire, établie d'après le "Hydrologic Rainfall Analysis Project (HRAP)", à la résolution de 4 km ( $\sim 0.04^\circ$ ) à travers la partie continentale des États-Unis. Un exemple est illustré à un moment spécifique à la Figure 1. Ces données, avec leur fine résolution spatio-temporelle, sont disponibles depuis 2002.

Les estimations radars et pluviomètres sont fusionnées dans 12 centres régionaux "River Forecast Centers" (RFC) qui produisent des analyses régionales horaires et aux 6 heures (analyses multi-capteurs) des précipitations sur leurs domaines juridictionnels, illustrés à la Figure 2. Ces produits régionaux sont ensuite mosaïqués en un produit national au NCEP. Les analyses régionales effectuées dans les RFC utilisent des versions plus avancées de l'algorithme d'analyse multi-capteur (e.g., Fulton et Kondragunta, 2002) et bénéficient d'un contrôle manuel de la qualité. Chaque RFC génère des analyses horaires et aux 6 heures, et la mosaïque pour chaque période se fait à travers les étapes suivantes :

- 1) Rassembler toutes les analyses régionales disponibles pour une période d'accumulation; spatialiser les valeurs de la grille régionale sur la grille nationale.

- 2) Si un point sur la grille nationale est dans un seul domaine régional, alors la valeur de cette analyse régionale est utilisée pour ce point.
- 3) Si un point de la grille est couvert par plusieurs grilles d'analyse régionale, alors la valeur moyenne de toutes les analyses portant sur la région de ce point est utilisée comme la valeur de la mosaïque.

### 2.1.2 CPC

Les estimations de précipitations journalières du "Climate Prediction Center" (CPC) proviennent de trois sources : du "National Climate Data Center" (NCDC) de la NOAA, des RFC, et des accumulations quotidiennes à partir des données de précipitation horaires (Higgins et al., 2000b). Ces données regroupent les informations obtenues, chaque jour, à l'aide d'un réseau de plus de 8 000 stations à travers les États-Unis. Plusieurs types de contrôle de la qualité sont appliqués pour éliminer les doublons, les chevauchements des stations et les valeurs erronées. Le contrôle de l'écart-type qui compare les données pluviométriques quotidiennes à la climatologie quotidienne est aussi appliqué (voir Higgins et al., 2000b). Les données sont spatialisées sur une grille de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  en latitude et longitude, en utilisant le schéma de Cressman (1959) avec les modifications de Glahn et al. (1985) et Charba et al. (1992). Elles couvrent le domaine  $20^\circ\text{-}60^\circ\text{N}$ ,  $140^\circ\text{-}60^\circ\text{W}$ , essentiellement la partie continentale des États-Unis et sont disponibles à partir de 1948 jusqu'à présent. Un exemple pour un jour spécifique est illustré à la Figure 3. Les données quotidiennes sont accumulées à partir de 12 UTC de la veille à 12 UTC de la journée courante.

### 2.1.3 TRMM

Les données tri-horaires de "Tropical Rainfall Measuring Mission" (TRMM) viennent de la combinaison des estimations de précipitation provenant des pluviomètres et de multiples satellites (Huffam et al., 2007). Elles ont une résolution de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  en latitude et longitude et sont disponibles dans la zone de latitude  $50^\circ\text{N}$ - $50^\circ\text{S}$  pour la période de 1998 jusqu'à présent. Un exemple est illustré pour une période spécifique à la Figure 4. Ces données sont produites par l'algorithme d'analyse des précipitations multi-satellites "TRMM Multisatellite Precipitation Analysis" (TMPA; Huffam et al., 2007). Les estimations TMPA sont produites en quatre étapes :

- 1) Les estimations de précipitation fournies par les capteurs aux micro-ondes embarqués à bord des satellites sont calibrées et combinées;
- 2) Les estimations à l'infrarouge de précipitation sont créées en utilisant les précipitations aux micro-ondes calibrées;
- 3) Les estimations aux micro-ondes et à l'infrarouge sont combinées;
- 4) Et, enfin les données pluviométriques sont utilisées pour la calibration.

## 2.2 Simulations du modèle MRCC5

### 2.2.1 Description du modèle

La cinquième génération du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC5; Hernández-Díaz et al., 2013; Martynov et al., 2013), développée au Centre pour l'Étude et la Simulation du Climat à l'Échelle Régionale (Centre ESCER) de l'Université du Québec à Montréal (UQAM), est basé sur une version à aire limitée du modèle Global Environmental Multi-échelle (GEM; Zadra et al., 2008) utilisé pour la prévision numérique du temps à

Environnement Canada (Côté et al., 1998). GEM utilise le schéma de transport semi-Lagrangien et un schéma (quasi) totalement implicite. Dans sa formulation non hydrostatique pleinement élastique (Yeh et al., 2002), il utilise une coordonnée verticale basée sur la pression hydrostatique (Laprise, 1992). En outre, les paramétrages physiques suivants font partie du MRCC5 :

- 1) La convection profonde selon le schéma de Kain and Fritsch (1990);
- 2) La convection peu profonde basée sur une version transitoire du schéma de Kuo (1965) telle que décrite par Bélair et al. (2005);
- 3) La condensation à grande échelle formulée par Sundqvist et al. (1989);
- 4) Les radiations solaires et terrestres selon Li and Barker (2005);
- 5) La traînée des ondes de gravité orographiques de sous mailles de McFarlane (1987);
- 6) Le blocage orographique à bas niveau proposé par Zadra et al. (2003), avec les récentes modifications décrites dans Zadra et al. (2012);
- 7) Le paramétrage de la couche limite planétaire décrit par Benoit et al. (1989), Delage and Girard (1992) et Delage (1997), tel que modifié par Zadra et al. (2012).

Le MRCC5 utilise également la version 3.5 du "Canadian land-surface scheme" (CLASS3.5; Verseghy, 1991 et 2009). Dans cette version, quelques modifications ont été apportées afin de mieux reproduire la végétation réelle. Toutefois, la formule pour calculer l'albédo du sol nu selon ECOCLIMAP (Masson et al., 2003) a été utilisée au lieu de la formule de CLASS3.5. La conductivité thermique de la neige est calculée suivant Sturm et al. (1997). En outre, le modèle Flake de lac unidimensionnel interactif couplé (Mironov et al. 2010) a été introduit dans le MRCC5 et sa performance a été évaluée par Martynov et al. (2012).

## 2.2.2 Configuration des simulations

Les simulations du MRCC5 sont effectuées sur une grille latitude-longitude tournée, avec un espacement de  $0.11^\circ$  sur toute l'Amérique du Nord. Un exemple est illustré pour un moment spécifique à la Figure 5. À cette résolution, le pas de temps utilisé est de 5 minutes. Le nombre total de points de grille est de  $668 \times 560$ , incluant les zones de pilotage et d'éponge qui nécessitent chacun 10 points de grille sur tout le pourtour du domaine. Suivant la verticale, 56 niveaux sont considérés avec le niveau supérieur situé près de 10 hPa et le niveau le plus bas à  $0.996 p_s$ , où  $p_s$  est la pression de surface. Les présentes simulations du MRCC5 sont pilotées par les réanalyses ERA-Interim. Les réanalyses sont disponibles sur des niveaux de pression à une résolution de  $2^\circ$  jusqu'en 2008/12 et  $0.75^\circ$  sur le reste de la période. La température de l'air, les composantes horizontales du vent, l'humidité spécifique et le géopotiel ont été utilisés comme conditions aux frontières latérales pour piloter les simulations.

Le module CLASS3.5 a été utilisé avec 26 couches de sol jusqu'à 60 m de profondeur. En outre, les champs géophysiques ECOCLIMAP de sable et d'argile (Masson et al., 2003) ainsi que ceux de "United States Geological Survey" (USGS) ont été aussi utilisés dans le modèle. Afin de mieux reproduire la végétation réelle, des modifications, telles que décrites par Martynov et al. (2013), ont été apportées.

En outre, la base de données de la profondeur des lacs de Kourzeneva (2010) est utilisée, avec la limitation de la profondeur maximale des lacs à 60 m tel que requis par le modèle Flake. En l'absence de données fiables sur le coefficient d'extinction du rayonnement à courtes longueurs d'onde pour la majorité des lacs, une valeur constante de  $0,2 \text{ m}^{-1}$  est utilisée. Dans les simulations du MRCC5, le modèle Flake est utilisé pour simuler la

température de l'eau ainsi que la fraction et l'épaisseur de la glace sur les lacs.

## 2.3 Méthodologie

### 2.3.1 Domaine d'étude et sous-domaines étudiés

Bien que les données Stage IV, avec leur fine résolution, offrent une grande opportunité pour diagnostiquer les caractéristiques spatiotemporelles des précipitations, des précautions doivent être considérées lors de l'exploitation de ces données, en raison de l'incertitude des observations par radar dans les régions de terrains complexes ou d'hydrométéores en fusion (Kursinski and Mullen, 2008). Bien que la mise en œuvre d'un réseau radar WSR-88D (Fulton et al., 1998) ait considérablement amélioré les estimations de précipitation sur les États-Unis, l'observation par radar présente quelques limitations. Les blocages du faisceau, en conjonction avec la nature profonde des précipitations orographiques stratiformes, mettent en cause la fiabilité des données de réflectivité sous la couche de fusion sur une grande partie des États-Unis, surtout dans les Montagnes Rocheuses. En outre, la limite effective de la couverture radar devient encore plus faible en saison froide, en raison de la présence aux bas niveaux de la couche de fusion (Maddox et al. 2002). Afin d'éviter les interprétations erronées, compte tenu de ces incertitudes, nous limiterons notre étude à la région Est de la partie continentale des États-Unis, à l'Est de 95° Ouest, tel qu'illustré à la Figure 6.

Notre étude s'intéressera à différentes sous-régions (figure 6) selon le découpage de Bukovsky (2011) et adapté par Martynov et al. (2013). Les principaux sous-domaines étudiés sont le Sud, l'Est, les Grands Lacs et une partie du Centre des États Unis. La sous-région du Centre regroupe les Grandes Plaines et les Prairies. Dans cette région, nous avons, selon la

classification de Koppen, les types de climat continental humide, semi-aride et subtropical humide. Bien que différents types de climat soient présents sur cette grande sous-région, ils représentent des paysages relativement homogènes des grandes plaines et prairies (Martynov et al., 2013). La région des Grands Lacs est dominée par les types de climat continental humide. La capacité du MRCC5 à reproduire le climat de cette sous-région dépend fortement de la performance du module de lac couplé. Cependant, dans cette sous-région, on ne s'intéressera qu'aux points de grilles qui se trouvent sur la terre ferme, mais non pas ceux au-dessus des lacs en raison de l'inexistence des stations de mesures sur les lacs. La sous-région du Sud regroupe les régions du Sud et Sud-est. Elle est entièrement dominée par le type de climat subtropical humide. L'étude de cette région relève, entre autre, d'une grande importance en raison de l'existence d'une forte proportion de terres agricoles, d'habitats en voie de disparition et des problèmes de gestion de l'eau dans la plupart des grandes villes (Stefanova et al., 2011). La sous-région d'Est regroupe les Appalaches, le mid-Atlantique et l'Atlantique Nord. Les types de climat subtropical et continental humide dominant cette zone.

### 2.3.2 Méthodes d'analyse

Toutes les données ont été manipulées pour les projeter sur la grille du modèle MRCC5 avec maillage de  $0.11^\circ$ . Les données Stage IV ont été d'abord agrégées, en regroupant quatre éléments à la résolution originale. Ensuite, elles ont été interpolées sur la grille du modèle. Par contre, les données CPC et TRMM, de maillage de  $0.25^\circ$ , ont été tout simplement interpolées sur la grille du MRCC5. Toutes les données ont été interpolées sur la grille du modèle en utilisant une interpolation linéaire. Nous avons évalué l'impact des interpolations linéaire et du plus proche voisin (Lu and

Wong, 2008), et les différences sont minimales. Cependant, l'interpolation linéaire a semblé légèrement meilleure.

Afin de valider les simulations du modèle, les champs moyens des précipitations ont été calculés en utilisant quelques statistiques de base telles que les moyennes temporelles et spatiales, selon les relations suivantes :

✓ Moyenne temporelle :

$$\bar{\phi}(i, j) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \phi(i, j, t) \quad (2.1)$$

✓ Moyenne spatiale :

$$\langle \phi \rangle(t) = \frac{1}{I \times J} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \phi(i, j, t) \quad (2.2)$$

où  $\langle \phi \rangle$  et  $\bar{\phi}$  représentent respectivement les moyennes spatiale et temporelle,  $T$  le nombre total de champs archivés,  $I$  le nombre total de points suivant la longitude,  $J$  le nombre total de points suivant la latitude, et  $\phi$  représente le champ de précipitation au temps  $t$ .

Le coefficient de corrélation spatiale, le rapport des écarts types spatiaux et l'écart relatif quadratique moyen centré ont été calculés selon les spécifications de Taylor (2001). Les relations utilisées sont les suivantes :

✓ Le coefficient de corrélation spatiale :

$$R = \frac{\langle(\phi_1 - \langle\phi_1\rangle)(\phi_2 - \langle\phi_2\rangle)\rangle}{\sqrt{\langle(\phi_1 - \langle\phi_1\rangle)^2\rangle}\sqrt{\langle(\phi_2 - \langle\phi_2\rangle)^2\rangle}} \quad (2.3)$$

✓ Le rapport des écarts types spatiaux :

$$\Gamma = \sqrt{\frac{\langle(\phi_1 - \langle\phi_1\rangle)^2\rangle}{\langle(\phi_2 - \langle\phi_2\rangle)^2\rangle}} \quad (2.4)$$

✓ L'écart relatif quadratique moyen centré :

$$d = \sqrt{\frac{\langle[(\phi_1 - \langle\phi_1\rangle) - (\phi_2 - \langle\phi_2\rangle)]^2\rangle}{\langle(\phi_2 - \langle\phi_2\rangle)^2\rangle}} \quad (2.5 a)$$

$$d = \sqrt{1 + \Gamma^2 - 2\Gamma R} \quad (2.5 b)$$

L'indice 2 indique la base de données utilisée comme référence, et 1 les bases à évaluer;  $\phi$  réfère aux composantes des champs de précipitation.

En outre, il est bien connu que les modèles climatiques régionaux ne reproduisent pas avec précision le cycle diurne des précipitations (e.g. Dai et al., 1999; Davis et al., 2003). Des erreurs dans la distribution, la fréquence, l'intensité et le cycle diurne des précipitations simulées sont fréquentes (Bukovsky and Karoly, 2011). Ainsi, afin d'évaluer les simulations du MRCC5, on diagnostiquera :

- 1) L'habileté du modèle à reproduire le cycle diurne des précipitations observées dans les différents sous-domaines choisis;
- 2) La distribution de fréquence des précipitations dans les différentes sous-régions;

- 3) L'étude du nombre moyen de jours humides;
- 4) L'étude de la durée moyenne des événements pluvieux.

En raison des incertitudes inhérentes à la conversion des faibles valeurs de réflectivité en taux de précipitation, surtout dans les régions où la couverture des pluviomètres est peu dense, les faibles taux de précipitation des estimations Stage IV doivent être considérés avec prudence (Kursinski and Mullen, 2008). Il est souvent difficile de décider s'il faut considérer ces faibles intensités comme de la vraie précipitation ou comme un artefact de l'algorithme radar (e.g., Kursinski and Mullen, 2008; Westrick et al., 1999). En plus, selon la procédure d'analyse des données Stage IV, une correction du biais jauge-radar est appliquée pour réduire les erreurs liées à la relation Z-R du radar, mais son efficacité pour les différentes saisons, régions et les événements synoptiques doit être remise en question (Kursinski and Mullen, 2008). En outre, ces faibles taux de précipitation sont aussi assez fréquents dans le modèle où, lorsque l'humidité relative atteint certaines valeurs, des précipitations se produisent, un phénomène assez fréquent dans la couche limite. Dans ces conditions, il est difficile d'associer ces faibles intensités à de vraies précipitations. Compte tenu de ces incertitudes nous considérerons comme limite inférieure 1 mm/jour pour analyser les jours humides et 1 mm/h pour la durée des événements pluvieux.

Dans le prochain chapitre, nous procéderons à la vérification de la simulation du modèle MRCC5, en suivant les principaux aspects soulevés dans la méthodologie.

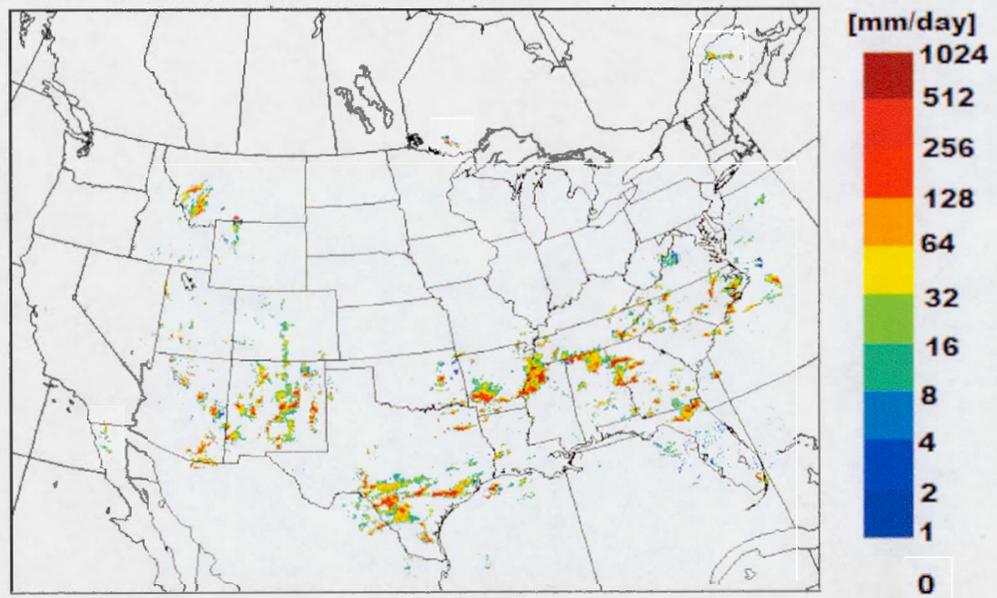


Figure 2.1: Champs de précipitation valide le 15 juillet 2002 à 00Z pour les estimations horaires Stage IV.

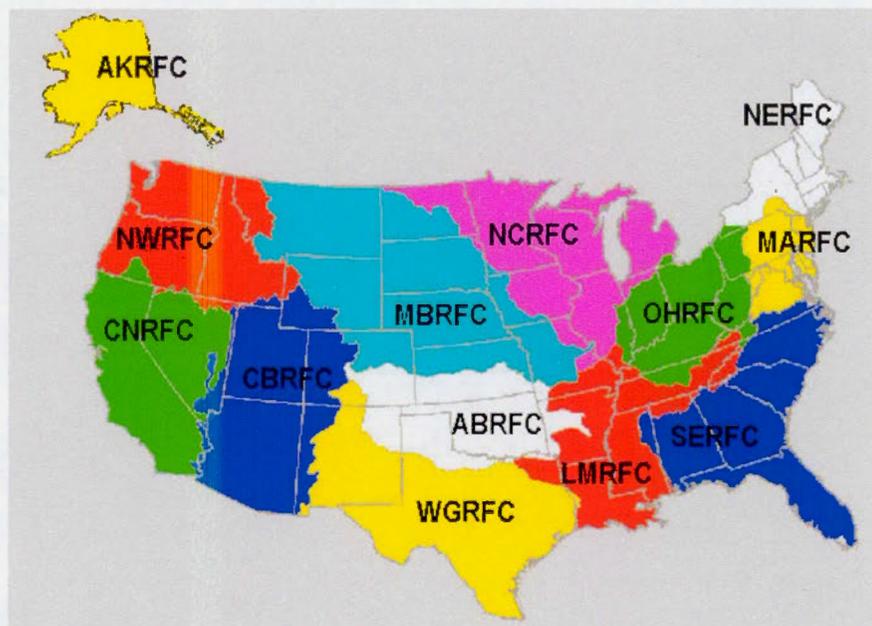


Figure 2.2: Les domaines des RFC

(Source :

<http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/ylin/pcpanl/stage4/images/fixd/rfcs.jpg>)

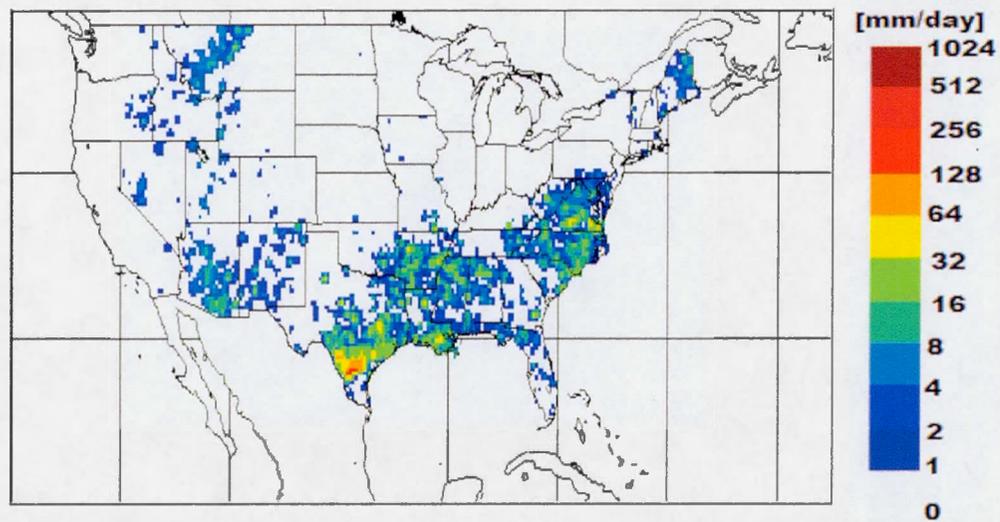


Figure 2.3: Champs de précipitation valide le 15 juillet 2002 pour les estimations journalières CPC.

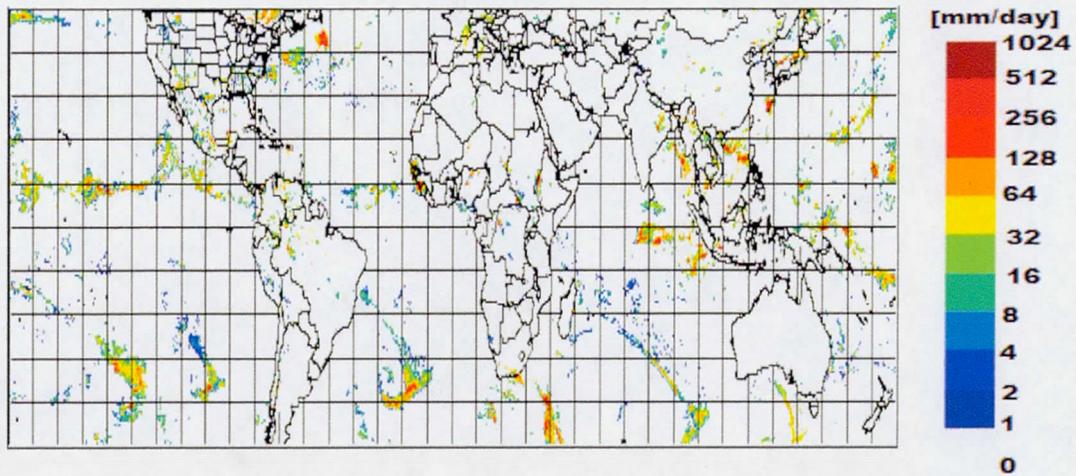


Figure 2.4: Champs de précipitation valide le 15 juillet 2002 à 00Z pour les estimations 3-horaires TRMM.

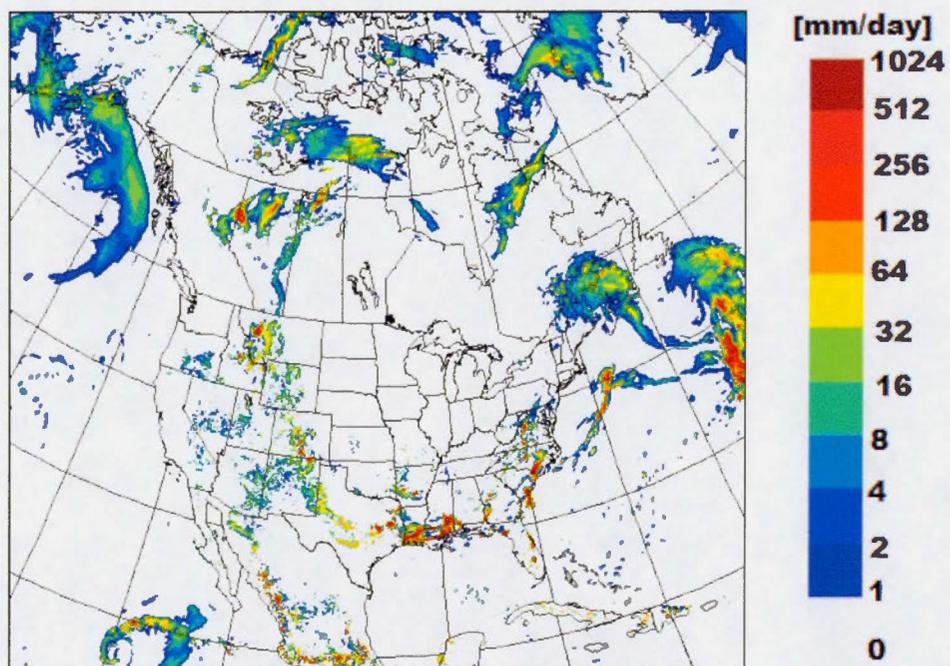


Figure 2.5: Champs de précipitation valide le 15 juillet 2002 à 00Z pour les sorties horaires des précipitations simulées par le MRCC5.

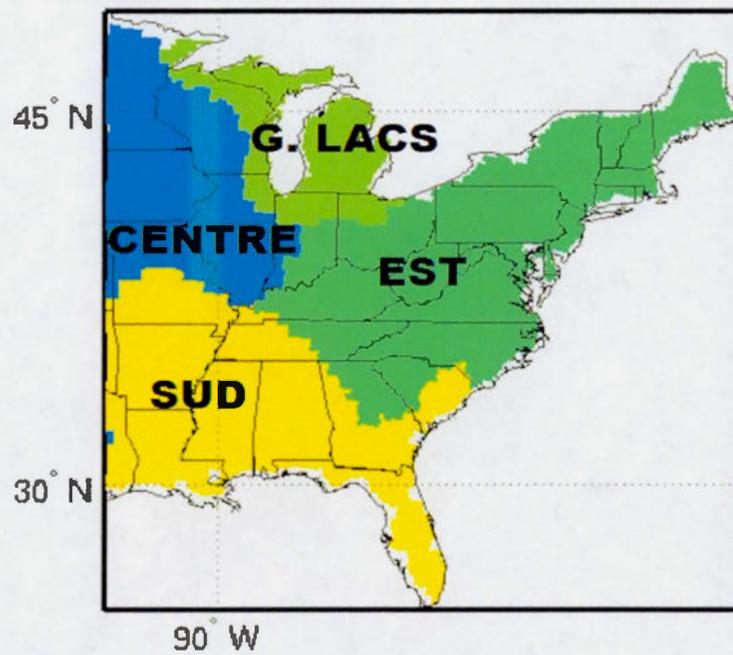


Figure 2.6: Domaine et sous-domaines étudiés

## CHAPITRE III

### RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

#### 3.1 Échantillon de climatologie

La figure 7 montre la distribution spatiotemporelle des moyennes saisonnières des précipitations estimées grâce aux analyses CPC, TRMM et Stage IV pour la période 2002-2012. Les analyses présentent généralement, pour toutes les saisons, des zones humides sur l'ensemble du domaine analysé. En hiver, les maximums de précipitation sont confinés sur une bande allant de l'embouchure du Mississippi vers le nord-est, à l'ouest des Appalaches. La zone de précipitations plus abondantes est délimitée au sud par le Golfe du Mexique, la source primaire d'humidité (Kursinski and Mullen, 2008). Les précipitations sont aussi abondantes le long de la côte des états de la Nouvelle-Angleterre. Elles diminuent progressivement du centre au nord-ouest avec une région plus sèche (la partie du Minnesota dans notre domaine d'étude). Ces zones de faibles précipitations hivernales pourraient être associées à la présence de l'anticyclone canadien. En été, les précipitations sont plus abondantes, excédant les 2 mm/day sur l'ensemble du domaine. Les régions les plus humides se trouvent au sud du domaine, le long de la côte du Golfe du Mexique et dans la Péninsule de la Floride où le maximum de précipitation excède les 6 mm/day. Durant les saisons de transition, les régions de maximums de précipitation se trouvent au centre au printemps, et vers le Sud et sur la côte Est en automne.

Les précipitations de la saison froide sont modulées par les phénomènes qui se produisent à l'échelle synoptique, et les précipitations associées sont généralement de types stratiformes. En hiver les passages

des ondes cycloniques et les systèmes frontaux qui se développent le long du littoral et s'alimentent de l'humidité du Golfe du Mexique produisent des zones de précipitation largement étendues sur le sud-est (Kursinski and Mullen, 2008). Par contre durant la saison chaude, les forçages sont largement dominés par les systèmes convectifs ou à méso-échelle qui sont associés aux échelles de courtes durées.

### 3.1.1 Comparaison des trois bases de données

Les précipitations saisonnières moyennes estimées par les analyses CPC et TRMM s'accordent bien entre elles sur la majeure partie du domaine. Les différences sont généralement inférieures à 1 mm/day (figure 8) sauf dans les régions des maximums de précipitation où les différences approchent 2 mm/day. En termes relatifs, les différences sont inférieures à 20 % (figure 9) sur la majeure partie du domaine, sauf dans les régions de faibles précipitations à l'extrême nord-ouest en hiver où elles atteignent parfois 100 %.

Les estimations Stage IV reproduisent les principales caractéristiques observées avec les analyses CPC et TRMM, mais elles montrent plus de détails sur les caractéristiques régionales. L'accord est meilleur avec la base CPC, ce qui est cohérent étant donné que les analyses Stage IV incorporent celles de CPC. Il existe cependant quelques différences entre Stage IV et les deux autres bases de données. En hiver, la bande de maximums de précipitation est plus étroite dans Stage IV et elle est discontinue. En été, Stage IV présente deux zones de maximums de précipitation en Floride où les taux de précipitation excèdent les 8 mm/day. Celle plus au sud est présente dans toutes les bases de données, mais elle est beaucoup plus

étendue dans Stage IV. La seconde, moins marquée, est absente dans les deux autres bases de données. Au printemps, les estimations Stage IV présentent des zones de fortes précipitations plus étendues.

Les différences absolues et relatives entre Stage IV et les données CPC et TRMM sont aussi présentées sur les figures 8 et 9, respectivement. Les différences absolues sont en dessous de 1 mm/j sur l'ensemble du domaine à l'exception de quelques régions, généralement celles qui reçoivent les importantes précipitations hivernales et estivales. En hiver les données Stage IV donnent des valeurs légèrement plus faibles que TRMM; toutefois, les différences n'excèdent pas 2 mm/j. Les différences relatives correspondants dénotent une forte variabilité spatiale et saisonnière entre les différentes bases de données. Les différences entre les estimations CPC et Stage IV demeurent en dessous de 20% sur la majeure partie du domaine. La base TRMM donne en général des valeurs de précipitations plus élevées que les autres bases, particulièrement en hiver.

D'autres statistiques telles que le coefficient de corrélation spatial ( $R$ , équation 2.3), l'écart-type ( $\sigma$ , équation 2.4) et l'erreur relative quadratique moyenne ( $d$ , équation 2.5) sont utilisées pour caractériser les différences entre les données d'observations. Les coefficients  $d$  et  $\sigma$  entre Stage IV et les autres observations ont été normalisés en prenant Stage IV comme référence. Les résultats sont présentés sous la forme de diagramme de Taylor à la figure 10. Le coefficient de corrélation spatial  $R$  entre les analyses CPC et TRMM et les estimations Stage IV est environ 0.9 et l'erreur relative quadratique moyenne  $d$  est de l'ordre de 0.4 en hiver et 0.5 pour les autres saisons. Les accords entre Stage IV et les bases CPC et TRMM sont semblables, et il est meilleur en hiver et moins bon en été. Ces premiers résultats indiquent que les trois bases se comparent bien.

### 3.1.2 Comparaison des précipitations simulées avec les bases d'analyse des observations

La figure 7 présente les moyennes saisonnières des précipitations analysées et celles simulées par le MRCC5. Le modèle reproduit bien les principales caractéristiques de la répartition spatiale des précipitations observées, mais avec des valeurs plus fortes, surtout en été. Le MRCC5 capture mal certaines variations saisonnières des précipitations dans le Mid-Ouest et dans le centre où il est bien connu que les modèles éprouvent des difficultés à simuler correctement les variations locales des précipitations en été (Takle et al. 1990) lorsqu'elles sont dominées par les circulations régionales à la méso-échelle, le jet nocturne de bas niveau à l'est des Rocheuses (Stensrud 1996; Higgins et al. 1997; Liang et al. 2001) et les systèmes convectifs de méso-échelle (Maddox 1980; Fritsch et al. 1986). À l'été et à l'automne, les champs de précipitations simulés par le MRCC5 présentent un fort gradient entre le nord-ouest et le sud-est de la région analysée; cette caractéristique est absente des trois bases d'analyses d'observation.

Les différences absolues et relatives entre le modèle et les observations sont présentées dans les figures 11 et 12, respectivement. En hiver, les différences absolues entre MRCC5 et Stage IV sont de l'ordre de 2 mm/day dans les régions au sud de 37°N où se trouvent les maximums de précipitation, et plus faibles dans le reste du domaine. Au printemps par contre les plus grandes différences se trouvent plutôt dans le nord-ouest. En été et en automne, le modèle surestime les précipitations en Floride et dans les régions adjacentes de la côte Est. En automne, le modèle sous-estime les précipitations dans les états du Mississippi et de l'Alabama, avec des biais de

l'ordre de 2-3 mm/day. La figure 12 montre que le MRCC5 surestime systématiquement les précipitations hivernale et printanière d'environ de 20-60 %. Une surestimation est également notée dans les états de la côte est en été, et à l'automne dans les régions côtières au sud de 37° N et près des Grands Lacs. Par contre, il sous-estime les précipitations dans les régions Ouest de 90° W, particulièrement dans les régions Ouest des Grands Lacs, en été, et dans les états du Mississippi et de l'Alabama en automne.

La performance du MRCC5 est également évaluée en utilisant les autres bases de données des observations CPC et TRMM. Le résultat est presque identique à celui obtenu lors de la comparaison entre le MRCC5 et les estimations de précipitation Stage IV. En général, les biais humides et secs sont respectivement moins et plus forts, particulièrement lorsque le MRCC5 et les estimations TRMM sont comparés.

Les statistiques  $R$ ,  $d$  et  $\Gamma$  sont également utilisées pour caractériser les différences entre le modèle et les trois bases d'observations. Les coefficients  $d$  et  $\Gamma$  entre le MRCC5 et les observations sont normalisés en prenant le modèle comme référence. Les résultats sont présentés sous forme de diagrammes de Taylor à la figure 13. Les statistiques  $R$  et  $d$  entre les simulations du MRCC5 et les estimations Stage IV affichent de meilleurs résultats en hiver, avec  $R = 0.9$  et  $d < 0.5$ . L'accord est également assez bon en été avec  $R \approx 0.7$  et  $d < 0.75$ . Cependant, l'écart type maximal est plus faible en été, avec  $\Gamma \approx 0.6$ , et plus fort au printemps ( $\Gamma > 1$ ). Par contre, en automne, les résultats sont moins positifs, avec  $R \approx 0.5$  et  $d > 0.75$ . Ces statistiques sont également calculées entre le modèle et les autres bases de données. Les résultats sont légèrement différents de ceux obtenus entre le MRCC5 et les estimations Stage IV. Toutefois, ils sont plus positifs, particulièrement dans les saisons d'intérêt.

Le résultat de l'évaluation des simulations du MRCC5 dans les moyennes saisonnières par les estimations Stage IV n'est pas très différent de celui entre le MRCC5 et les autres bases de données. Ce résultat est également conforme aux études antérieures (e.g., Martynov et al. 2013; Šeparović et al., 2013) malgré que les simulations avec lesquelles nous avons travaillé ont une résolution ( $0.11^\circ$ ) quatre fois plus élevée que celles utilisées dans ces récentes études. Toutefois, le modèle a eu des difficultés à simuler correctement les précipitations dans plusieurs régions où sont situés les maximums de précipitation, présentant des biais humides et secs, selon la région et la saison, de l'ordre de 20-60 %. Cette faible performance porte à croire que ces erreurs sont associées, en partie, aux schémas de paramétrisation utilisés dans le modèle. En guise d'exemple, Hong and Leetmaa (1999) avaient associé aux biais humides des précipitations d'hiver et d'été à des lacunes dans le schéma de paramétrisation de la convection humide. Cela indique alors la nécessité d'améliorer les schémas de convection. Et, à plus forte raison, avec la résolution élevée du MRCC5, les schémas de paramétrisation utilisés sont inadéquats puisque développés pour des résolutions beaucoup plus basses. En plus, il faut noter que la résolution de  $0.11^\circ$  approche de l'échelle où l'hypothèse d'un modèle non-hydrostatique doit être remise en question.

Dans les prochaines sections, nous tenterons de comprendre comment ces lacunes se manifestent.

### 3.2 Évolution des cycles diurnes

La figure 14 présente les cycles diurnes des estimations d'observations TRMM et Stage IV, ainsi que simulées par le modèle MRCC5 dans les différentes sous-régions définies à la figure 6.

Les variations diurnes sont généralement faibles dans toutes les sous-régions en saison froide, et ceci est bien capturé par la simulation du MRCC5. En hiver, les observations ne sont pas, en général, en accord dans les précipitations nocturnes, surtout dans les sous régions du Centre et des Grands Lacs où TRMM a un faible maximum vers 6 GMT. Ce maximum n'est ni observé avec Stage IV, ni simulé par le MRCC5. En automne le MRCC5 a également bien reproduit le faible cycle semi-diurne dans l'Est et le Sud, particulièrement marqué dans cette dernière sous-région. Le cycle diurne est plus marqué en été, surtout dans les sous régions d'Est et du Sud où les cycles diurnes sont très intenses.

Durant la saison chaude, les maximums de précipitation se produisent durant la nuit dans les sous-régions du Centre et des Grands Lacs, tandis que dans l'Est et le Sud, les plus fortes précipitations ont tendance à se produire en fin d'après-midi. Toutefois, il existe quelques différences entre les observations. TRMM montre un maximum vers 6 GMT au Centre et dans les Grands Lacs, particulièrement prononcé au Centre, et des minimums de précipitation vers 18 GMT. Par contre Stage IV montre les maximums de précipitation 4 à 6 heures plus tard que TRMM dans le Centre et des précipitations nocturnes plus faibles dans les Grands Lacs. La simulation du MRCC5 est plus proche du cycle de Stage IV dans le Centre, mais sous-estime les précipitations nocturnes. Par contre, dans les Grands Lacs, le modèle reproduit les précipitations nocturnes de TRMM ainsi que le maximum à 6 GMT et s'accorde mieux avec Stage IV sur les minimums de précipitation qui se produisent également à 18 GMT; toutefois les maximums et minimums des précipitations simulées sont moins marqués dans cette région. Les sous-régions d'Est et du Sud sont caractérisées par les maximums de précipitation très prononcés en fin d'après-midi (vers 22 GMT) et des minimums de précipitation qui se produisent entre 7 et 15 GMT. Dans ces régions, les observations sont en parfait accord. Le MRCC5 a également

bien reproduit ces caractéristiques avec quelques différences près. Le minimum de précipitation observé vers 7 GMT est moins prononcé dans le MRCC5 dans l'Est et ce dernier sous-estime les maximums de précipitation dans le Sud.

Au printemps, les cycles diurnes de Stage IV et TRMM sont aussi très proches; leur maximum nocturne ou en fin d'après-midi coïncide, mais les minimums ont tendance à se produire plus tôt dans TRMM. Le MRCC5 reproduit assez fidèlement l'évolution des cycles, sauf dans le Sud où il montre une augmentation durant toute la nuit tandis que les observations montrent une diminution. En outre, il simule les maximums de précipitation dans le Centre plus tôt que les observations.

Le modèle MRCC5 a relativement bien reproduit les principales caractéristiques des cycles observés. La précipitation simulée par le MRCC5 généralement excède celle des deux bases d'observation, mais la forme du cycle simulé semble reproduire généralement celui observé avec Stage IV. Cependant, il a des difficultés à capturer les maximums nocturnes, surtout dans la sous région du Centre, qui sont associés au jet nocturne de bas niveau à l'est des Rocheuses (Bleeker and Andre, 1951; Hering and Borden, 1962; Pitchford and London, 1962; Reiter and Tang, 1984; Nicolini et al., 1993) et les systèmes convectifs générés par les Montagnes Rocheuses (Dai et al., 1999). Le modèle semble avoir des problèmes à bien résoudre ces phénomènes contrairement à ceux responsables des maximums en fin d'après-midi. Ces résultats ont été également constatés par Martynov et al. (2013).

### 3.3 Distribution de fréquence des précipitations horaires

La figure 15 illustre la distribution de fréquence des précipitations horaires estimées par Stage IV et celles simulées par le MRCC5. Les taux de précipitations horaires de tous les points du domaine d'une sous-région donnée sont regroupés sur les intervalles  $0, 0.1$  et  $2^n$  mm/day où  $n = 0, 1, 2, \dots$ . Cette distribution, jusque là faite par le biais des précipitations moyennes journalières (e.g., Martynov et al. 2013; Šeparović et al. 2013), constitue une valeur ajoutée des estimations Stage IV, en raison de leur haute résolution temporelle. Elle permet de quantifier la contribution des fortes intensités des précipitations simulées dans l'accumulation totale; une caractéristique souvent perdue lors de la manipulation des moyennes journalières.

Les distributions de Stage IV et du MRCC5 se ressemblent sur la forme générale des distributions dans tous les sous-domaines pour toutes les saisons; cependant, il existe d'importantes différences entre le modèle et les observations. Les maximums d'intensités sont généralement moins prononcés dans les simulations. Durant la saison froide, la contribution des faibles intensités de précipitation est surestimée dans le MRCC5 dans toutes les sous-régions, particulièrement dans les Grands Lacs, peut-être en raison de l'évaporation excessive des lacs (Martynov et al., 2013). Il faut noter toutefois que dans l'analyse Stage IV, un seuil de réflectivité de l'ordre de 15 dBz (0.25 mm/h environ en terme de taux de précipitation) est appliqué pour considérer que les précipitations atteignent le sol; de même le plus faible taux de précipitation mesurable par les pluviomètres est généralement de cet ordre. Ainsi il se peut que les données Stage IV sous-estiment les faibles intensités de précipitations (précipitations sous forme de neige). Par contre, cette contribution devient très faible pendant la saison chaude, réduisant ainsi l'écart entre Stage IV et le MRCC5 pour les faibles intensités de précipitation.

En été les maximums de Stage IV et du MRCC5 ne coïncident pas parfaitement, la distribution du modèle ayant tendance à être décalée vers les faibles intensités; ce décalage est d'ailleurs présent dans la sous-région du Sud pour les autres saisons et dans les Grands-Lacs en automne. En été, les intensités de précipitation comprises entre 64-128 mm/j sont plus fréquentes dans les simulations du MRCC5, tandis que dans les analyses Stage IV, les intensités de précipitation comprises entre 128-256 mm/j sont plus fréquentes. Cette différence est également observée dans le Sud pour les autres saisons.

À cause de la nature convective des précipitations en été, elles sont souvent plus intenses contrairement aux types de précipitations stratiformes pendant la saison froide. Par conséquent, la contribution des fortes intensités de précipitation ( $> 512$  mm/day) est importante. Les études antérieures (e.g., Martynov et al., 2013; Šeparović et al., 2013) n'ont pas pu mettre en évidence ces fortes intensités en raison de l'échelle journalière employée; leurs études ont montré que la contribution des taux de précipitations journalières excédant à 64 mm/j dans l'accumulation totale était négligeable.

Ces résultats nous permettent d'émettre des hypothèses concernant les biais humides détectés dans la simulation des précipitations moyennes saisonnières (figures 11 et 12). Il semble que la contribution des faibles et fortes intensités des précipitations simulées pendant la saison froide et chaude, respectivement, pourrait expliquer ces biais humides. Mais, en été, le lien n'est pas aussi évident que durant la saison froide.

### 3.4 Distribution spatiotemporelle du nombre moyen de jours humides

Un jour est dit humide en un point de la grille lorsque la précipitation journalière accumulée excède un certain seuil. Pour notre étude, les seuils 1, 2 et 3 mm par jour sont utilisés.

#### 3.4.1 Seuil 1 mm

La figure 16 permet de comparer le nombre moyen de jours humides avec un seuil de 1 mm (que l'on notera « nmjhs1 ») simulé par le modèle MRCC5 avec les valeurs selon les observations Stage IV.

En hiver, le maximum du nmjhs1 est observé, avec les données Stage IV, à l'est des lacs Érié et Ontario et dans les régions adjacentes des Appalaches, et en Floride en été. Durant cette saison on peut mettre en évidence deux zones de plus et de moins de jours pluvieux situées respectivement à l'est et l'ouest d'une ligne orientée SO-NE, entre la vallée du Mississippi et la chaîne des Appalaches. Durant les saisons de transition, les valeurs maximales sont observées dans quelques régions du centre du domaine et de la Nouvelle Angleterre au printemps, et à l'est des lacs Érié et Ontario en automne.

Les trois bases d'observations se comparent bien en été. Par contre dans les autres saisons les données TRMM diffèrent notablement des données CPC et Stage IV, sous-estimant considérablement le nmjhs1, surtout en saison froide. Ceci peut être dû notamment à la faible sensibilité de TRMM aux précipitations sous forme de neige. (Cf. figures Annexe I)

Le modèle reproduit assez bien les principales caractéristiques de la distribution spatiale du nmjhs1 observé avec les analyses Stage IV, mais avec un plus grand nombre de jours humides, surtout en hiver dans les

régions où se produisent les valeurs maximales. La figure semblerait indiquer que le modèle surestime les précipitations sous forme de neige sur les Grands Lacs. Il faut toutefois noter que les observations sous-estiment les bourrasques de neige modulées par les effets de lac (e.g. Westrick et al. 1999). Par contre, le nmjhs1 simulé en été se compare bien à celui calculé avec observations Stage IV.

Les différences absolues des nmjhs1 entre le MRCC5 et les observations Stage IV sont montrées à la figure 17 et les différences relatives sont montrées à la figure 18. En hiver, les différences absolues sont de l'ordre de 20 jours dans plusieurs régions alors que les différences relatives sont de l'ordre de 20-60 %. En été, les différences absolues et relatives sont respectivement de moins de 10 jours et 20 % sur presque l'ensemble du domaine. Le modèle a un déficit de nmjhs1 le long de la côte du Golfe du Mexique, à l'Ouest de 90°W, et un excès de même intensité (20-40 %) est également noté dans les régions du Sud-est et du Centre. Durant cette saison, les simulations et les observations s'accordent bien sur les régions où se produisent les maximums de précipitation. Le modèle surestime, en général, systématiquement le nmjhs1 dans les saisons de transition. Les différences relatives sont de l'ordre de 20-60 % sur la majeure partie du domaine, et sont plus fortes dans les régions des Grands Lacs, de la Nouvelle-Angleterre, de la Floride et le côte du Golfe du Mexique. Dans ces régions les différences absolues n'excède pas souvent les 10 jours.

Le modèle se compare également bien avec les autres bases d'observations en été. Les différences sont généralement négligeables dans plusieurs régions. Cependant, des déficits de nmjhs1 de l'ordre de 20-40 % sont observés dans les régions à l'Ouest de 90°W, particulièrement entre MRCC5 et CPC. Des excès de nmjhs1 du même ordre existent également entre MRCC5 et TRMM au Nord-est. Dans les autres saisons, le comportement du modèle est semblable au résultat de la comparaison entre

le MRCC5 et Stage IV. Toutefois, les différences absolues et relatives entre le modèle et les observations CPC et TRMM sont respectivement plus faibles et fortes dans plusieurs régions par rapport à celles observées entre MRCC5 et Stage IV.

De même, les statistiques  $R$ ,  $d$  et  $\Gamma$  entre le modèle et les observations sont également calculées en suivant la méthode utilisée dans la section 3.1.2, et les résultats sont présentés sous la forme de diagramme de Taylor à la figure 25. Le modèle se compare bien aux observations Stage IV en été avec  $R \geq 0.8$ ,  $d < 0.7$  et  $\Gamma < 1$ . En hiver, l'accord est assez bon avec  $R \approx 0.7$ ,  $d < 0.75$  et  $\Gamma < 1$ ; tandis que les résultats sont moins positifs dans les saisons de transition.

Comparé, aux autres bases de données, le modèle concorde bien avec celles-ci en été. Les différences entre TRMM et le MRCC5 sont considérables dans les autres saisons. Cependant, l'écart type entre TRMM et le MRCC5 est plus faible, en général. En effet, TRMM a tendance à montrer le même nombre de jours humide sur tout le domaine. Par contre, l'accord entre le modèle et les analyses CPC est assez bon.

### 3.4.2 Seuil 2 mm

La figure 19 permet de comparer le nombre moyen de jours humides avec un seuil 2 mm, noté  $nmjhs_2$ , simulé par le modèle MRCC5 avec les analyses Stage IV. En comparant les figures 16 et 19, on constate que le  $nmjhs_2$  diminue considérablement lorsqu'on passe du seuil de 1 mm au seuil de 2 mm. Les zones plus humides sont généralement plus étendues dans le MRCC5. Le  $nmhs_2$  simulé est évidemment plus faible que le  $nmjhs_1$ , et la réduction est particulièrement notable en hiver à l'est des lacs Érié et Ontario, tandis qu'en été, le MRCC5 semble être moins sensible à l'augmentation du

seuil en Floride. En effet, les circulations de brise de mer produisent d'intenses précipitations en été dans cette région. En outre, le MRCC5 sous-estime le nombre de jours humides au Nord-ouest. Ces événements pluvieux pourraient être influencés par les systèmes convectifs à méso-échelle (e.g. Maddox, 1983) et le jet nocturne de bas niveau à l'est des Rocheuses (Stensrud 1996; Higgins et al. 1997; Liang et al. 2001) qui occasionnent d'importantes précipitations.

Les différences absolues (figure 20) entre les simulations du MRCC5 et les analyses Stage IV sont fortement réduites avec un seuil de 2 mm, particulièrement en hiver; mais il a tendance à s'intensifier en Floride, en été. Les différences relatives (figure 21) connaissent aussi une réduction de 20 % environ dans plusieurs régions du domaine en hiver. Les différences deviennent également plus faibles (par rapport au seuil 1 mm) dans les saisons de transition. En revanche, en été, les différences négatives et positives sont plus fréquentes dans les régions nord-ouest des Grands Lacs et au sud de 37°N, respectivement. Ces différences sont de l'ordre de 20-40 %.

Les différences négatives sont également notées entre le modèle et les observations CPC et TRMM. Elles sont plus fréquentes entre le MRCC5 et CPC. Des différences positives existent également dans certaines régions du sud. Par contre, celles-ci connaissent une réduction durant les autres saisons, surtout en hiver entre le MRCC5 et TRMM.

L'accord entre la simulation du MRCC5 et les observations Stage IV est amélioré suite à l'augmentation du seuil. Cette amélioration est aussi constatée avec les autres bases d'observations, et est plus marquée entre TRMM et le MRCC5, avec une augmentation de près de 20 % du coefficient de corrélation et une forte réduction de l'écart relatif quadratique moyen (Fig. 25).

### 3.4.3 Seuil 3 mm

La figure 22 illustre le nombre moyen de jours humides avec un seuil de 3 mm ( $nmjhs_3$ ). Le nombre moyen de jours humide a davantage diminué suite à l'augmentation du seuil. Cependant, le modèle a encore tendance à montrer un  $nmjhs_3$  plus élevé, surtout en été (en Floride), et généralement des zones très humides plus étendues.

Les différences absolues (Fig. 23) entre le modèle et les observations Stage IV sont encore réduites et deviennent même négligeables dans plusieurs régions. Cependant, elles restent importantes en Floride en été. De même, les différences relatives (Fig. 24) négatives et positives s'intensifient dans les régions du Nord-Ouest et au sud de  $37^\circ N$ , respectivement. Toutefois, il est important de noter que les différences négatives et positives sont du même ordre, 20-40 % environ. Par contre, les différences positives du modèle durant les autres saisons sont plus faibles avec un seuil de 3 mm, mais elles restent tout de même importantes (20-60 % dans plusieurs régions).

En été, les différences négatives sont plus fréquentes lorsque le MRCC5 est comparé aux autres bases d'observations, surtout entre MRCC5 et CPC; tandis que les différences positives sont moins fréquentes. Avec ce seuil, TRMM se compare mieux aux simulations. Dans les autres saisons, les différences positives sont moins et plus fortes entre MRCC5 et CPC, et MRCC5 et TRMM, respectivement, par rapport au résultat obtenu entre MRCC5 et Stage IV.

L'accord entre le modèle et les observations est encore bon. En été, les statistiques  $R$  sont au dessus de 0.8, atteignant même 0.9 entre le MRCC5 et TRMM (Fig. 25). Cependant, les écarts relatifs quadratiques moyens connaissent une faible diminution. L'écart entre le modèle et les

analyses de surface commence à se creuser en automne. Par contre, ils se rapprochent davantage durant les autres saisons.

Ces résultats obtenus avec le calcul du nombre de jours humides avec différents seuils nous permettent de comprendre davantage l'origine des biais dans les simulations du modèle MRCC5. En effet, les biais secs peuvent être associés à la faible fréquence des événements précipitants dans les simulations du modèle par rapport aux observations. Par contre, les biais humides peuvent être expliqués en partie par la fréquence élevée des événements précipitants dans le modèle, particulièrement en hiver. Ce qui fait donc que les biais humides s'expliquent, en général, par l'effet combiné de la fréquence élevée des jours humides et de la sensibilité du modèle aux faibles intensités de précipitation pendant la saison froide d'une part, et à la contribution des fortes intensités de précipitation en été d'autre part. Le diagnostic de la durée des événements pluvieux nous en dira plus.

### 3.5 Durée moyenne des événements pluvieux

Les durées des épisodes consécutifs avec des taux de précipitations horaires au-dessus de 1, 2 et 3 mm sont cumulées; le résultat est divisé par le nombre d'événements afin de calculer leur durée moyenne. Un événement est défini comme étant un intervalle de temps dans lequel les précipitations sont continues.

#### 3.5.1 Seuil 1 mm

La figure 26 illustre la durée moyenne des précipitations horaires estimée par les analyses Stage IV et celles simulées par le modèle MRCC5

pour un seuil de 1 mm. La durée des précipitations est, en général, beaucoup plus longue en hiver, particulièrement dans les régions côtières au Nord-est et celles près de la côte du Golfe du Mexique, en raison de la prépondérance des cyclones baroclines le long de la côte Est et la proximité de la source principale d'humidité (e.g. Kursinski and Mullen, 2008). Cette caractéristique est aussi bien observée avec les analyses Stage IV qu'avec les simulations du MRCC5; mais elle est plus marquée dans les simulations du MRCC5. Le modèle et les observations sont discordants en été sur la majeure partie du domaine. En effet, la durée des événements pluvieux est plus longue dans les simulations du modèle. Toutefois, durant cette saison, les précipitations sont caractérisées par une durée inférieure à 3 heures sur tout le domaine. Cette différence entre la durée des précipitations hivernales et estivales est étroitement liée à l'échelle à laquelle les phénomènes qui modulent les précipitations durant ces saisons appartiennent. En hiver, les systèmes synoptiques qui se développent dans le golfe du Mexique et sur l'Océan Atlantique produisent des précipitations sur une grande échelle spatiale durant de longues heures. Par contre, en été, les précipitations sont modulées par les systèmes convectifs tels que les orages de masse d'air et les circulations locales de brise qui ont souvent une courte durée de vie. Durant les saisons de transitions, la durée des précipitations suit une répartition presque uniforme sur tout le domaine, à l'exception de quelques régions sur la côte Est au Nord. Dans ces régions, les épisodes précipitants durent en moyenne plus longtemps, surtout dans les simulations du MRCC5.

Les différences absolues et relatives (en heures) entre les simulations du MRCC5 et les analyses Stage IV sont présentées sur la figure 27. Les différences ont une faible magnitude sur la majeure partie du domaine où les différences absolues et relatives sont respectivement inférieures à 1/2 h et 20 %. Dans le reste du domaine, des différences positives sont observées surtout dans quelques régions au nord de 37°N en hiver et au printemps, et

dans les régions adjacentes de la côte Est en été; tandis qu'en automne les différences ont tendance à changer de signe. Les différences positives et négatives sont généralement de l'ordre de 1/2-1 h et 20-40 %.

### 3.5.2 Seuil 2 mm

La figure 28 permet de comparer la durée moyenne des précipitations horaires excédant 2 mm des analyses Stage IV et simulations du MRCC5. La durée moyenne des événements a diminué considérablement lorsqu'on passe d'un seuil de 1 mm à un seuil de 2 mm. Avec ce seuil, le modèle reproduit mieux les caractéristiques observées, surtout dans les saisons d'intérêt, hiver et été. Des différences sont notables dans le Mid-Ouest et dans quelques régions du Sud au printemps et également dans quelques régions côtières au Nord-est en été. Les différences absolues et relatives (Fig. 29) sont fortement réduites avec l'augmentation du seuil, jusqu'à même changer de signe dans plusieurs régions en hiver et automne, et dans quelques régions du sud au printemps. Elles sont inférieures à 1/2 h et 20 %, respectivement, sur presque l'ensemble du domaine. Toutefois, il faut noter que les importantes différences positives observées en hiver dans le Nord-ouest sont peu conséquentes car elles se produisent dans les régions de faibles précipitations où les différences absolues entre le modèle et les observations sont négligeables. Cependant, l'accord entre les simulations du MRCC5 et les analyses Stage IV a considérablement amélioré en été et au printemps.

### 3.5.3 Seuil 3 mm

La figure 30 présente la durée moyenne des précipitations horaires au dessus de 3 mm. L'augmentation du seuil n'a presque pas influencé les

événements estivaux qui, en moyenne, ont la même durée sur tous les points du domaine. Ceci est dû à la prépondérance des systèmes convectifs qui produisent souvent d'intenses précipitations pendant une courte durée. En hiver et automne, les événements qui ont une plus longue durée sont observés dans le sud dans les régions adjacentes du golfe de Mexique et sur les régions côtières au Nord-est. Ces caractéristiques sont faiblement reproduites par le modèle, surtout celles d'hiver. Par contre, les simulations du MRCC5 ont bien reproduit les caractéristiques observées en été et au printemps, avec les événements qui semblent durer moins longtemps et presque uniforme sur tout le domaine. Durant ces saisons, les différences absolues (Fig. 31) restent inférieures à 1/2 h sur presque l'ensemble du domaine. Les différences relatives (Fig. 31) positives persistent toujours et sont plus fréquentes en été; tandis que les différences relatives négatives observées dans les régions du sud au printemps ont diminué avec l'augmentation du seuil. En hiver et automne, les différences absolues négatives ont diminué; mais les différences relatives correspondant sont plus fréquentes, en particulier, sur plusieurs régions au nord de 37°N. D'importantes différences positives, peu conséquentes (voir section seuil 2 mm), sont encore observées au Nord-ouest en hiver.

L'étude de la durée moyenne des événements précipitants définis avec différents seuils nous permet d'explicitier davantage les causes de la surestimation ou sous-estimation des précipitations saisonnières simulées par le modèle MRCC5. Les biais humides persistants dans les régions au nord de 37°N au printemps et les régions adjacentes de la côte Est en été s'expliquent en partie par la longue durée des précipitations simulées. Cependant, la performance des simulations du MRCC5 dans la majeure partie du domaine en été nous laisse croire que les biais secs dans les régions du centre et d'ouest de 90°W, et les biais humides en Floride ne sont pas associés à la durée des événements précipitants dans la simulation du

modèle. De même, la surestimation des précipitations dans la majeure partie du domaine par le MRCC5 en hiver et automne ne semble pas associée à la durée des événements précipitants simulés; bien que ceux-ci ont tendance à durer plus longtemps lorsque le seuil est de 1 mm. Par contre, la sous-estimation des précipitations d'automne est influencée par la durée des épisodes précipitants simulés.

## CONCLUSION

Nous avons utilisé les analyses Stage IV à haute résolution spatiotemporelle (4 km, 1 h) pour évaluer les simulations du modèle MRCC5. Les données CPC et TRMM sont également utilisées dans notre étude. La performance des simulations du MRCC5 pilotées par les réanalyses ERA-Interim à simuler les différents aspects du climat présent est évaluée en utilisant différentes statistiques. Le résultat de l'évaluation des simulations du MRCC5 par les estimations Stage IV n'est pas très différent de celui entre le MRCC5 et les deux autres bases de données. La comparaison des simulations aux analyses montre en général que le modèle a réussi à reproduire plusieurs aspects dans les statistiques des précipitations.

Les résultats indiquent que le modèle a eu des difficultés à simuler correctement les précipitations dans certaines régions où se produisent les maximums de précipitation, présentant des biais humides et secs, selon la région et la saison, de l'ordre de 20-60 %. Il surestime systématiquement les précipitations hivernale et printanière. Cette surestimation est également notée dans les régions Est d'une ligne imaginaire (entre la vallée du Mississippi et la chaîne des Appalaches) en été, et en Floride, dans les régions côtières au sud de 37°N et dans les Grands Lacs en automne. Par contre, il sous-estime les précipitations dans les régions Ouest de 90°W, particulièrement dans les régions Ouest des Grands Lacs, en été, et dans les états du Mississippi et de l'Alabama en automne.

La comparaison du cycle diurne observé avec les analyses Stage IV et celui simulé par le MRCC5 montre que le modèle a relativement bien reproduit les principales caractéristiques des cycles observés. Cependant, il a des difficultés à capturer les maximums nocturnes, surtout dans la sous-région du Centre en été. Le modèle semble avoir des problèmes à bien résoudre les phénomènes responsables des importantes précipitations

nocturnes contrairement à ceux responsables des intenses précipitations en fin d'après-midi.

Les distributions de fréquence des précipitations horaires de Stage IV et du MRCC5 se ressemblent en général dans tous les sous domaines pour toutes les saisons. Leur maximum d'intensité coïncide généralement, sauf en été et dans la sous-région du Sud où la distribution du modèle ayant tendance à être décalée vers les faibles intensités. Durant la saison froide, la contribution des faibles intensités de précipitation est surestimée dans le MRCC5; mais il se peut aussi que les données Stage IV sous-estiment les faibles intensités de précipitations. Cette distribution est une valeur ajoutée car elle nous permet de quantifier la contribution des fortes intensités dans l'accumulation totale des précipitations, caractéristique souvent perdue lors des manipulations des moyennes journalières (e.g., Martynov et al., 2013; Šeparović et al., 2013).

Le modèle reproduit assez bien les principales caractéristiques de la distribution spatiale du nombre moyen de jours humides au-dessus du seuil de 1 mm, mais généralement avec un plus grand nombre de jours humides, surtout en hiver dans les régions où se produisent les valeurs maximales. Le MRCC5 concorde presque parfaitement avec les analyses Stage IV en été; tandis qu'il surestime systématiquement les jours humides dans plusieurs régions avec un biais de 20-80 % durant les autres saisons. Avec le passage du seuil à 2 mm puis à 3 mm, les différences absolues deviennent négligeables et les différences relatives sont réduites de 20 % dans les zones où elles sont habituellement observées. En revanche, les déficits et excès de jours humides (20-40 %) deviennent respectivement plus fréquents dans les régions nord-ouest et au sud de 37°N en été.

La performance des simulations du MRCC5 à reproduire les statistiques des précipitations horaires, notamment la durée moyenne des événements précipitants, est également évaluée grâce aux analyses Stage

IV. Ceci constitue également une valeur ajoutée. Le modèle a les résultats les plus positifs dans ces statistiques. Il performe bien dans les régions de précipitations abondantes, surtout en hiver et été où les différences entre la simulation du MRCC5 et les observations Stage IV sont généralement négligeables. La durée calculée par la simulation du modèle est légèrement plus longue dans quelques régions. Les différences positives observées dans certaines régions en hiver pour le seuil 1 mm sont fortement réduites, jusqu'à même changer de signe, avec l'augmentation du seuil à 2 mm puis à 3 mm. Durant la saison chaude, l'augmentation du seuil est accompagnée généralement d'une réduction des biais; mais les différences relatives positives deviennent plus fréquentes en été pour le seuil 3 mm.

La faible performance du MRCC5 à simuler correctement les précipitations dans certaines régions du domaine analysé porte à croire qu'elle est en partie associée aux schémas de paramétrisation utilisés dans le modèle (e.g., Hong and Leetmaa, 1999). En plus, avec la résolution élevée du MRCC5, les schémas de paramétrisation utilisés sont inadéquats, et l'hypothèse d'un modèle non-hydrostatique doit éventuellement être remise en question. L'analyse de la distribution de fréquence des précipitations horaires, du nombre moyen de jours humides et de la durée moyenne des précipitations nous a permis de comprendre comment ces lacunes se manifestent. En effet, la sous-estimation des précipitations dans les régions ouest et adjacentes des Grands Lacs est associée au faible nombre de jours humides du modèle. Ce dernier semble avoir des difficultés à bien résoudre les mécanismes responsables des précipitations nocturnes. En revanche, la surestimation des précipitations durant la saison froide s'explique par la sensibilité du modèle aux faibles intensités de précipitation. Cette sensibilité semble être un problème commun pour les modèles climatiques (Kendon et al., 2012). Par contre, la surestimation des fortes précipitations estivales en Floride est associée à la prépondérance élevée des jours humides et à la

contribution des fortes intensités de précipitation dans les simulations du MRCC5. Tandis que, dans les régions adjacentes de la côte Est, la prépondérance légèrement élevée des jours humides, la contribution des fortes intensités de précipitation et la durée des évènements précipitants légèrement plus longue dans les simulations du modèle sont probablement responsables de la surestimation des précipitations simulées par le MRCC5.

Pour remédier à ce problème, il est primordial d'utiliser des schémas de paramétrisation valides pour cette résolution du modèle. Ceci est un grand défi en raison du nombre limité d'hypothèses qui rend plus complexe le problème à cette échelle. Une autre possibilité est de raffiner les simulations jusqu'à une résolution où la convection devient "permise" sur la grille du modèle (avec un maillage de 1 km, par exemple). Cette dernière proposition est presque irréaliste pour les études climatiques en raison du coût élevé (en terme de temps et de ressources informatiques) pour réaliser les simulations. Cependant, l'optimisation des différents paramètres du modèle et la prise en compte de leurs interactions seraient une bonne voie pour rapprocher les précipitations simulées par le modèle à celles fournies par les données d'observations.

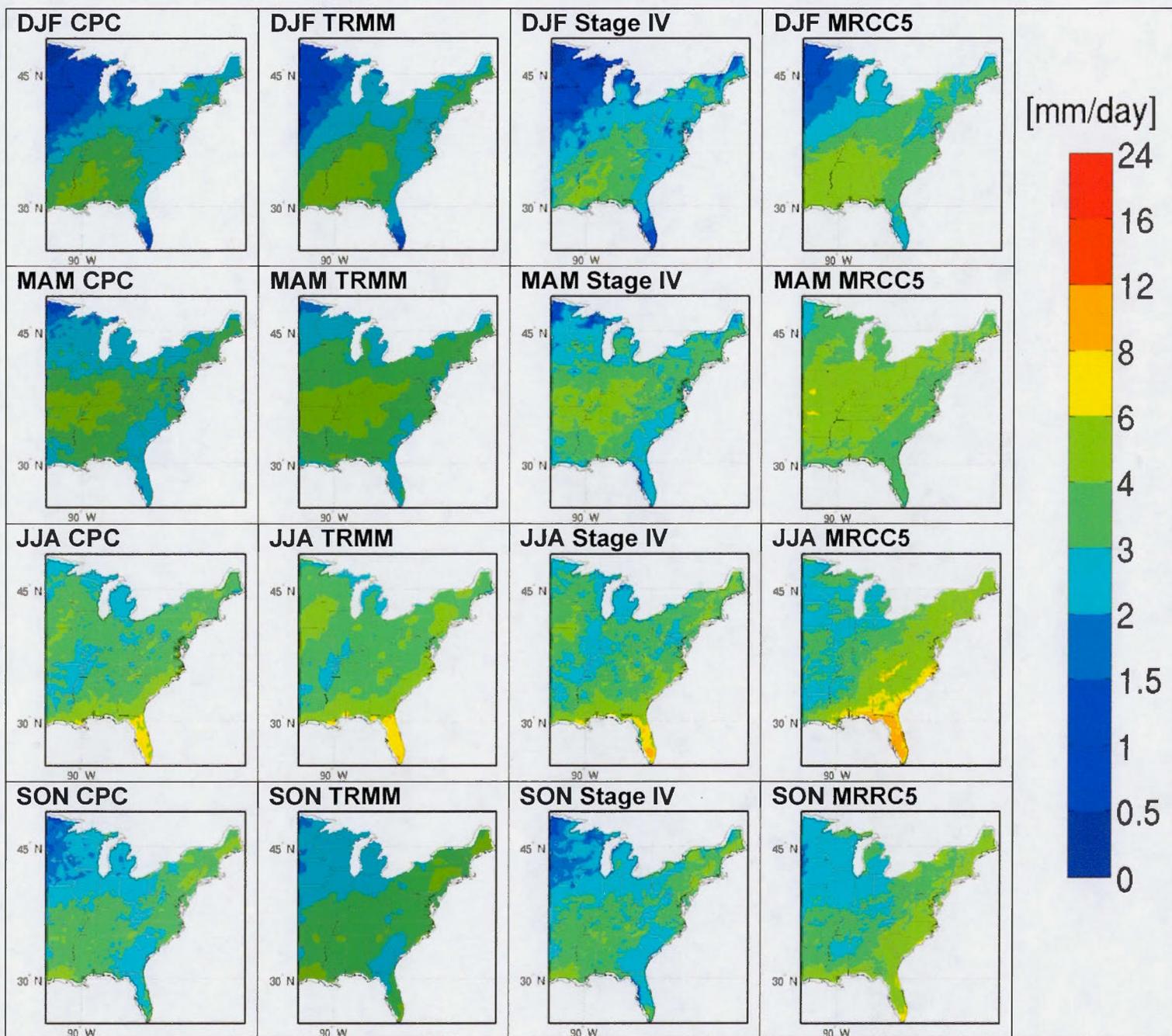


Figure 3.1: Comparaison entre les précipitations moyennes saisonnières (en mm/day) estimées par CPC (1ère colonne), TRMM (2ème colonne) et Stage IV (3ème colonne) et simulées par MRCC5 (4ème colonne) durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.

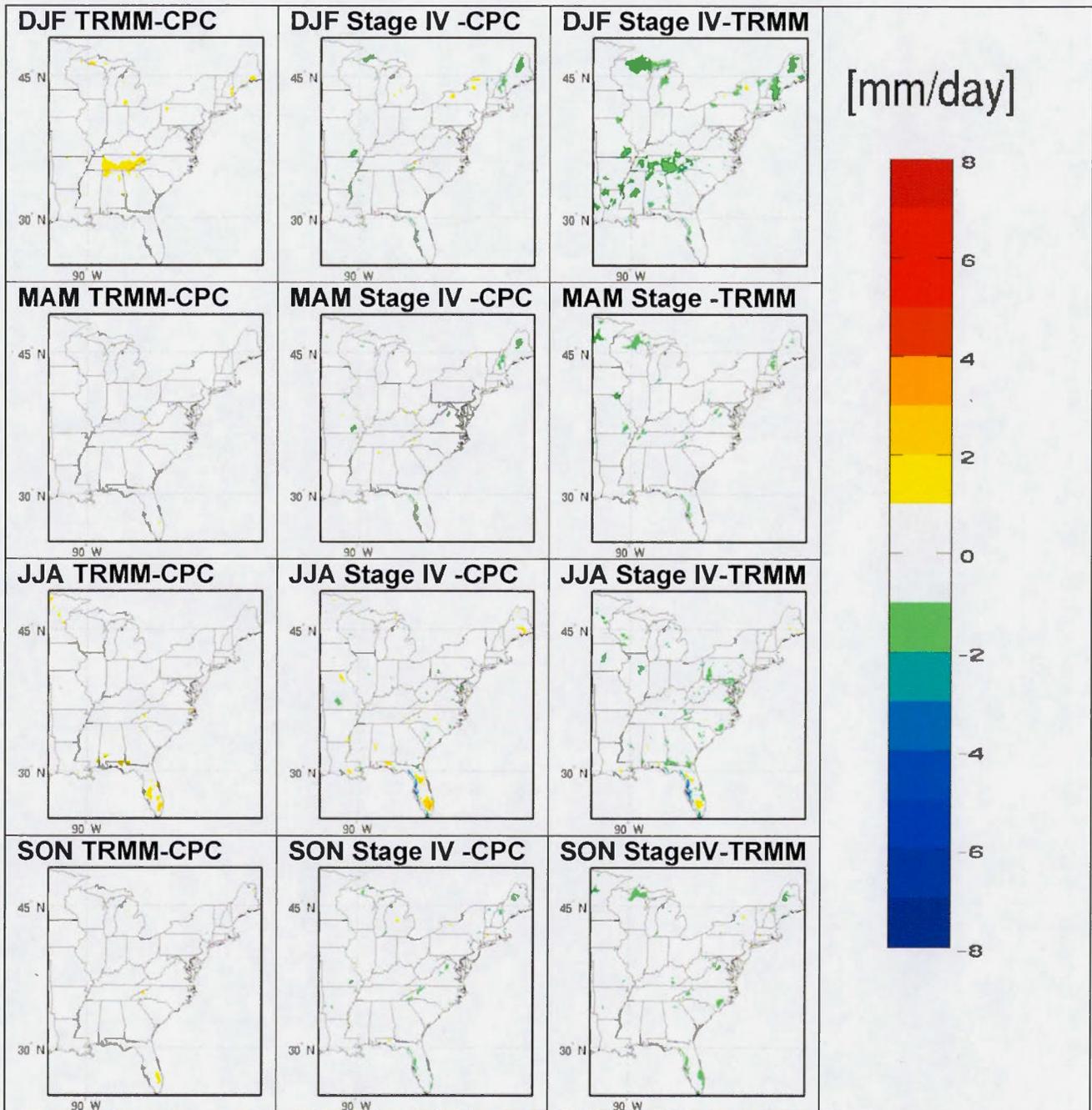


Figure 3.2: Différences absolues (en mm/day) entre CPC et TRMM (1ère colonne), CPC et Stage IV (2ème colonne) et Stage IV et TRMM (3ème colonne) pour les précipitations moyennes saisonnières durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.

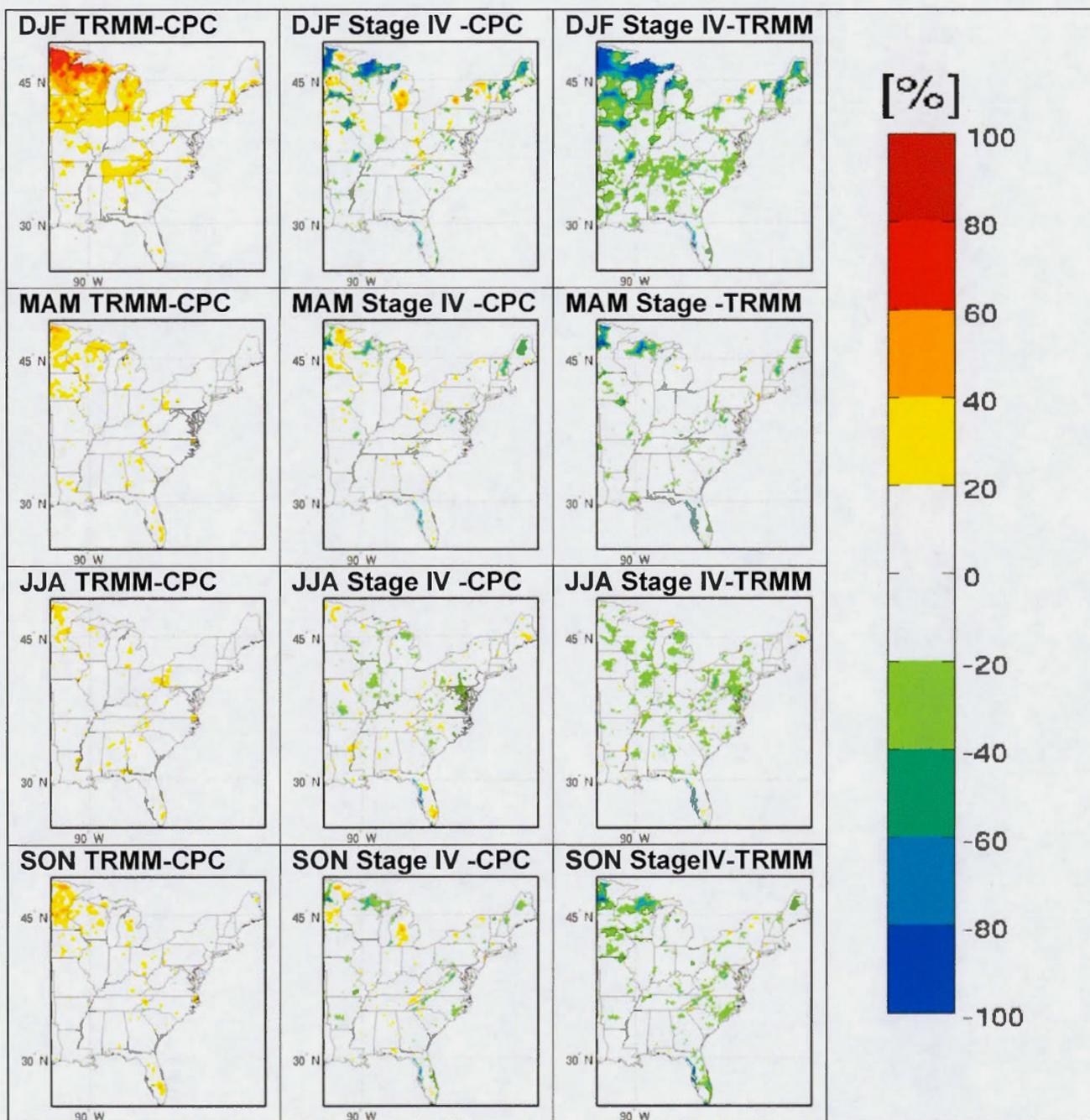


Figure 3.3: Différences relatives (en %) entre CPC et TRMM (1ère colonne), CPC et Stage IV (2ème colonne) et Stage IV et TRMM (3ème colonne) pour les précipitations moyennes saisonnières durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.

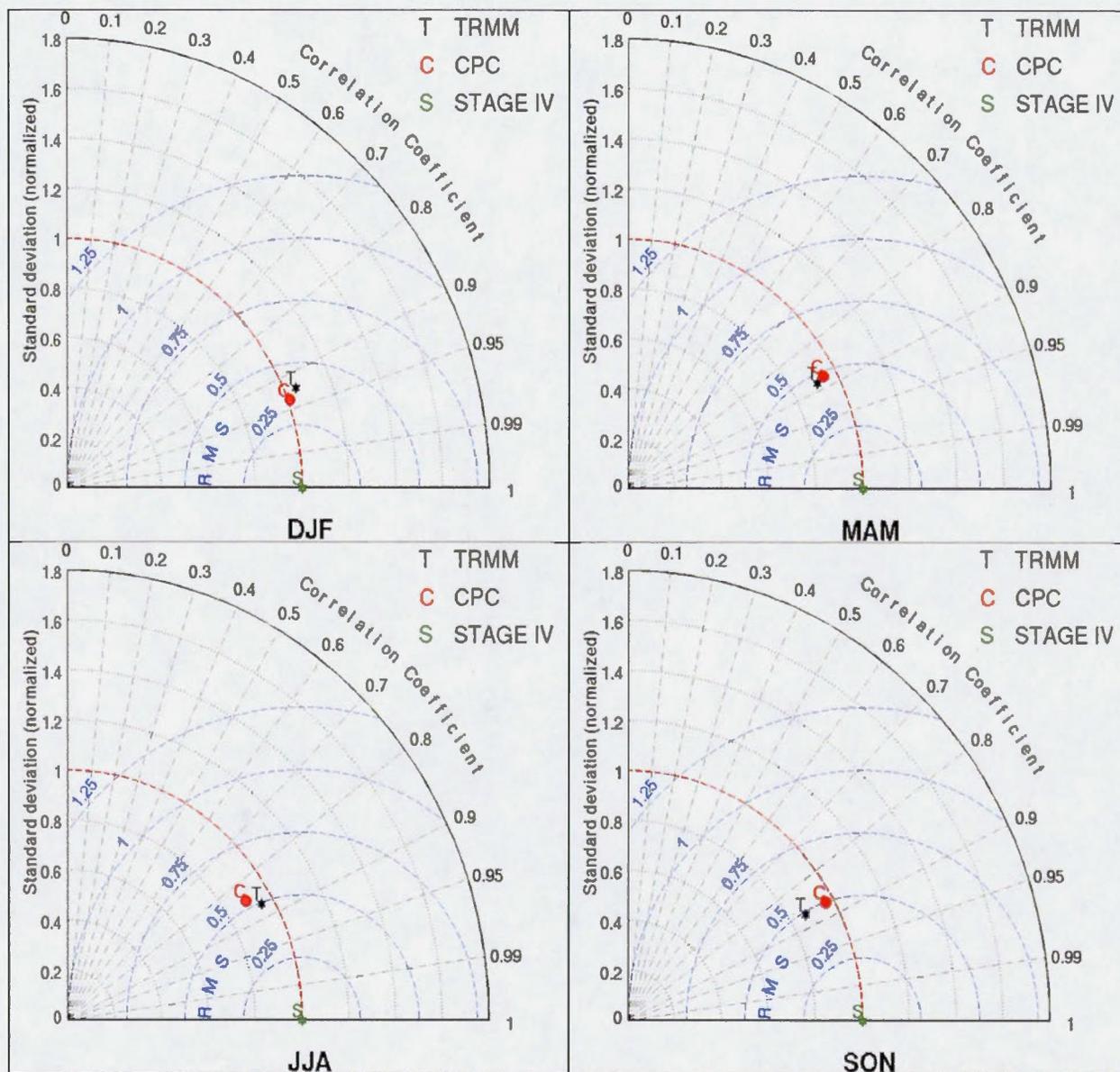


Figure 3.4: Diagramme de Taylor sur les statistiques des précipitations moyennes saisonnières observées sur la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.

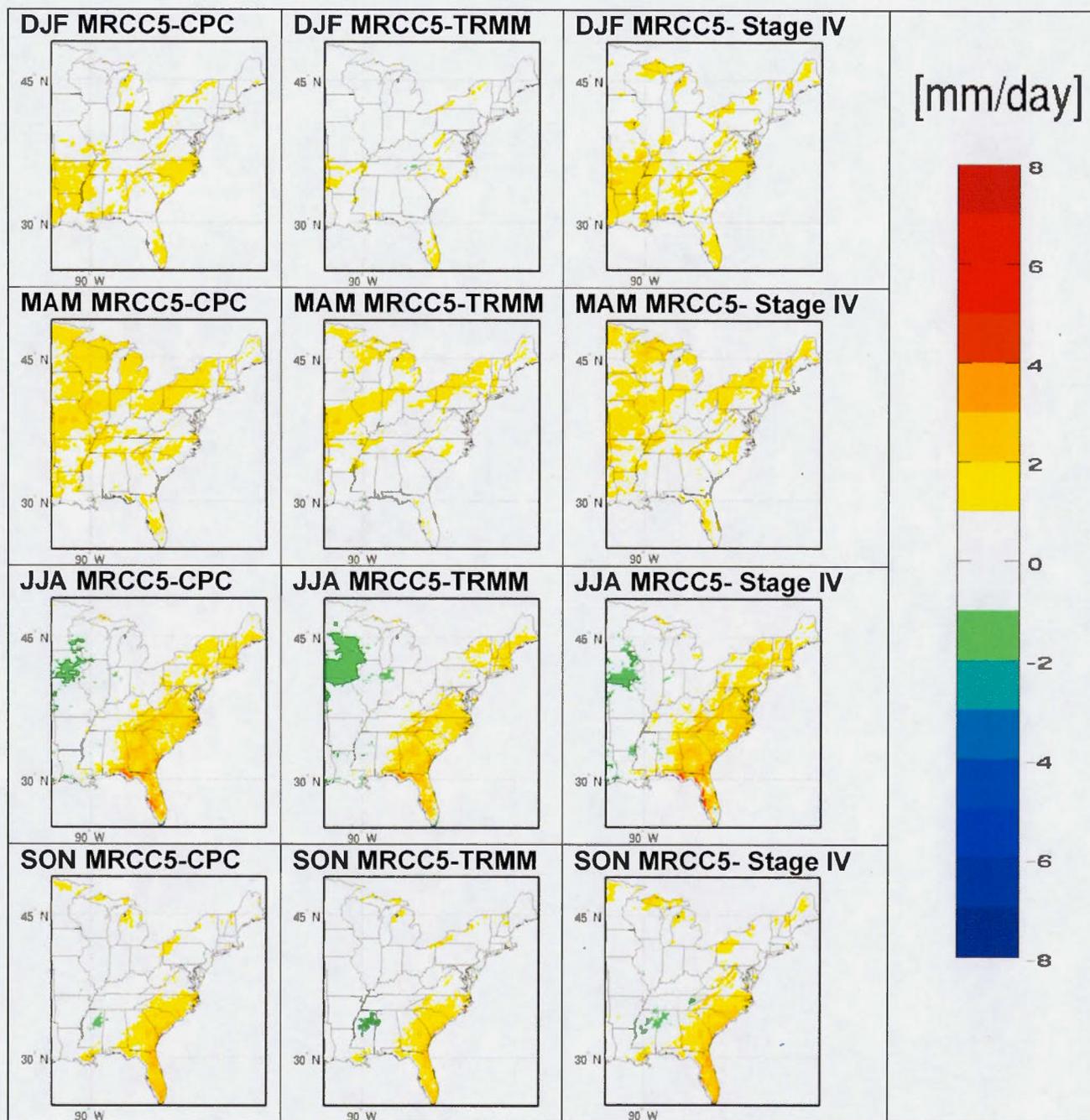


Figure 3.5: Différences absolues (en mm/j) entre MRCC5 et CPC (1ère colonne), MRCC5 et TRMM (2ème colonne) et MRCC5 et Stage IV (3ème colonne) pour les précipitations moyennes saisonnières durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.

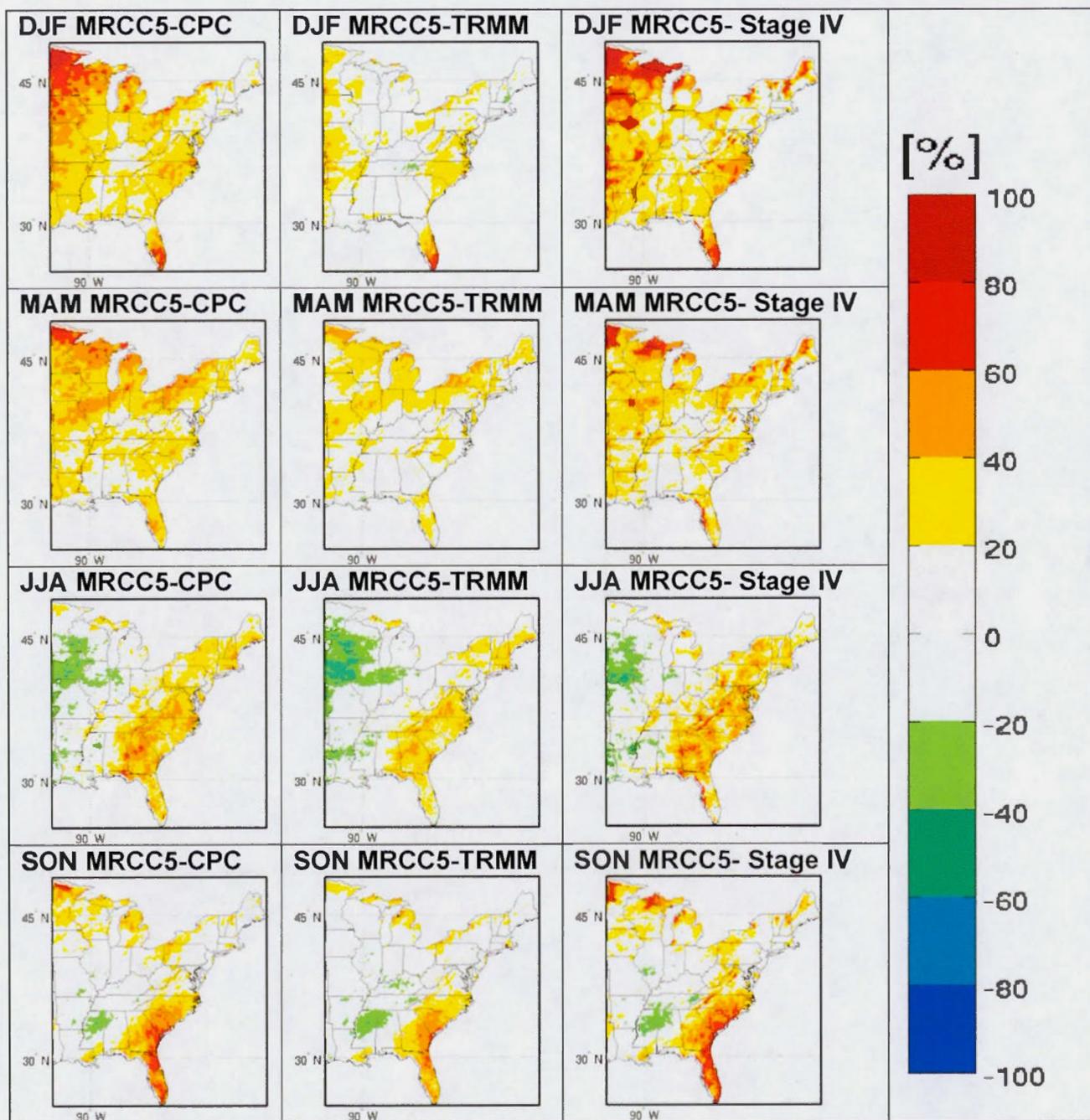


Figure 3.6: Différences relatives (en %) entre MRCC5 et CPC (1ère colonne), MRCC5 et TRMM (2ème colonne) et MRCC5 et Stage IV (3ème colonne) pour les précipitations moyennes saisonnières durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.

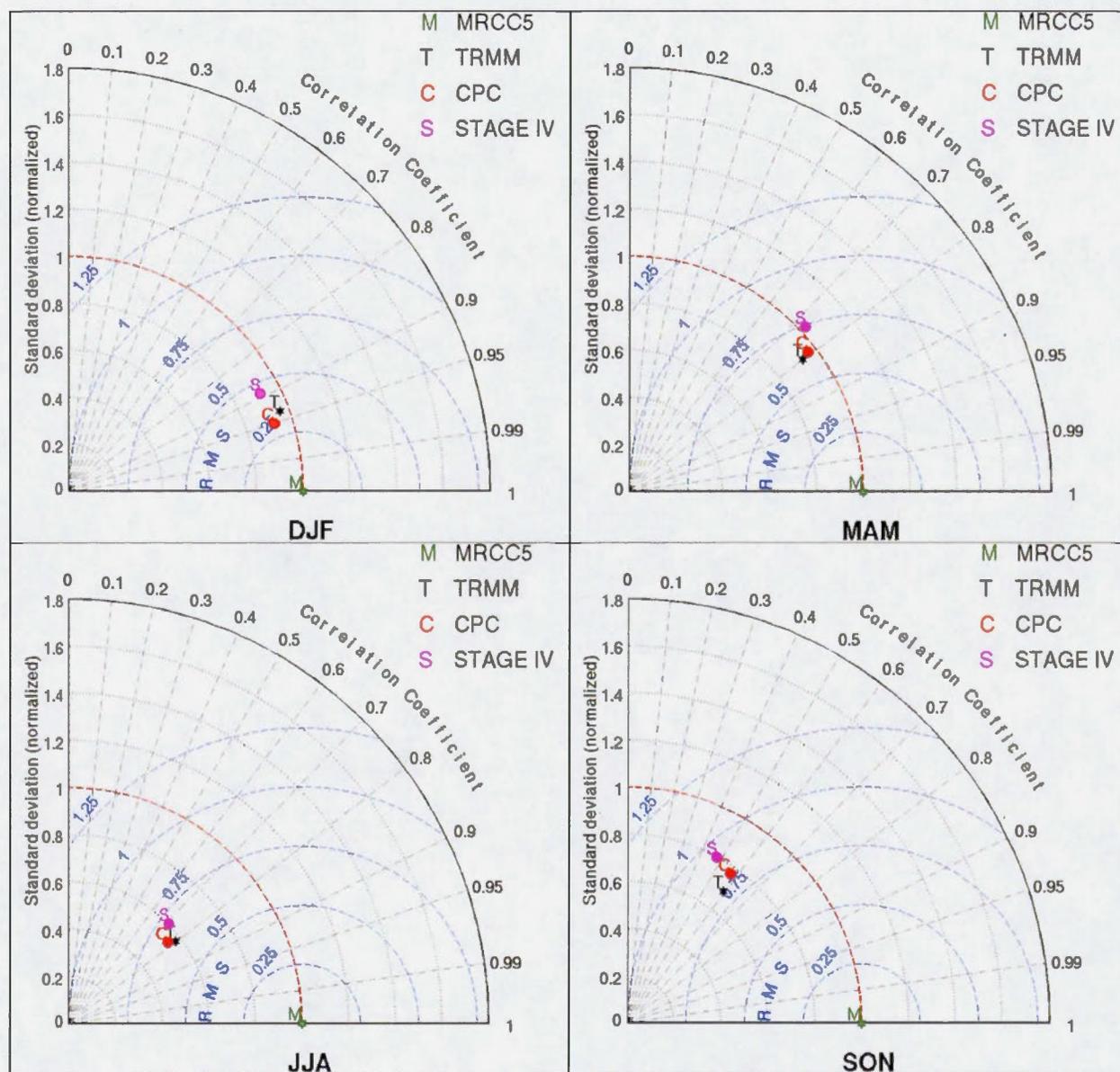


Figure 3.7: Diagramme de Taylor sur les statistiques des précipitations moyennes saisonnières observées et simulées sur la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.

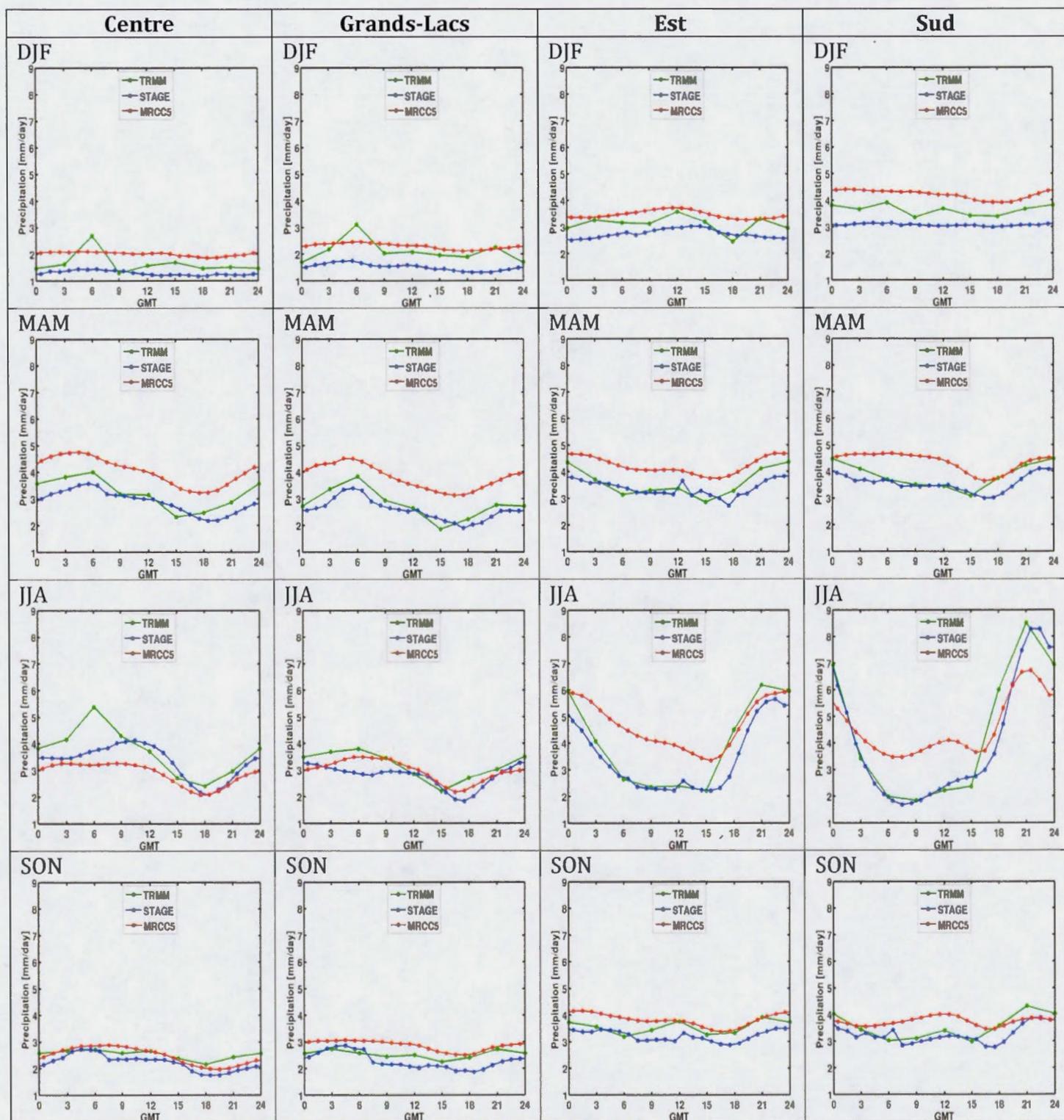


Figure 3.8: Cycles diurnes des précipitations (mm/day) estimées par Stage IV (bleu) et TRMM (vert), et celles simulées MRCC5 (rouge) dans les différentes sous régions considérées.

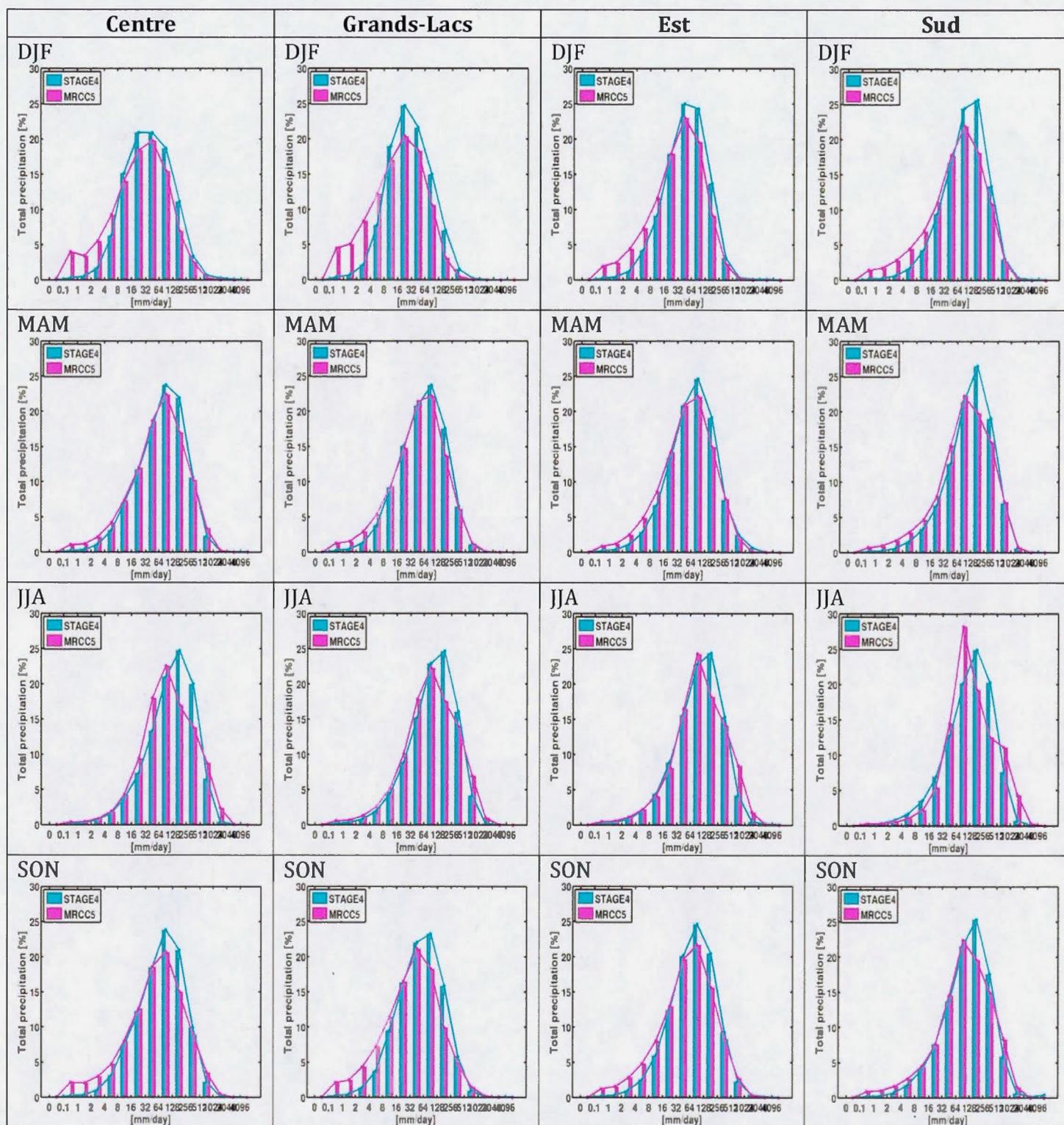


Figure 3.9: Distributions de fréquences des précipitations horaires estimées par Stage IV (cyan) et celles simulées par MRCC5 (magenta) dans les différentes sous régions.

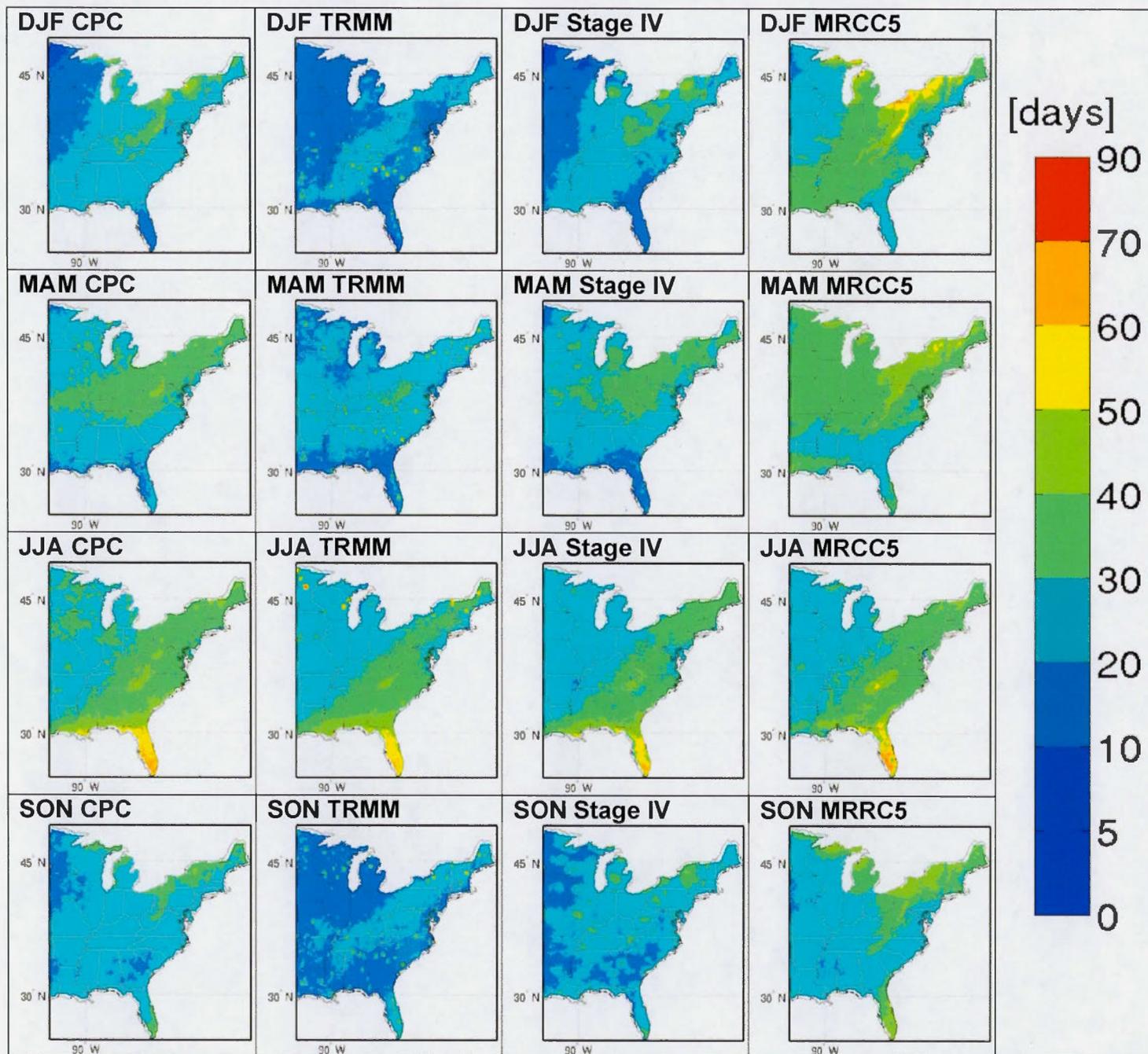


Figure 3.10: Comparaison des nombres moyens de jours humides à seul 1 mm (days) estimés par CPC (1ère colonne), TRMM (2ème colonne) et Stage IV (3ème colonne) et simulés par MRCC5 (4ème colonne) durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.

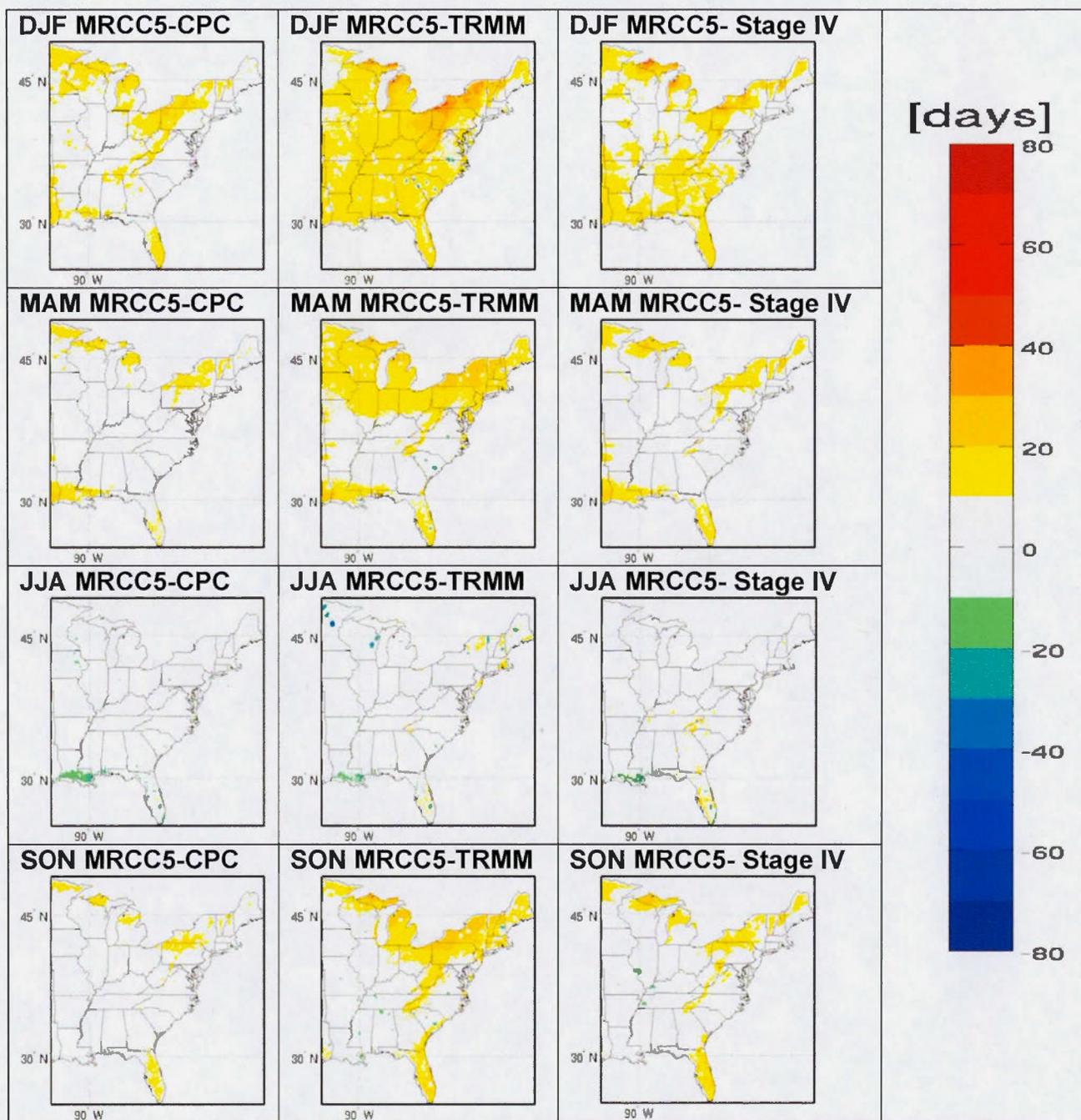


Figure 3.11: Différences absolues (en jours) entre MRCC5 et CPC (1ère colonne), MRCC5 et TRMM (2ème colonne) et MRCC5 et Stage IV (3ème colonne) sur les statistiques du nombre moyen de jours humides à seul 1 mm durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.

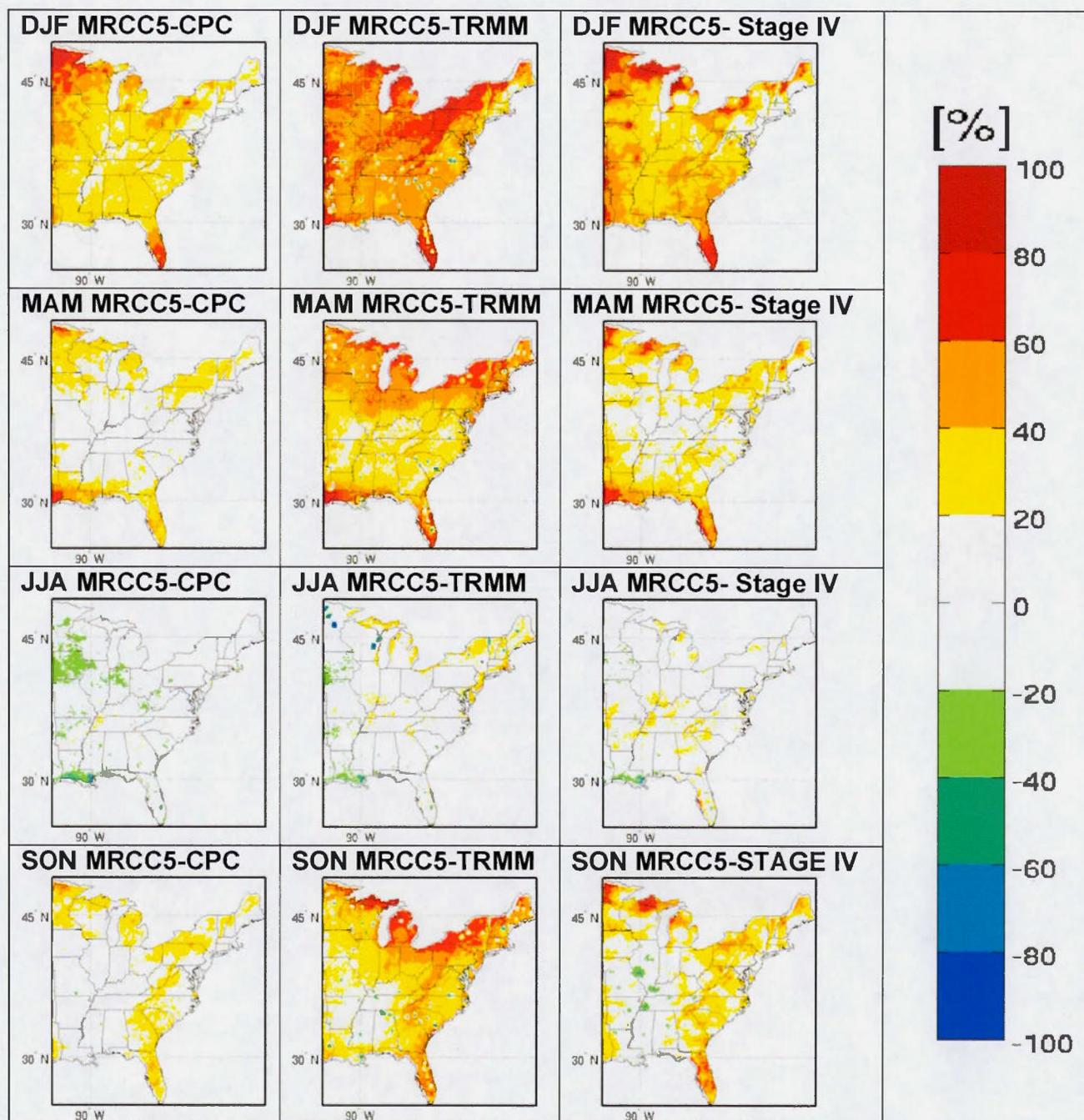


Figure 3.12: Différences relatives (%) entre MRCC5 et CPC (1ère colonne), MRCC5 et TRMM (2ème colonne) et MRCC5 et Stage IV (3ème colonne) sur les statistiques du nombre moyen de jours humides à seul 1 mm durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.

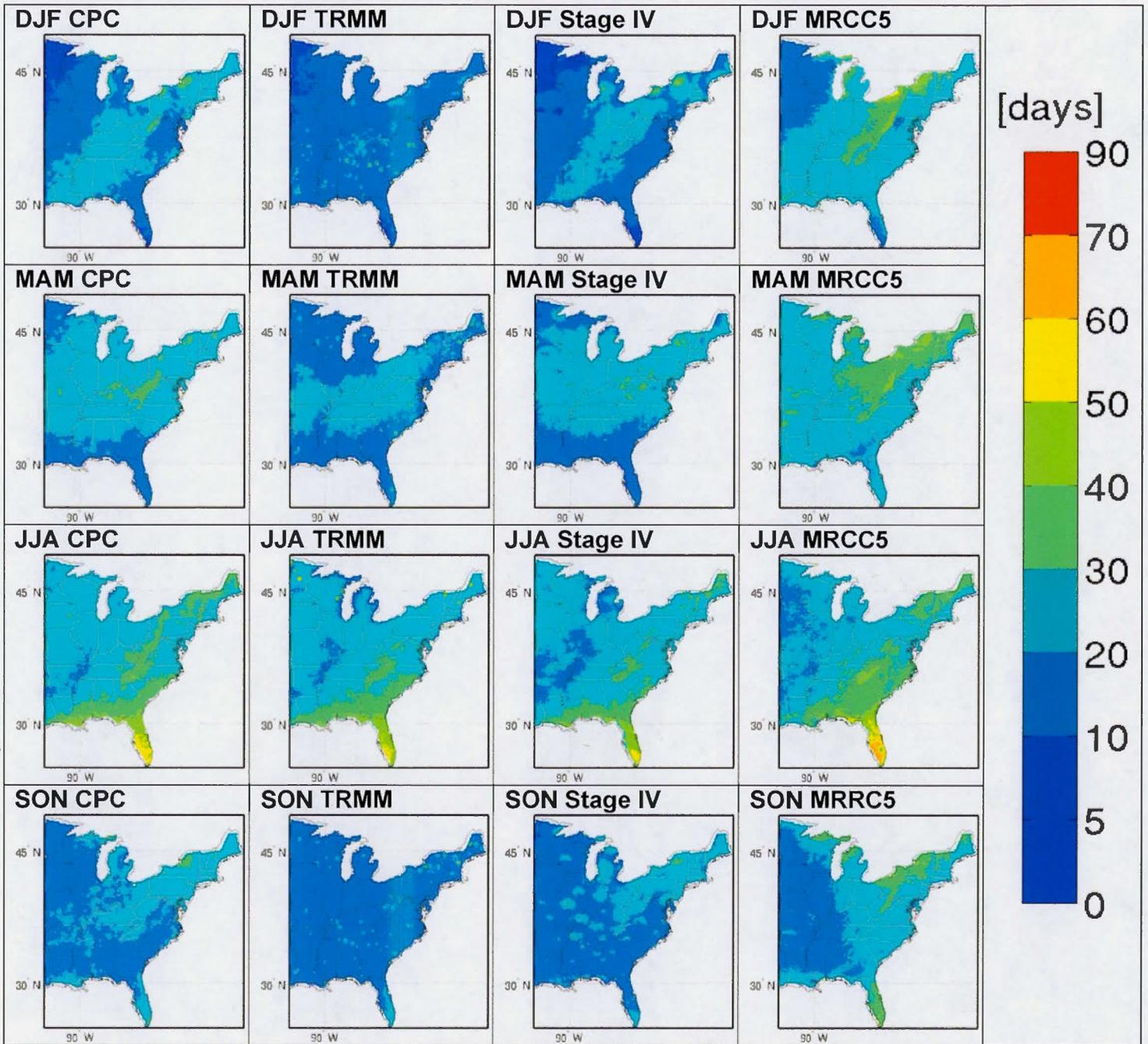


Figure 3.13: Mêmes que la figure 3.10, mais pour un seuil de 2 mm

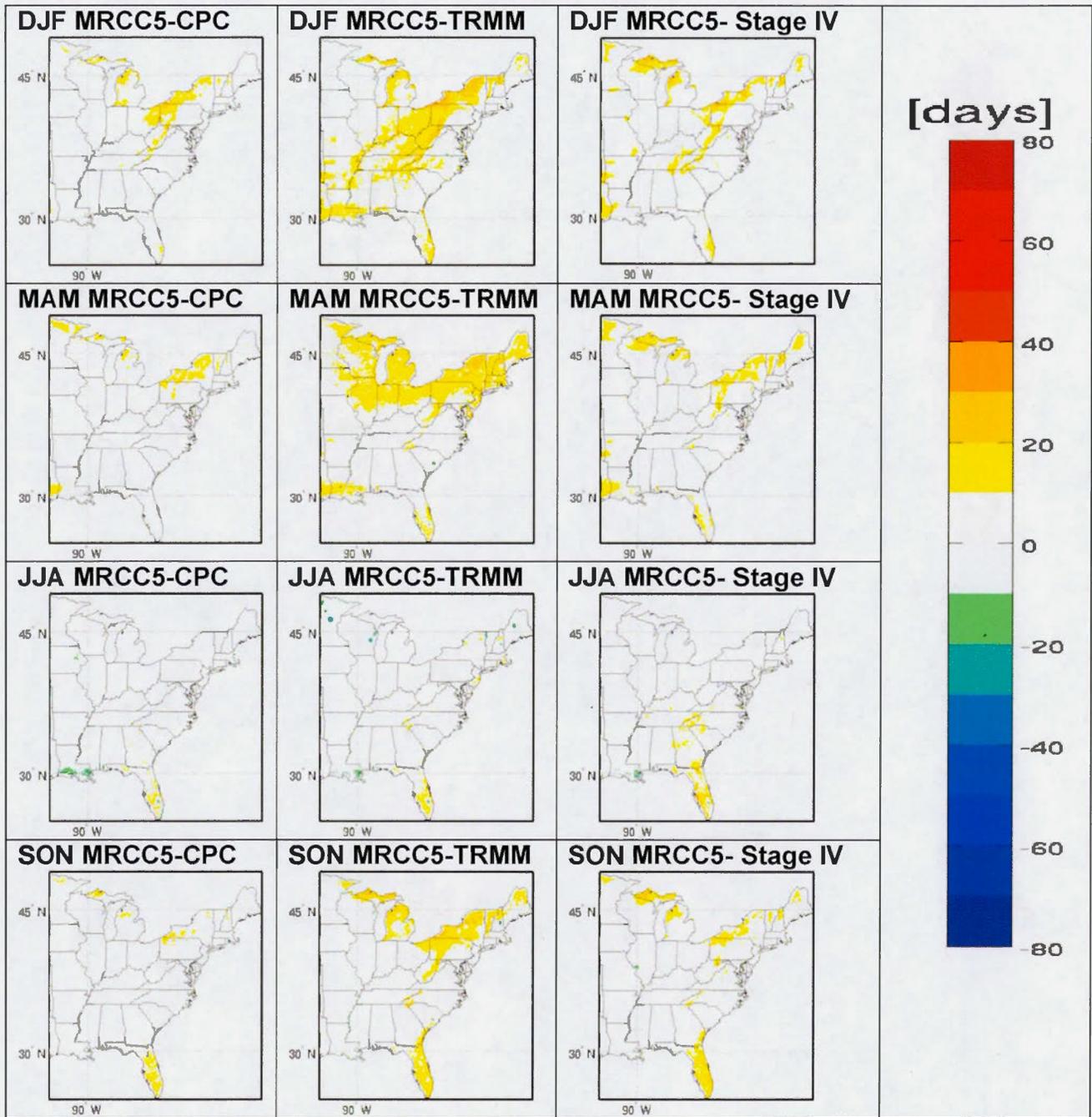


Figure 3.14: Môme que la figure 3.11, mais pour un seuil de 2 mm

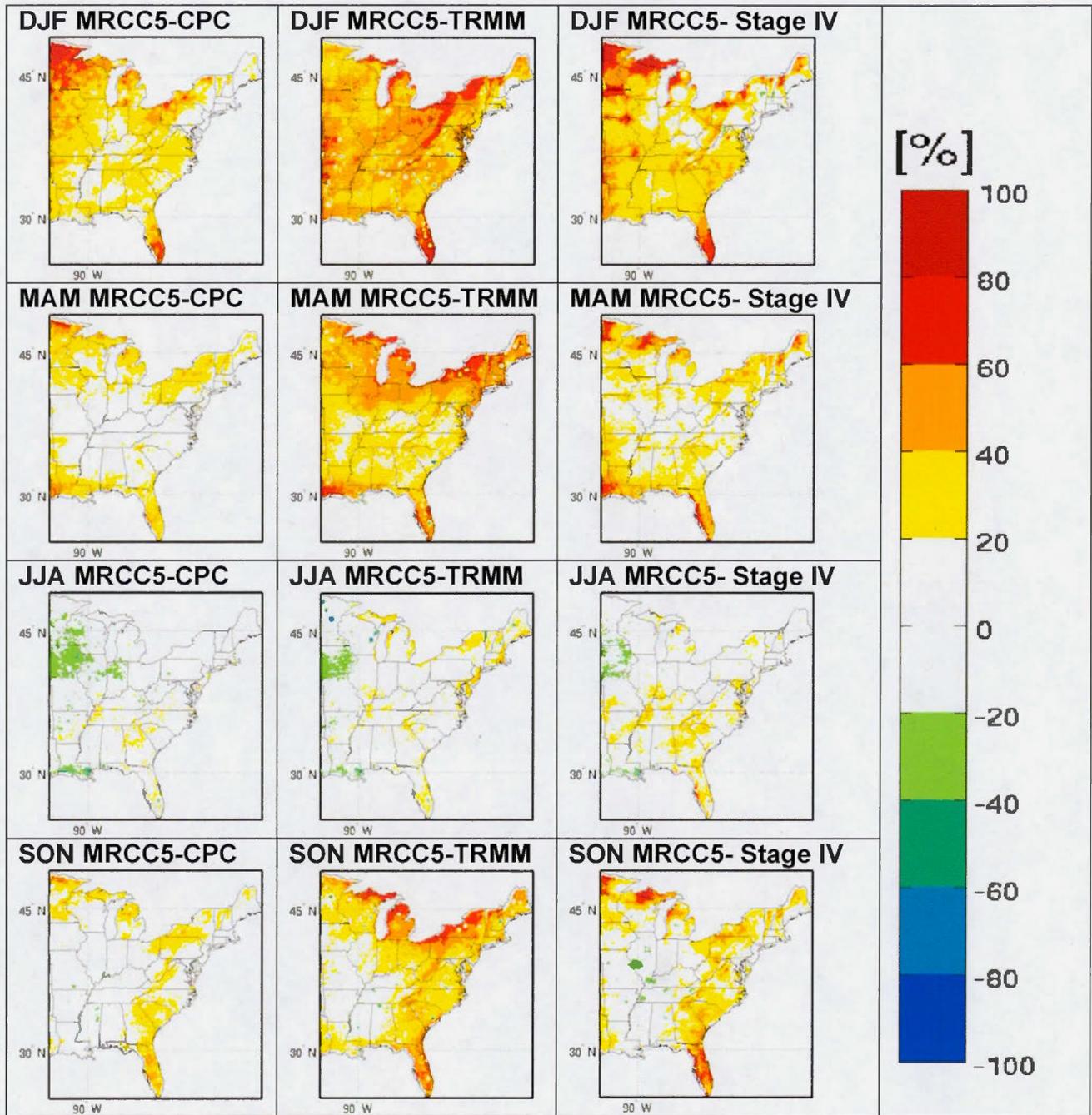


Figure 3.15: Môme que la figure 3.12, mais pour un seuil de 2 mm

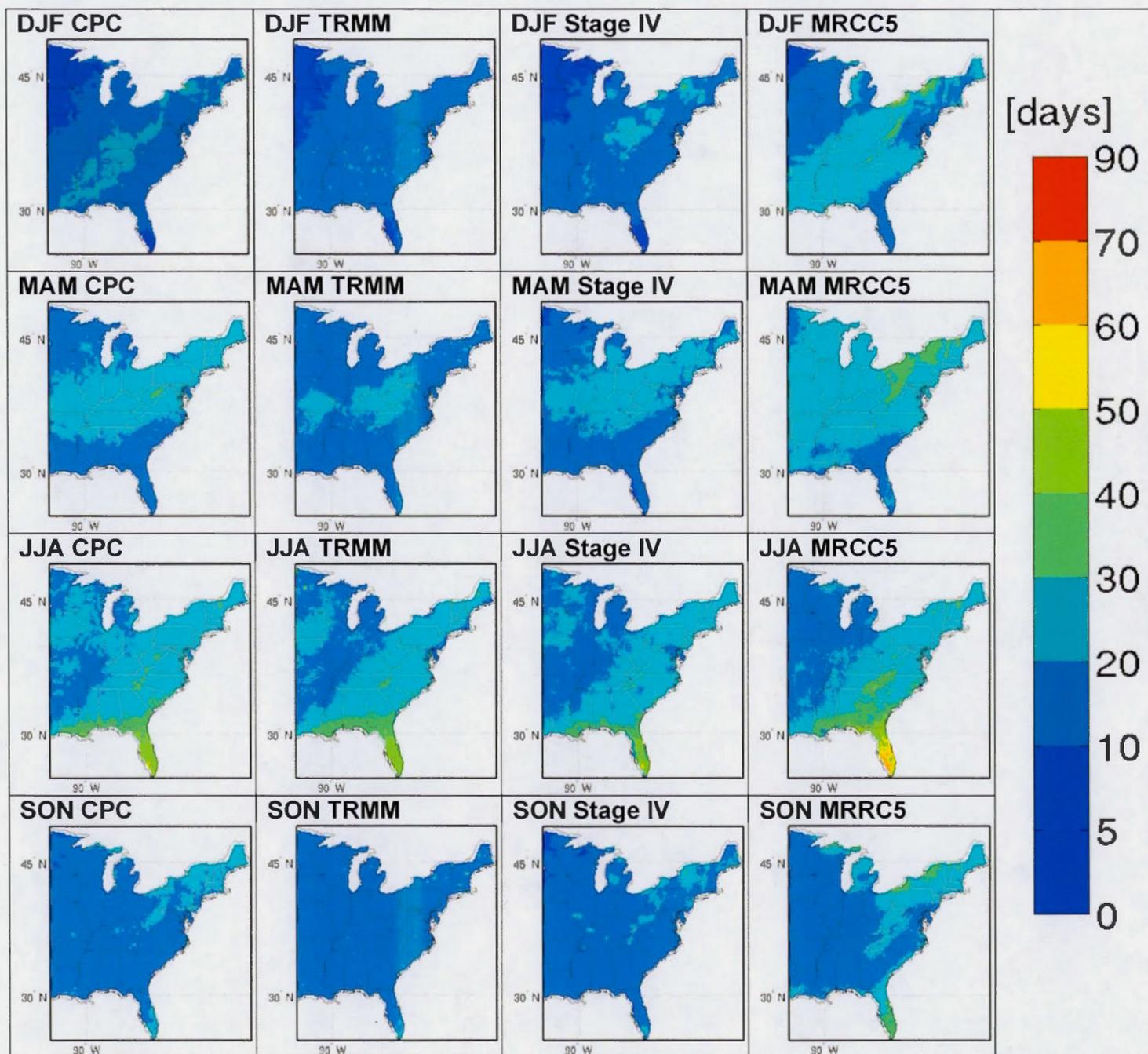


Figure 3.16: Même que la figure 3.10, mais pour un seuil de 3 mm

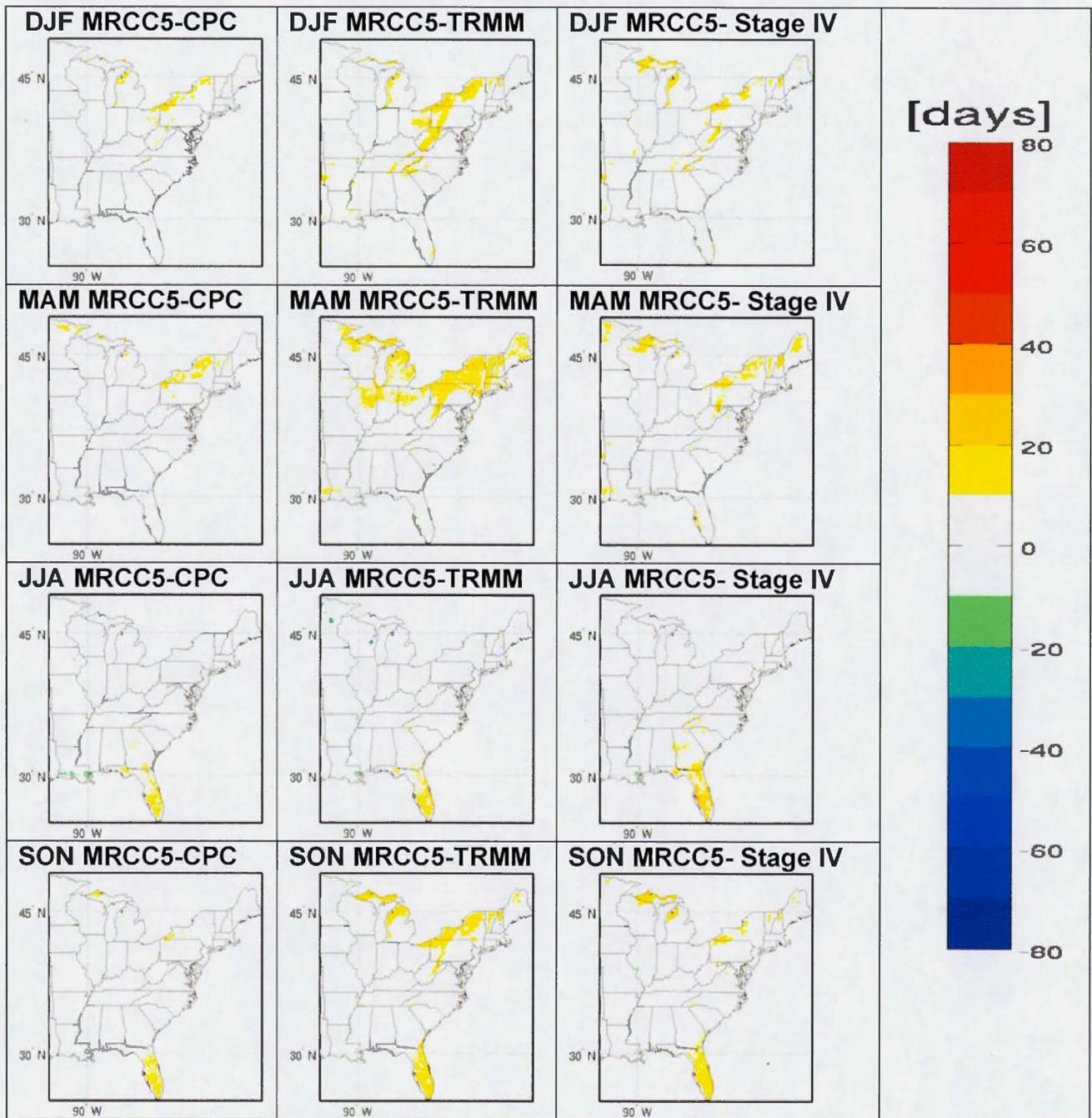


Figure 7.17: Mêmes que la figure 3.11, mais pour un seuil de 3 mm

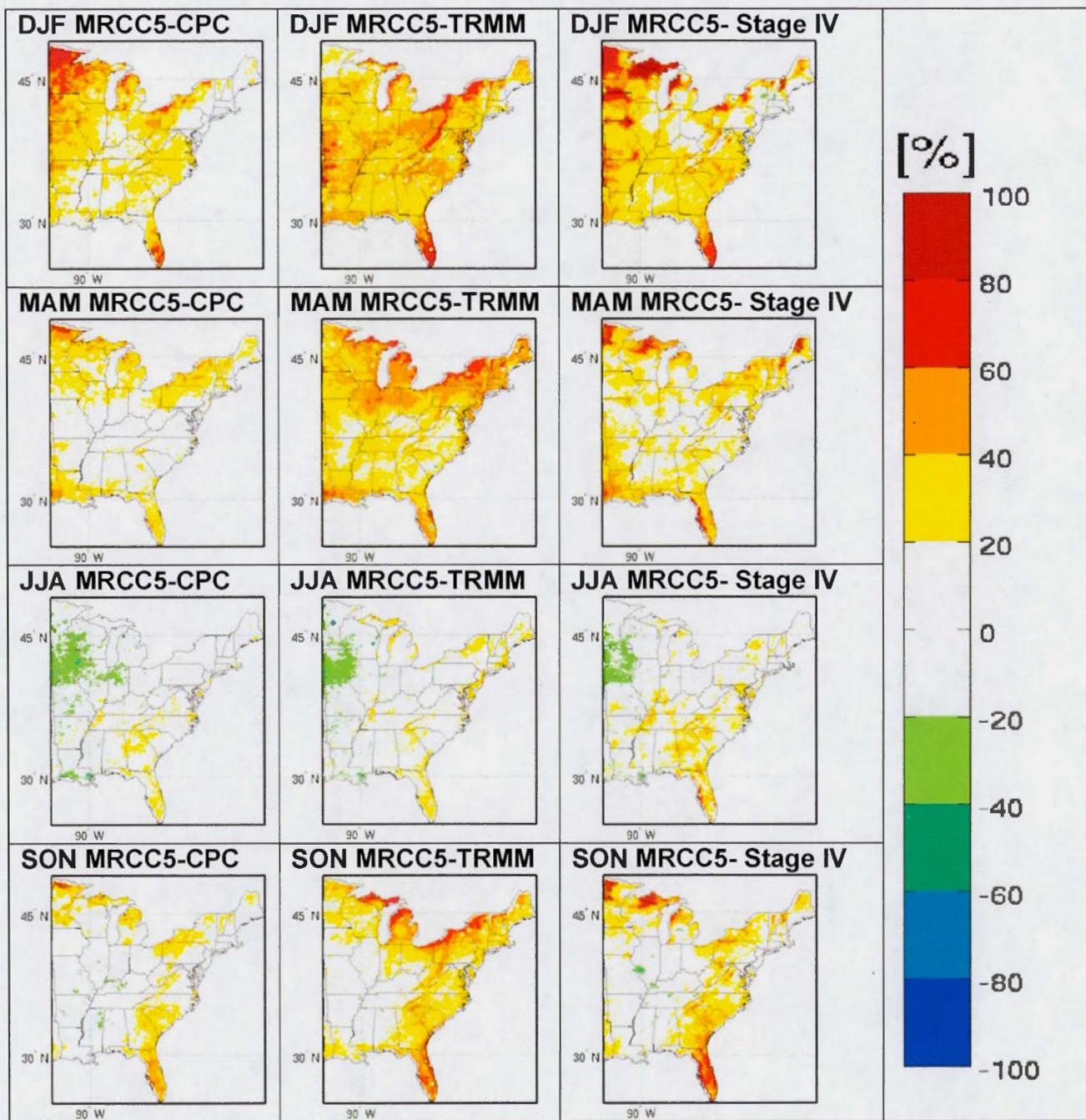


Figure 3.18: Même que la figure 3.12, mais pour un seuil de 3 mm

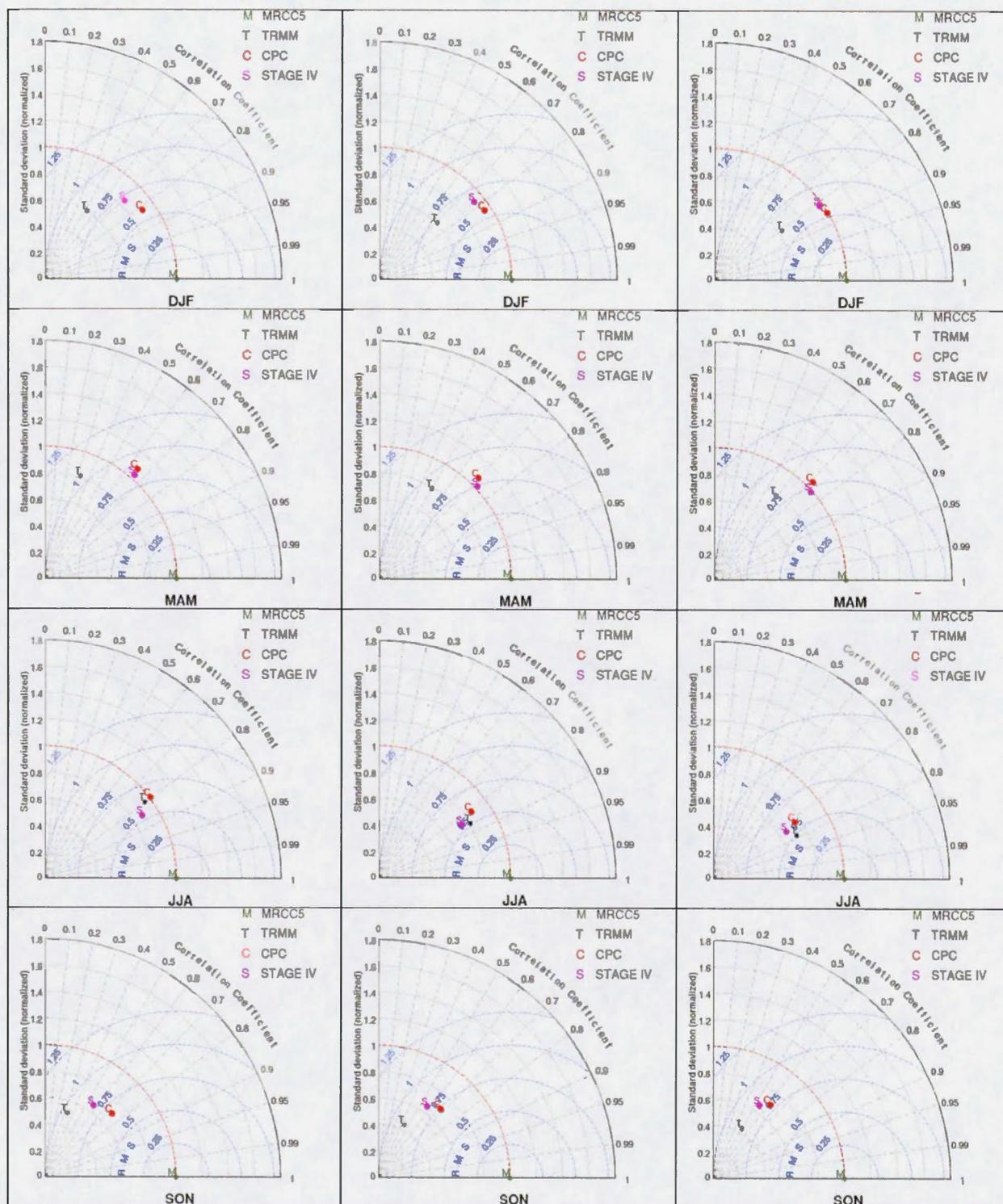


Figure 3.19: Diagramme de Taylor sur les statistiques du nombre moyen de jours pluvieux observés et simulés à seuil 1 mm (1ère colonne), à seuil 2 mm (2e colonne) et à seuil 3 mm (3e colonne) observés et simulés pour la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.

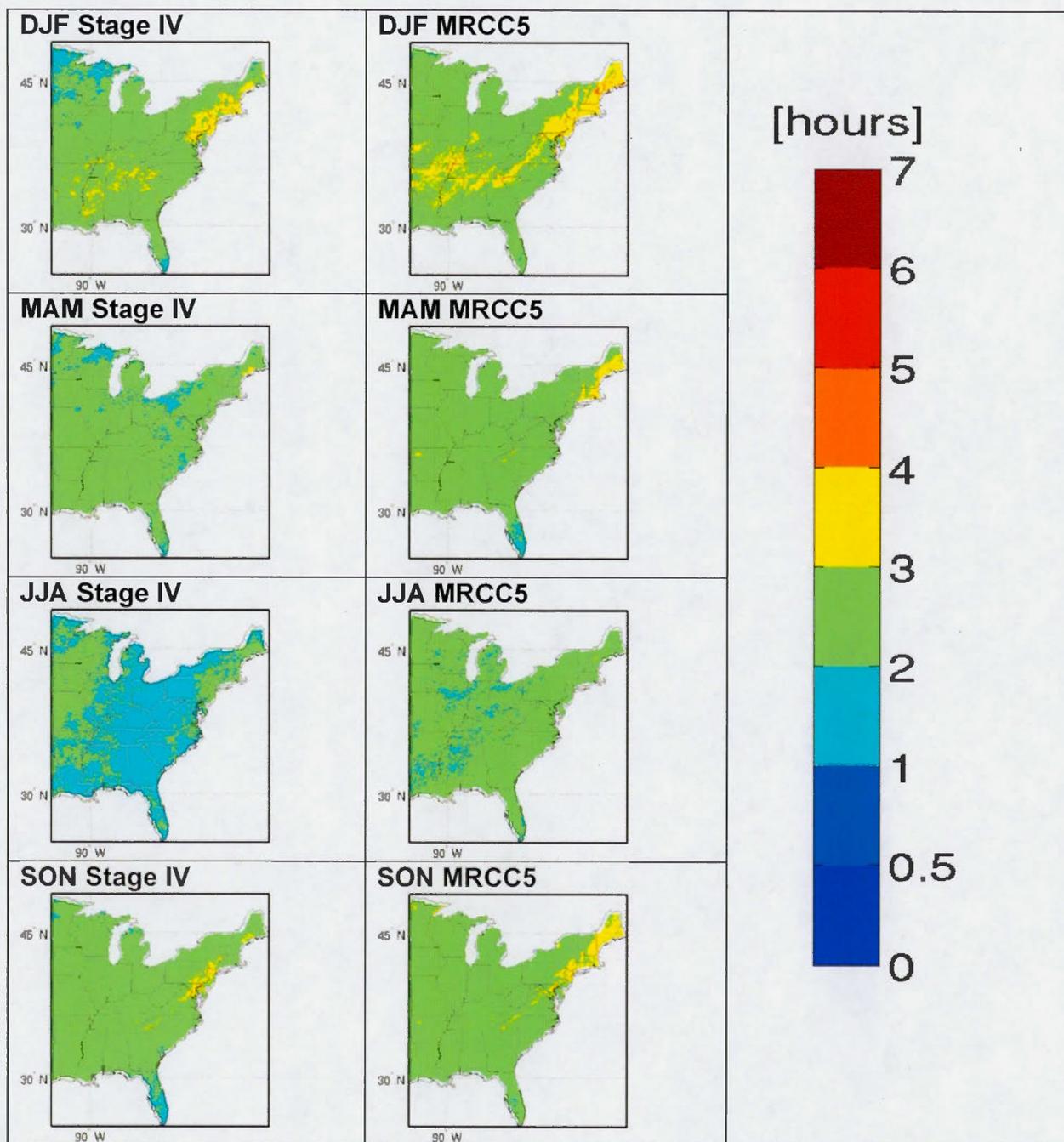


Figure 3.20: Comparaison de la durée moyenne des précipitations horaires à seul 1 mm (heures) estimées par Stage IV (1ère colonne) et simulées par MRCC5 (2ème colonne) durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.

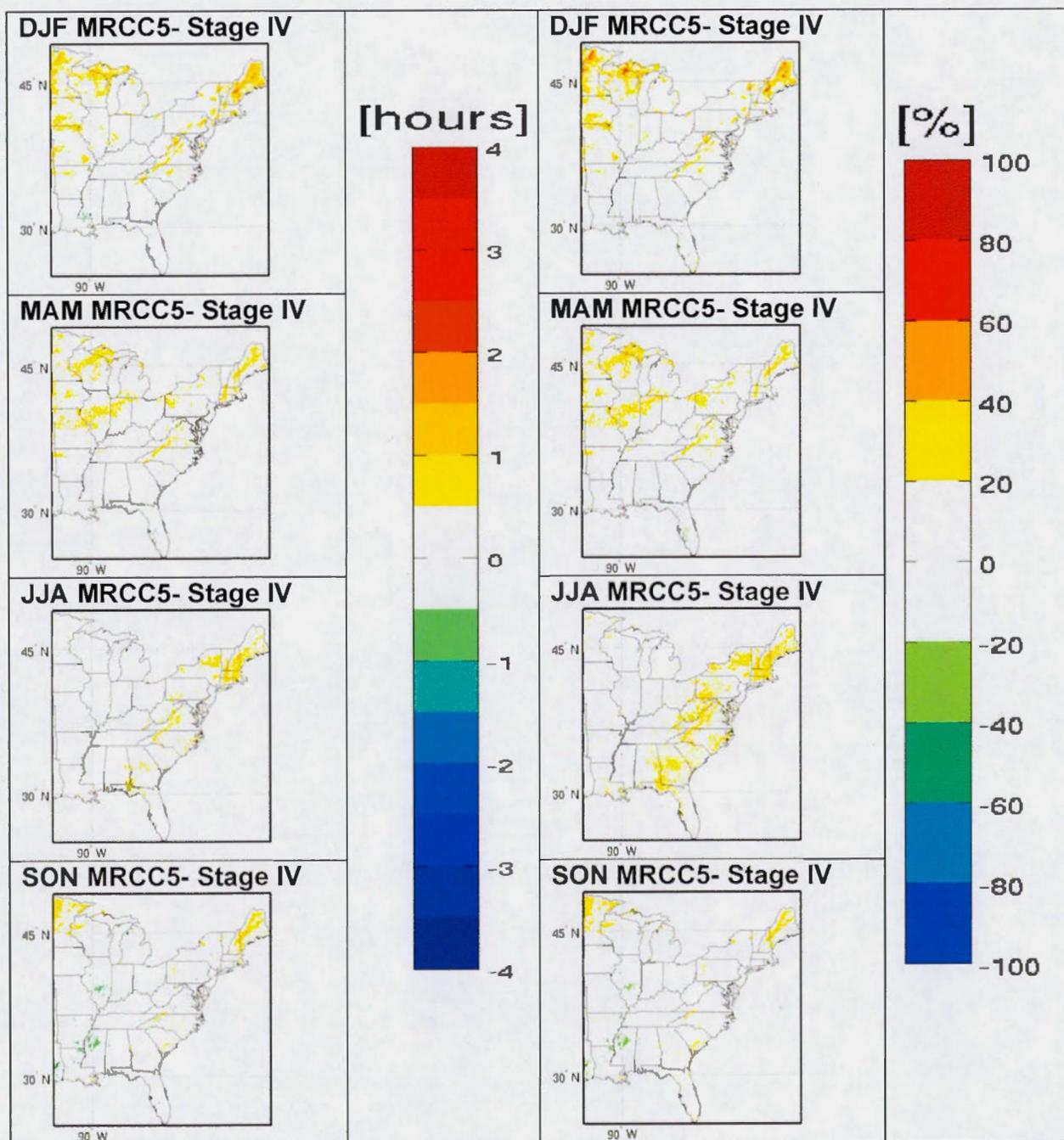


Figure 3.21: Différences absolues en heures (1ère colonne) et relatives en % (2ème colonne) entre MRCC5 et Stage IV sur les statistiques de la durée moyenne des précipitations horaires à seul 1 mm durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.

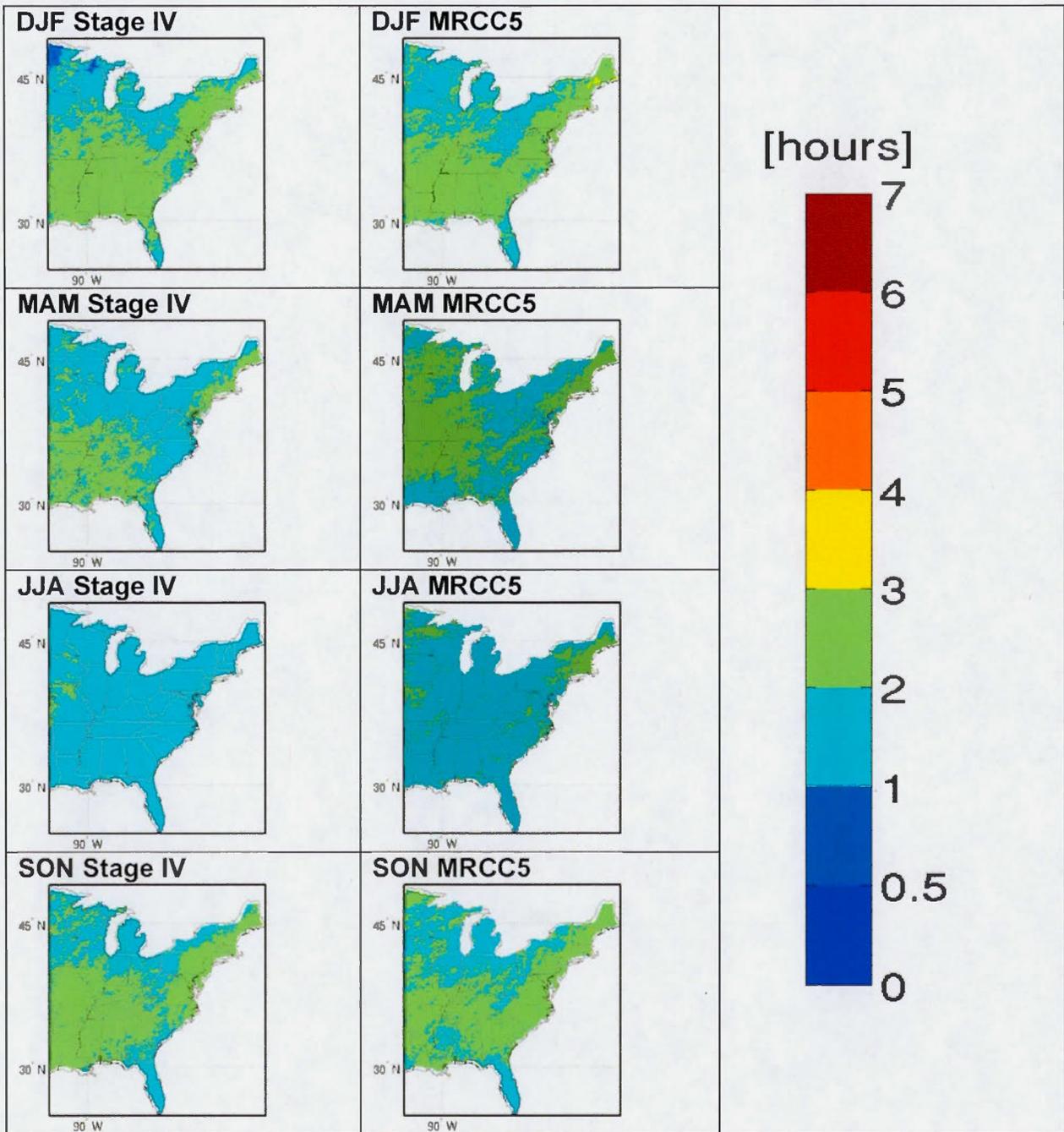


Figure 3.22: Même que la figure 3.20, mais pour un seuil de 2 mm

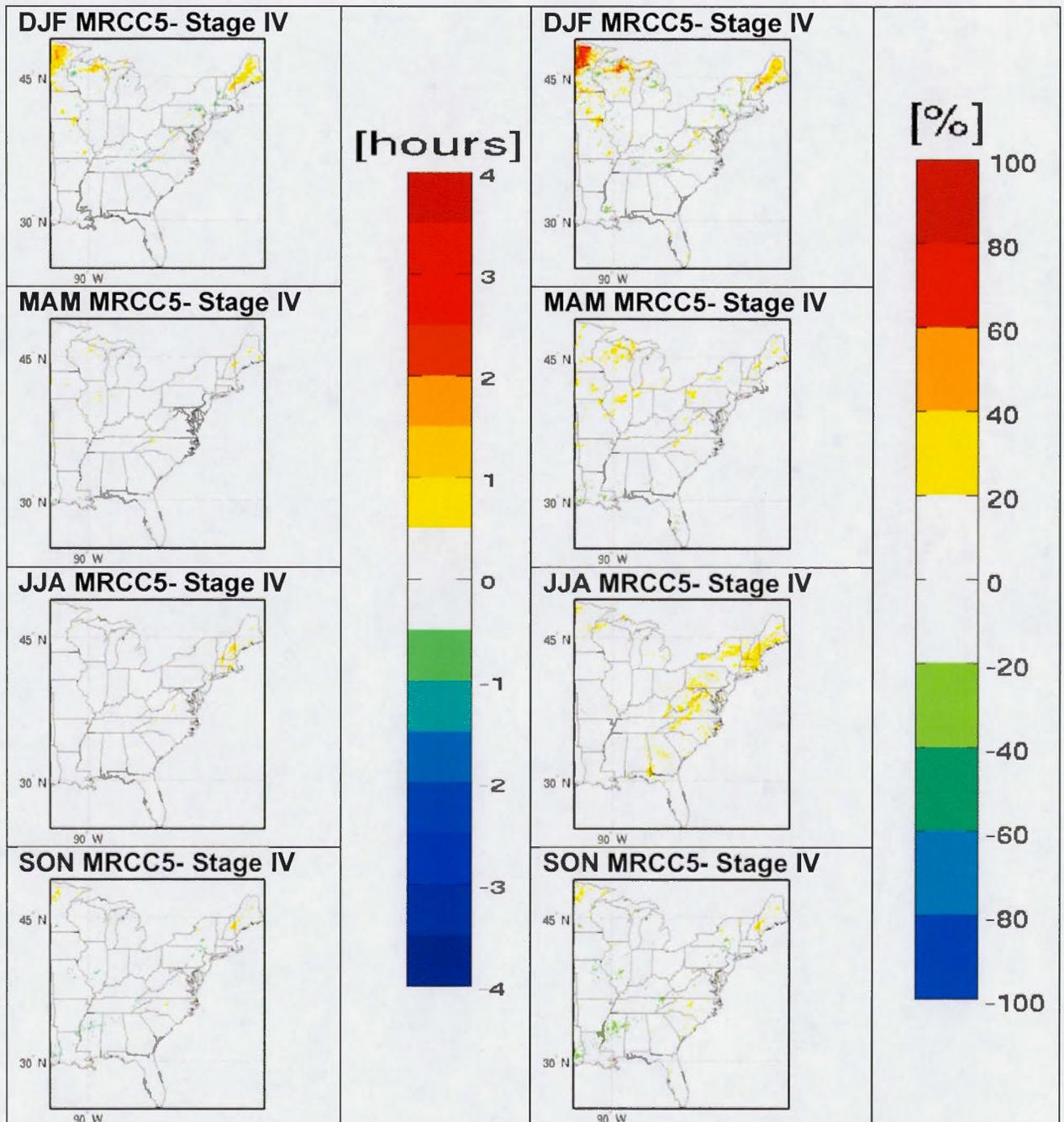


Figure 3.23: Même que la figure 3.21, mais pour un seuil de 2 mm

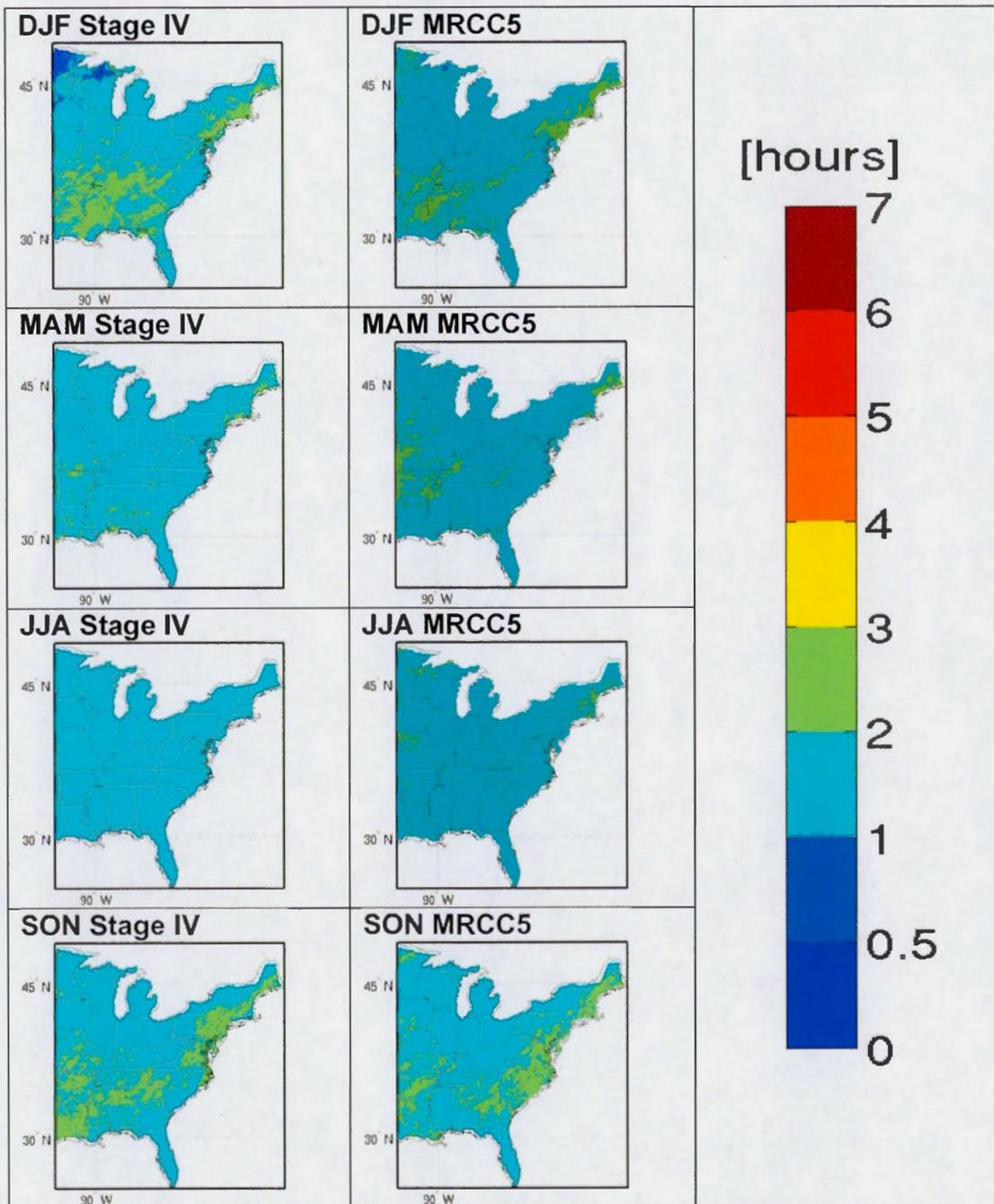


Figure 3.24: Même que la figure 3.20, mais pour un seuil de 3 mm

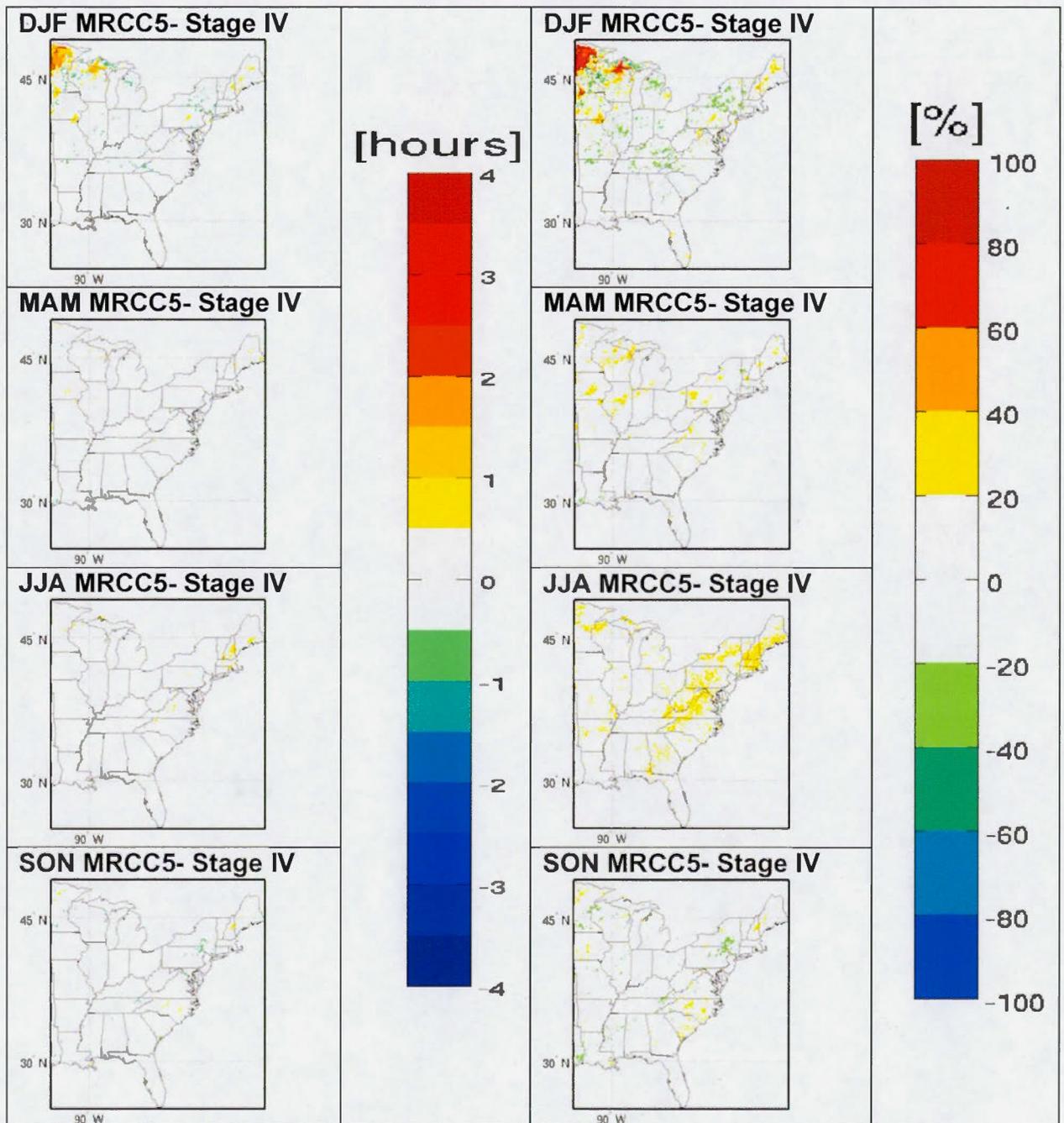


Figure 3.25: Môme que la figure 3.21, mais pour un seuil de 3 mm

## ANNEXES

Annexe I: Comparaison des valeurs du nombre moyen de jour humides calculés avec les données Stage IV avec celles des données CPC et TRMM

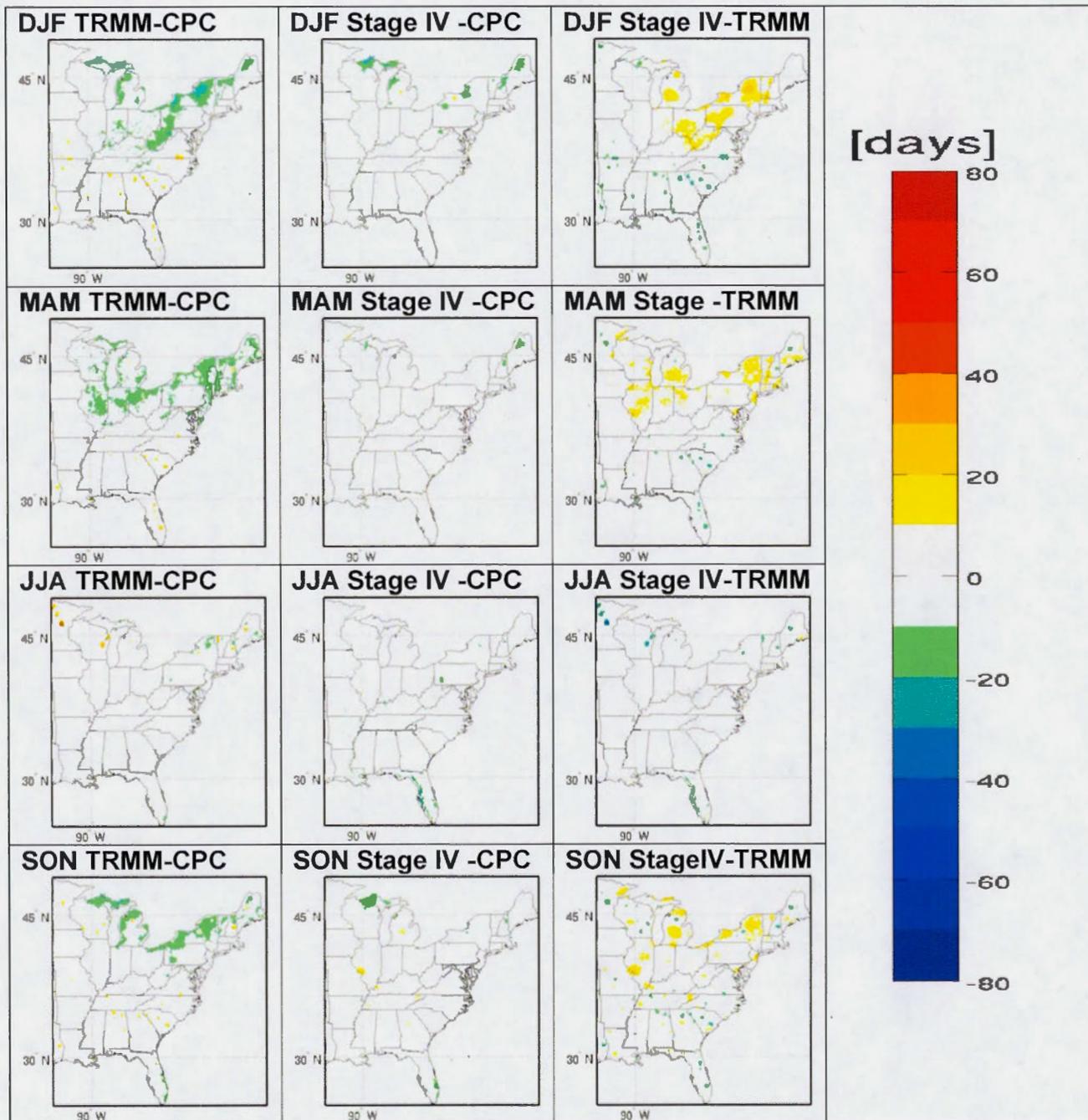


Figure A1.1: Différences absolues (en jours) entre TRMM et CPC (1ère colonne), CPC et Stage IV (2ème colonne), et TRMM et Stage IV (3ème colonne) sur les statistiques du nombre moyen de jours humides à seul 1 mm durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.

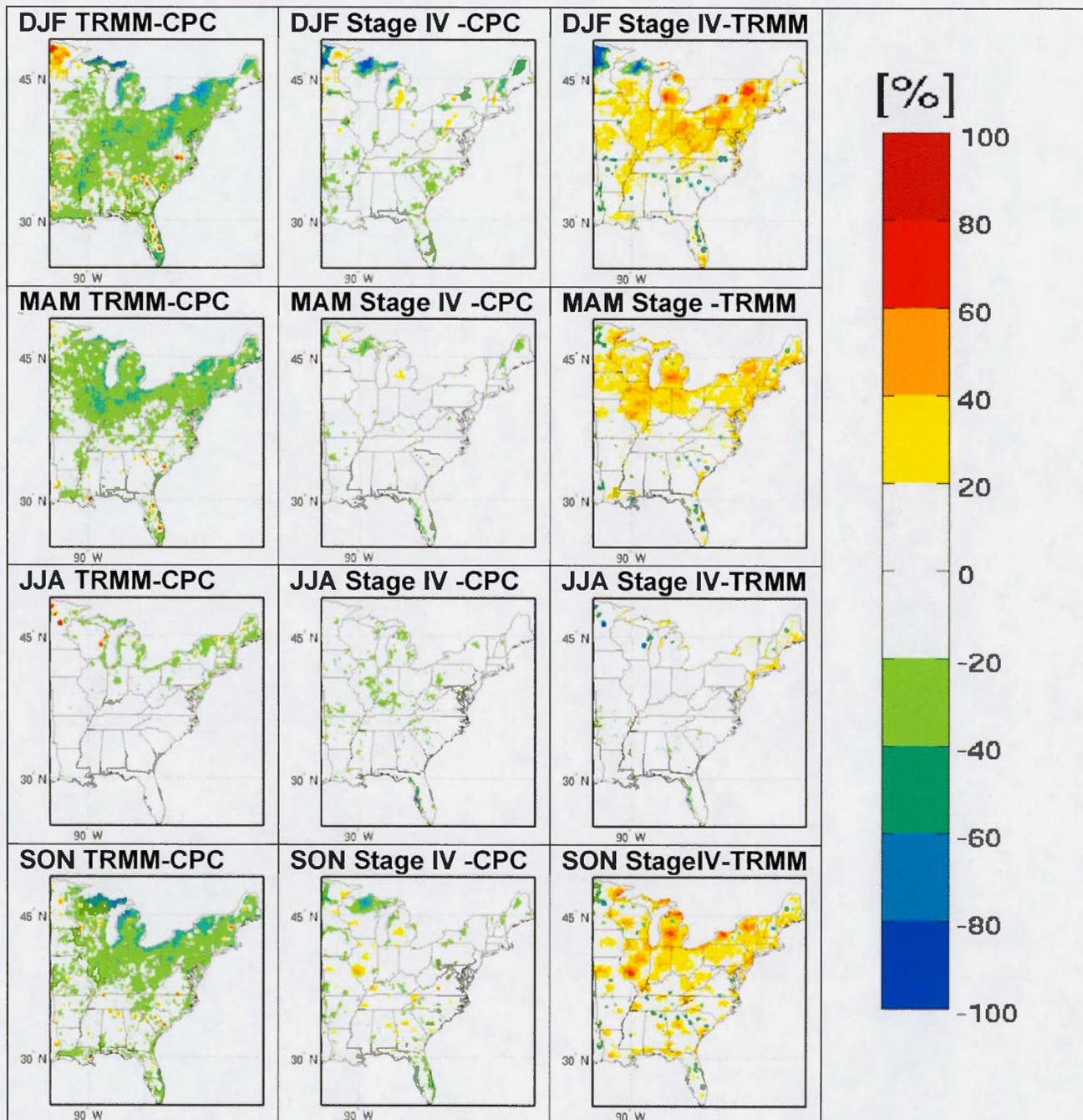


Figure A1.2 Différences relatives (en %) entre TRMM et CPC (1ère colonne), CPC et Stage IV (2ème colonne), et TRMM et Stage IV (3ème colonne) les statistiques du nombre moyen de jours humides à seul 1 mm durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.

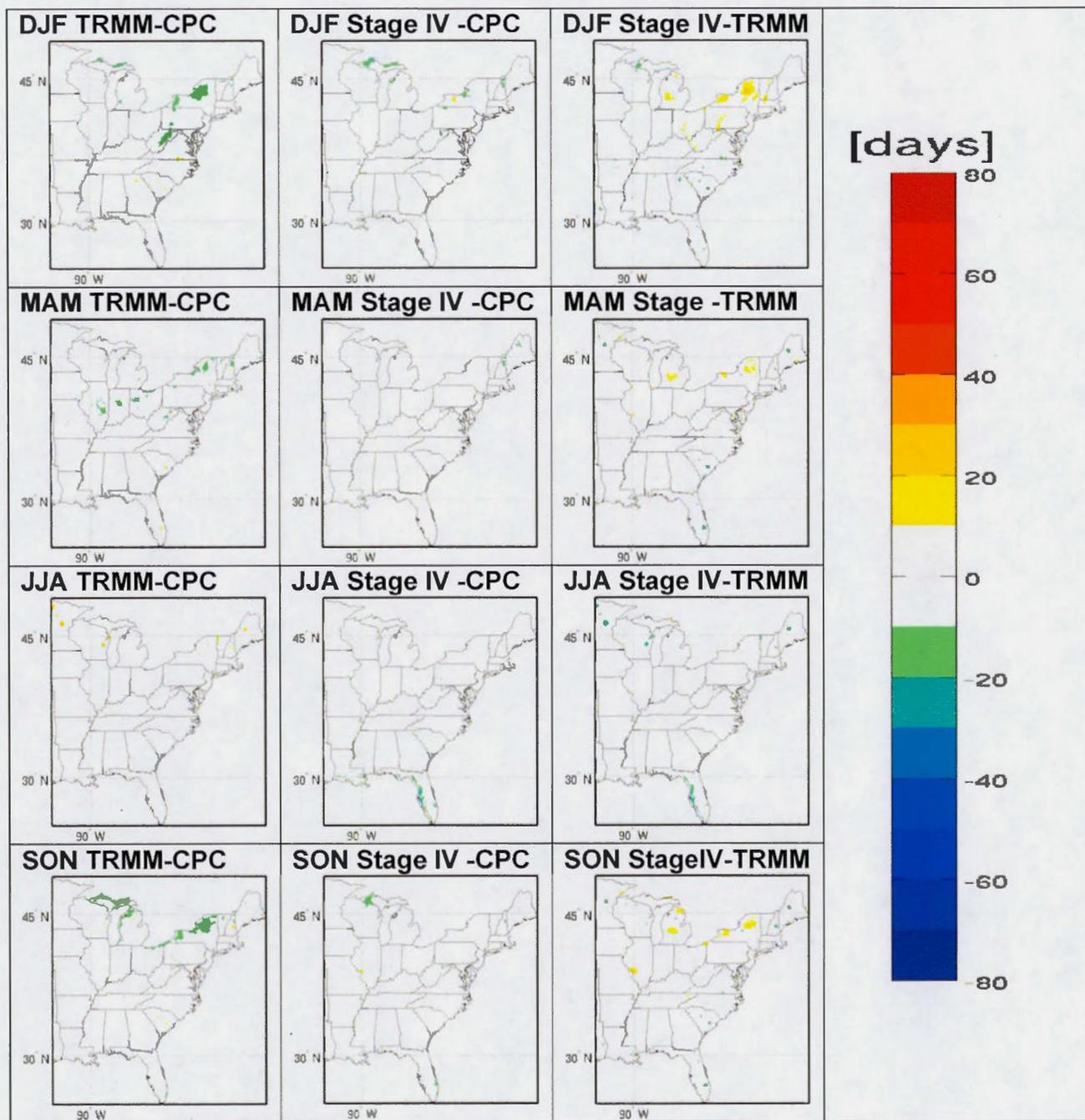


Figure A1.3: Même que la figure A1.2, mais pour un seuil de 2 mm

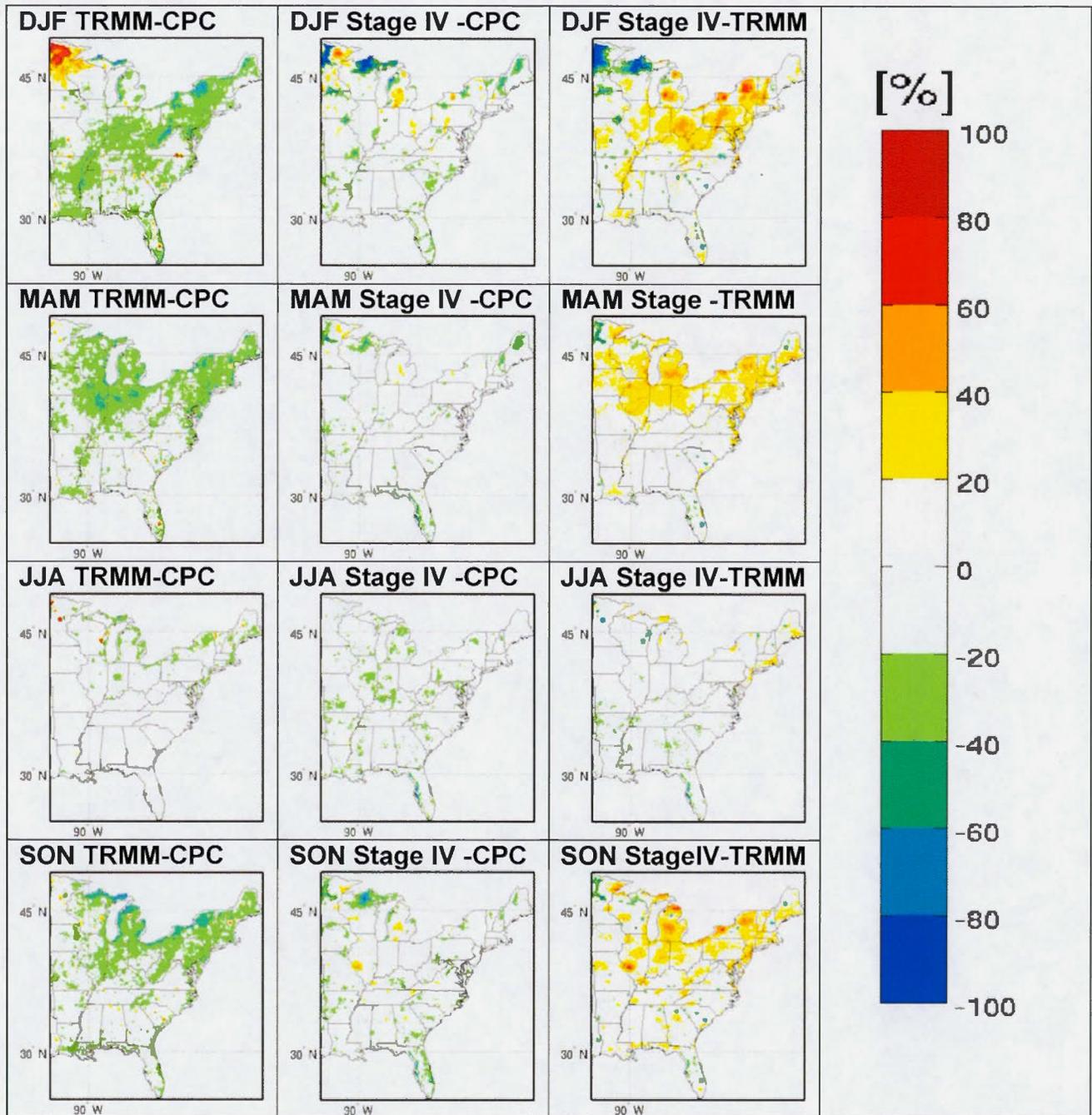


Figure A1.4: Même que la figure A1.2, mais pour un seuil de 2 mm

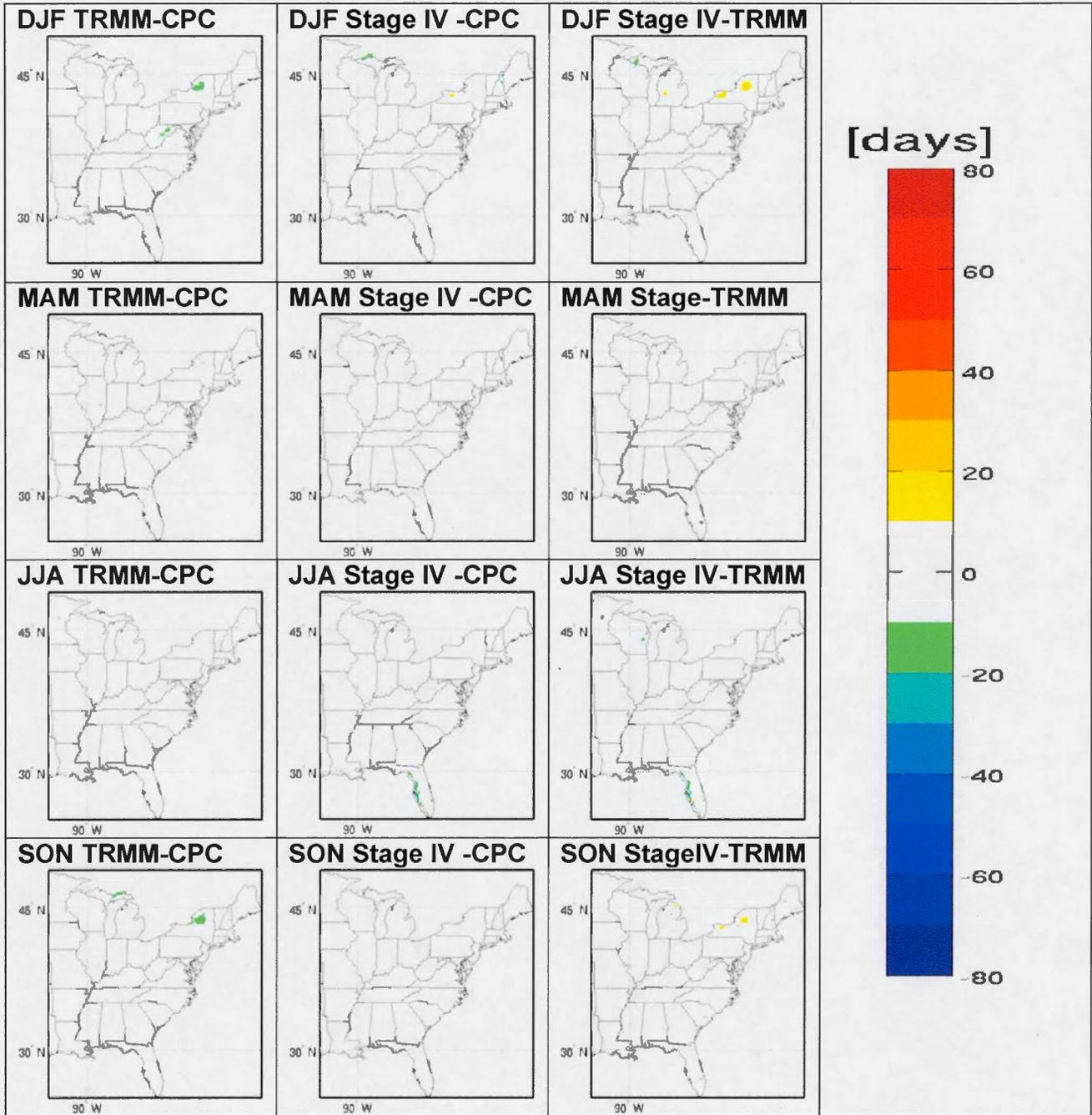


Figure A1.5: Même que la figure A1.1, mais pour un seuil de 3 mm

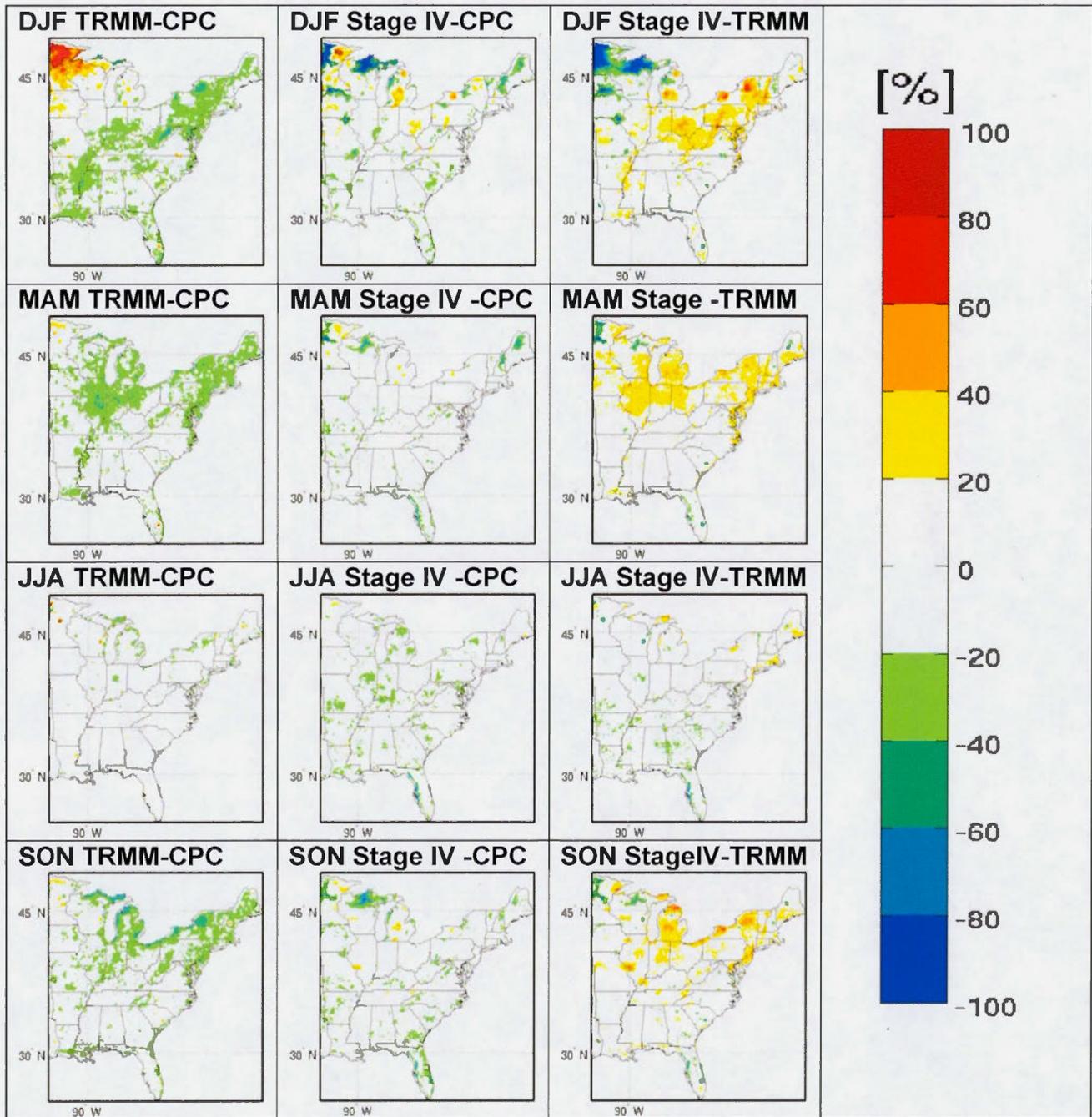


Figure A1.6: Même que la figure A1.2, mais pour un seuil de 3 mm

Annexe II: Diagramme de Taylor Diagramme de Taylor sur les statistiques du nombre  
moyen de jours humides observés

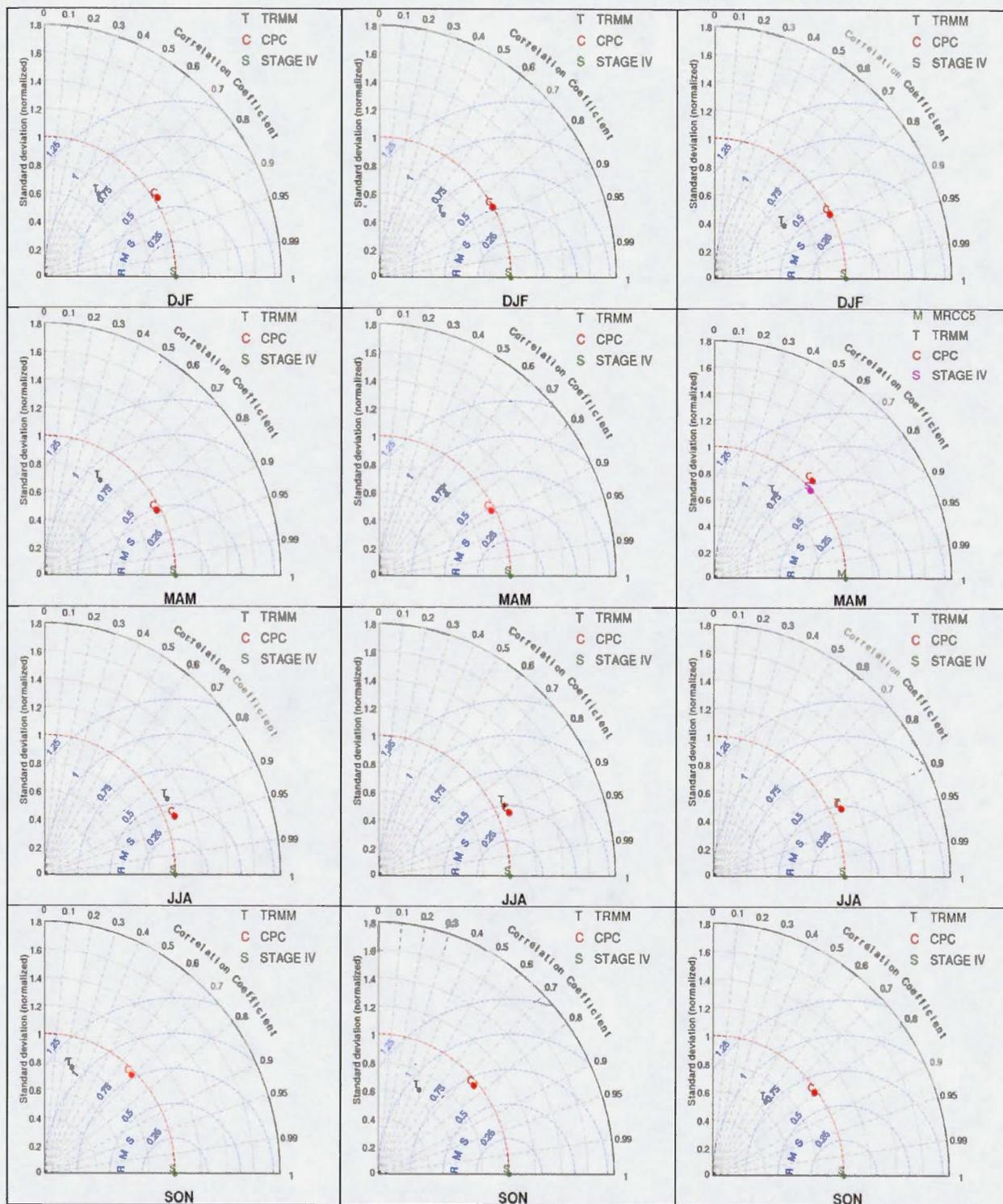


Figure AII.1: Diagramme de Taylor sur les statistiques du nombre moyen de jours pluvieux observés à seuil 1 mm (1<sup>ère</sup> colonne), à seuil 2 mm (2<sup>e</sup> colonne) et à seuil 3 mm (3<sup>e</sup> colonne) durant la période 2002-2012 pour les différentes saisons de l'année.

## RÉFÉRENCES

- Ballug R. C. Jr. Warm season nocturnal precipitation in the Great Plains of the United States. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 24, 1383-1387, 1985.
- Bélaïr S., J. Mailhot, C. Girard and P. Vaillancourt (2005) Boundary layer and shallow cumulus clouds in a medium-range forecast of a large-scale weather system. *Mon Weather Rev* 133:1938-1960.
- Benoit R., J. Côté, and J. Mailhot (1989) Inclusion of a TKE boundary layer parameterization in the Canadian regional finite-element model. *Mon Weather Rev* 117:1726-1750.
- Betts A. K. and M. J. Miller (1993) The Betts-Miller scheme, in *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*, Meteorol. Monogr. 46:107-121.
- Blackadar AK. (1957) Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions. *Bull Amer Meteor Soc* 38:283-290.
- Bleeker W. and M. J. Andre, On the diurnal variation of precipitation, particularly over central U.S.A., and its relation to large-scale orographic circulation systems, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 77:260-271, 1951.
- Bouagila B. and L. Sushama, 2013. "On the Current and Future Dry Spell Characteristics over Africa." *Atmosphere* 4, no. 3:272-298.
- Brochu, R. and R., Laprise (2007) Surface water and energy budgets over the Mississippi and Columbia river basins as simulated by two generations of the Canadian Regional Climate Model. *Atmosphere-Ocean* 45(1):19-35.
- Bukovsky, MS. (2011) Masks for the Bukovsky regionalization of North America. Regional Integrated Sciences Collective, Institute for Mathematics Applied to Geosciences, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO.
- Bukovsky, MS. and DJ., Karoly (2011) A regional modeling study of climate change impacts on warm season precipitation in the central US. *J. Climate*, 24:1985-2002
- Carbone, R. E. and J. D. Tuttle, 2008: Rainfall Occurrence in the U.S. Warm Season: The Diurnal Cycle\*. *J. Climate*, 21:4132-4146. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2008JCLI2275.1>
- Carbone, R. E., J. D. Tuttle, D. A. Ahijevych, and S. B. Trier, 2002: Inferences of predictability associated with warm season precipitation episodes. *J. Atmos. Sci.*, 59:2033-2056.
- Charba, J. P., A. W. Harrell III and A. C. Lackner III, 1992: A monthly precipitation amount climatology derived from published atlas maps: Development of a digital database. NOAA, U.S. Department of Commerce, TDL Office Note 92-7, 20 pp.
- Christensen, J. H. and Coauthors, 2007a: Regional climate projections. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, S. Solomon et al., Eds. Cambridge University Press, 847-940.
- Côté, J., S. Gravel, A. Méthot, A. Patoine, M. Roch and A. Staniforth (1998) The operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) model. Part I: design considerations and formulation. *Mon. Weather Rev.*, 126:1373-1395.

- Covey, C., KM AchutaRao, SJ Lambert, and KE Taylor (2000) Intercomparison of Present and Future Climates Simulated by Coupled Ocean–Atmosphere GCMs, Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison Report #66, Lawrence Livermore National Laboratory UCRL-ID-140325
- Cressman, G. P., 1959: An operational objective analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 87:367–374
- Dai, A. and K. E. Trenberth (2004) The diurnal cycle and its depiction in the community climate system model. *J. Climate* 117:930 – 951.
- Dai, A., F. Giorgi and K. E. Trenberth (1999) Observed and model-simulated diurnal cycles of precipitation over the contiguous United States. *J. Geophys. Res.*, 104:6377– 6402.
- Dai, A., F. Giorgi, and K. E. Trenberth, Observed and model simulated precipitation diurnal cycle over the contiguous United States. *J. Geophys. Res.*, in press, 1998a
- Dai, A., K. E. Trenberth, and T. R. Karl, Effects of clouds, soil moisture, precipitation and water vapor on diurnal temperature range, *J. Clim.*, in press, 1998.
- Davis, C. A., K. W. Manning, R. E. Carbone, S. B. Trier, and J. D. Tuttle (2003), Coherence of warm-season continental rainfall in numerical weather prediction models, *Mon. Weather Rev.*, 131:2667–2679.
- De Elia, R., D. Caya, H. Côté, A. Frigon, S. Biner, M. Giguère, D. Paquin, R. Harvey and D. Plummer, 2008: Evaluation of uncertainties in the CRCM-simulated North American climate. *Clim. Dyn.*, 30:13-132.
- Delage Y. (1997) Parameterising sub-grid scale vertical transport in atmospheric models under statically stable conditions. *Boundary-Layer Meteor.*, 82:23-48.
- Delage Y. and C. Girard (1992) Stability functions correct at the free convection limit and consistent for both the surface and Ekman layers. *Boundary-Layer Meteor.*, 58:19-31.
- Diaconescu, E.P., and R. Laprise, 2013: Can added value be expected in RCM-simulated large scales? *Clim. Dyn.*, 41(7):1769-1800, DOI:10.1007/s00382-012-1649-9, <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00382-012-1649-9>
- Duffy, P. B., B. Govindasamy, J. P. Iorio, J. Milovich, K. R. Sperber, K. E. Taylor, M. F. Wehner, and S. L. Thompson, 2003: High- resolution simulations of global climate. Part 1: Present climate. *Clim. Dyn.*, 21:371–390
- Easterling, D. R., and P. J. Robinson, The diurnal variations of thunderstorm activity in the United States. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 24:048-1058, 1985.
- Englehart, P. J., and A. V. Douglas, A statistical analysis of precipitation frequency in the conterminous United States, including comparisons with precipitation totals. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 24:350-362, 1985.
- Fulton, R. and Kondragunta, C., 2002: Multisensor Precipitation Estimator - The Future of WFO Rainfall Estimation Has Arrived (poster, NWS Hydrologic Program Managers Conference).
- Fulton, R. A., P. J. Breidenbach, D-J Seo, D. A. Miller, Timothy O'Bannon, 1998: The WSR-88D Rainfall Algorithm. *Wea. Forecasting*, 13:377–395.  
doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<0377:TWRA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<0377:TWRA>2.0.CO;2)

- Fritsch, J. M., R. J. Kane, and C. R. Chellius, 1986: The contribution of mesoscale convective weather systems to the warm-season precipitation in the United States. *J. Climate Appl. Meteor.*, 25: 1333–1345.
- Glahn, H. R., T. L. Chambers, W. S. Richardson, and H. P. Perrotti, 1985: Objective map analysis for the local AFOS MOS Program. NOAA Tech. Memo. NWS TDL 75, 34 pp.
- Gutowski, WJ Jr, RW Arritt, S. Kawazoe, DM Flory, ES Takle, S. Biner, D. Caya, RJ Jones, R. Laprise, LR Leung, LO Mearns, W. Moufouma-Okia, AMB Nunes, Y. Qian, JO Roads, LC Sloan, MA Snyder (2010) Regional extreme monthly precipitation simulated by NARCCAP RCMs. *J. Hydrometeor.*, 11:1373-1379. doi: 10.1175/2010JHM1297.1
- Grell, G. A., Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations, *Mon Weather Rev* 121:764-787, 1993.
- Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer (1994), A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR/TN-398+STR, 122 pp., Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo.
- Heideman, K. F. and J. M. Fritsch, 1988: Forcing Mechanisms and Other Characteristics of Significant Summertime Precipitation. *Wea. Forecasting* 3:115–130.  
doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434\(1988\)003<0115:FMAOCO>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434(1988)003<0115:FMAOCO>2.0.CO;2)
- Hering, W. S., and T. R. Borden Jr., Diurnal variations in the summer wind field over the central United States. *J. Atmos. Sci.*, 19:81-86, 1962.
- Hernández-Díaz, L., R. Laprise, L. Sushama, A. Martynov, K. Winger, B. Dugas, 2013: Climate simulation over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Clim. Dyn.*, 40(5-6):1415-1433. DOI:10.1007/s00382-012-1387-z, <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00382-012-1387-z>
- Higgins, R. W., V. B. S. Silva, W. Shi, and J. Larson, 2007: Relationships between Climate Variability and Fluctuations in Daily Precipitation over the United States. *J. Climate*, 20:3561–3579. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI4196.1>
- Higgins, R. W., W. Shi, E. Yarosh, and R. Joyce, 2000b: Improved United States Precipitation Quality Control System and Analysis. NCEP/Climate Prediction Center Atlas 7, 40 pp
- Higgins, R. W., J. E. Janowiak, and Y. P. Yao, A gridded hourly precipitation database for the United States (1963-1993), NCEP/Climate Prediction Center Atlas No. 1, U.S. Dept. of Commerce, Washington, D.C., 47pp., 1996.
- Holton JR (1967) The diurnal boundary layer wind oscillation above sloping terrain. *Tellus* 19:199-205.
- Hong, S. Y., and A. Leetmaa, 1999: An evaluation of the NCEP RCM for regional climate modeling. *J. Climate* 12:592–609
- Huffman, GJ, RF Adler, DT Bolvin, G. Gu, EJ Nelkin, KP Bowman, Y. Hong, EF Stocker, and DB Wolff (2007) The TRMM multi-satellite precipitation analysis: quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scale. *J. Hydrometeor.*, 8:38–55
- Huffman, GJ, RF Adler, M. Morrissey, DT Bolvin, S. Curtis, R. Joyce, B. McGavock, and J. Susskind (2001) Global precipitation at one-degree daily resolution from multi-satellite observations. *J. Hydrometeor.*, 2:36-50.

- lorio, JP, PB Duffy, B. Govindasamy, SL Thompson, M. Khairoutdinov and D. Randall (2004) Effects of model resolution and subgrid-scale physics on the simulation of precipitation in the continental United States. *Clim. Dyn.*, 23:243–258
- Janić, Z. I. (1994), The step-mountain Eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Weather Rev.*, 122:927–945.
- Jiao, Y. and D. Caya (2006) An investigation of the summer precipitation simulated by the Canadian Regional Climate Model. *Mon. Weather Rev.*, 134:919–932.
- Kain, J. S. and J. M. Fritsch (1993) Convective parameterization in mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, in *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*, Meteorol. Monogr., 46:165-170.
- Kain, J. S. and J. M. Fritsch (1990) A one-dimensional entraining/detraining plume model and application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 47:2784-2802.
- Kendon, E. J., N. M. Roberts, C. A. Senior and M. J. Roberts, 2012: Realism of Rainfall in a Very High-Resolution Regional Climate Model. *J. Climate*, 25:5791–5806. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00562.1>
- Kourzeneva, E. (2010) External data for lake parameterization in numerical weather prediction and climate modeling. *Boreal Env. Res.*, 15:165–177.
- Kuo, H. L. (1974), Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. *J. Atmos. Sci.*, 31:1232 –1240.
- Kuo, HL (1965) On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. *J. Atmos. Sci.*, 22:40–63.
- Knievel, J. C., D. A. Ahijevych, and K. W. Manning (2004) Using temporal modes of rainfall to evaluate the performance of a numerical weather prediction model. *Mon. Weather Rev.*, 132:2995 – 3009.
- Kursinski, A. L., and S. L. Mullen, 2008: Spatiotemporal Variability of Hourly Precipitation over the Eastern Contiguous United States from Stage IV Multisensor Analyses. *J. Hydrometeor.*, 9:3–21. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2007JHM856.1>
- Kim K.-M, W. K.-M. Lau, Y. C. Sud, and G. K. Walker (2010) : Influence of aerosol-radiative forcings on the diurnal and seasonal cycles of rainfall over West Africa and Eastern Atlantic Ocean using GCM simulations. *Clim. Dyn.*, 35 :115-126, doi : 10.1007/s00382-010-0750-1
- Landin, M. G., and L. F. Bosart, The diurnal variation of precipitation in California and Nevada. *Mon. Weather Rev.*, 117:1801-1816, 1989.
- Laprise R (1992) The Euler equation of motion with hydrostatic pressure as independent coordinate. *Mon. Weather Rev.*, 120:197-207.
- Laprise, R., L. Hernández-Díaz, K. Tete, L. Sushama, L. Šeparović, A. Martynov, K. Winger and M. Valin, 2013: Climate projections over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Clim. Dyn.*, 41(11):3219-3246, DOI:10.1007/s00382-012-1651-2, <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00382-012-1651-2>
- Leung, L. R., Y. Qian, and X. Bian, 2003: Hydroclimate of the western United States based on observations and regional climate simulation of 1981–2000. Part I: Seasonal statistics. *J. Climate*, 16:1892–1911.

- Li, J. and HW Barker (2005) A radiation algorithm with correlated-k distribution. Part I: local thermal equilibrium. *J. Atmos. Sci.*, 62:286-309.
- Liang, X. Z., J. Pan, J. Zhu, K. E. Kunkel, J. X. L. Wang, and A. Dai, 2006: Regional climate model downscaling of the U.S. summer climate and future change. *J. Geophys. Res.*, 111, D10108, doi:10.1029/2005JD006685.
- Liang, X. Z., L. Li, K. E. Kunkel, M. Ting, and J. X. L. Wang, 2004b: Regional climate model simulation of U.S. precipitation during 1982–2002. Part I: Annual cycle. *J. Climate*, 17:3510–3529.
- Lin, Y., and K. E. Mitchell, 2005: The NCEP stage II/IV hourly precipitation analyses: Development and applications. Pre-prints, 19th Conf. On Hydrology, San Diego, CA, Amer. Meteor. Soc., 1.2.
- Lu, G. Y. and D. W. Wong (2008): An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Computers & Geosciences*, volume 34, Issue 9, pages 1044-1055.
- Maddox, R. A., J. Zhang, J. J. Gourley, and K. W. Howard, 2002: Weather radar coverage over the contiguous United States. *Wea. Forecasting*, 17:927–934.
- Maddox, R. A., 1983: Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, mesoscale convective complexes. *Mon. Wea. Rev.*, 111:1475–1493.
- Martynov, A., R. Laprise, L. Sushama, K. Winger, L. Šeparović and B. Dugas, 2013: Reanalysis-driven climate simulation over CORDEX North America domain using the Canadian Regional Climate Model, version 5: Model performance evaluation. *Clim. Dyn.*, <http://link.springer.com/article/10.1007/s00382-013-1778-9>
- Martynov, A., L. Sushama, R. Laprise, K. Winger and B. Dugas (2012) Interactive lakes in the Canadian Regional Climate Model, version 5: the role of lakes in the regional climate of North America. *Tellus A* 64:16226. doi: 10.3402/tellusa.v64i0.16226
- Masson, V., J-L Champeaux, F. Chauvin, Ch. Meriguet and R. Lacaze (2003) A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. *J. Climate*, 16:1261-1282. doi: 10.1175/1520-0442-16.9.1261
- McFarlane NA (1987) The effect of orographically excited gravity-wave drag on the circulation of the lower stratosphere and troposphere. *J. Atmos. Sci.*, 44:1175-1800.
- Mearns LO (2010) The North American Regional Climate Change Assessment Program: An Overview. Kansas NSF EPSCor Conference, University of Kansas, Lawrence, Kansas October 4, 2010. [http://www.nsfepscor.ku.edu/pdf/20101004\\_Mearns.pdf](http://www.nsfepscor.ku.edu/pdf/20101004_Mearns.pdf) Accessed 19 July 2012.
- Mearns LO, WJ Gutowski, R. Jones, L-Y Leung, S. McGinnis, AMB Nunes and Y. Qian (2009) A regional climate change assessment program for North America. *EOS*, 90:11-312.
- Wehner, M. F., R. L. Smith, G. Bala and P. Duffy (2010) The effect of horizontal resolution on simulation of very extreme US precipitation events in a global atmosphere model. *Clim. Dyn.*, 34:241–247. DOI 10.1007/s00382-009-0656-y
- Mironov, D., E. Heise, E. Kourzeneva, B. Ritter, N. Schneider and A. Terzhevik (2010) Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Env. Res.*, 15:218-230.
- Mitchell, TD and PD Jones (2005) An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *J. Clim.*, 25:693-712. doi: 10.1002/joc.1181

- Monette, A., L. Sushama, M. N. Khaliq, R. Laprise and R. Roy, 2012: Projected changes to precipitation extremes for Northeast Canadian watersheds using a multi-RCM ensemble. *J. Geophys. Res., – Atmosphere* 117(D13106):15 pp, doi:10.1029/2012JD017543, <http://rd.springer.com/article/10.1007/s00382-012-1415-z#>.
- Nicolini, M., K. M. Waldron, and J. Paegle, Diurnal oscillations of the low-level jets, vertical motion, and precipitation: a model case study. *Mon. Weather Rev.*, 121:2588-2610, 1993.
- Pitchford, K. L., and J. London, the low level jet as related to nocturnal thunderstorms over Midwest United States. *J. Appl. Meteorol.*, 1:43-47, 1962.
- Reiter, E. R., and M. Tang, 1984: Plateau Effects on Diurnal Circulation Patterns. *Mon. Wea. Rev.*, 112:638–651.  
doi: [http://dx.doi.org/10.1175/15200493\(1984\)112<0638:PEODCP>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/15200493(1984)112<0638:PEODCP>2.0.CO;2)
- Riley, G. T., M. G. Landin, and L. F. Bosart (1987), The diurnal variability of precipitation across the central Rockies and adjacent Great Plains. *Mon. Weather Rev.*, 115:1161–1172.
- Šeparović, L., A. Alexandru, R. Laprise, A. Martynov, L. Sushama, K. Winger, K. Tete and M. Valin, 2013: Present climate and climate change over North America as simulated by the fifth-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Clim. Dyn.*, <http://link.springer.com/article/10.1007/s00382-013-1737-5>
- Schwartz, B. E., and L. F. Bosart, The diurnal variability of Florida rainfall, *Mon. Weather Rev.*, 107:1535-1545, 1979.
- Stefanova, L., V. Misra, S. Chan, Griffin, J. J. O'Brien and Th. J. Smith III (2011) A proxy for high-resolution regional reanalysis for the Southeast United States: assessment of precipitation variability in dynamically downscaled reanalyses. *Clim. Dyn.*, 38:2449-2466. doi: 10.1007/s00382-011-1230-y
- Stensrud DJ (1996) Importance of low-level jets to climate: a review. *J. Climate*, 9:1698-1711. doi: 10.1175/1520-0442(1996)009<1698:IOLLJT>2.0.CO;2
- Sturm, M., J. Holmgren, M. König and K. Morris (1997) The thermal conductivity of seasonal snow. *J. Glaciol.*, 43:26-41.
- Sun, Y., S. Solomon, A. Dai, and R. W. Portmann, 2006: How often does it rain? *J. Climate*, 19:916–934
- Sundqvist, H., E. Berge, and JE Kristjánsson (1989) Condensation and cloud parameterization studies with a mesoscale numerical weather prediction model. *Mon. Weather Rev.*, 117:1641-1657.
- Sushama, L., R. Laprise, D. Caya, A. Frigon, and M. Slivitzky. 2006. Canadian RCM projected climate change signal and its sensitivity to model errors. *J. Climatol.*, 26 (15) : 2141-2159.
- Take ES et al. (1999) Project to intercompare regional climate simulations (PIRCS): Description and initial results. *J. Geophys. Res.*, 104:19433-19461.
- Taylor K. E.: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 106:7183-7192, 2001 (also see PCMDI Report 55, <http://www.pcmdi.llnl.gov/publications/ab55.html>)
- Tucker D. F., Diurnal precipitation variations in south-central New Mexico, *Mon. Weather Rev.*, 121:1979-1991, 1993.

- Verseghy DL (2009) CLASS - The Canadian Land Surface Scheme (Version 3.4) – technical documentation (version 1.1). Internal report, Climate Research Division, Science and Technology Branch, Environment Canada, 183 pp.
- Verseghy DL (1991) CLASS – a Canadian land surface scheme for GCMs: I. Soil model. *J. Climatol.* 11:111-133.
- Wallace, J. M., 1975, Diurnal variations in precipitation and thunderstorm frequency over the conterminous United States. *Mon. Wea. Rev.*, 103:406-419, 1975.
- Westrick, K. J., C. F. Mass, and B. A. Colle, 1999: The limitations of the WSR-88D radar network for quantitative precipitation measurement over the coastal western United States. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80:2289–2298.
- Willmott, CJ and K. Matsuura (1995) Smart interpolation of annually averaged air temperature in the United States. *J. Appl. Meteorol.*, 34:2577-2586.
- Xie, S., M. Zhang, J. S. Boyle, R. T. Cederwall, G. L. Potter, and W. Lin (2004), Impact of a revised convective triggering mechanism on community atmosphere model, version 2, simulations: Results from short-range weather forecasts, *J. Geophys. Res.*, 109:D14102, doi:10.1029/2004JD004692.
- Yamada, T., M. Lee, M. Kanamitsu, and H. Kanamaru, 2012: Diurnal Characteristics of Rainfall over the Contiguous United States and Northern Mexico in the Dynamically Downscaled Reanalysis Dataset (US10). *J. Hydrometeor.* doi:10.1175/JHM-D-11-0121.1, in press.
- Yeh, K-S, J. Côté, S. Gravel, A. Méthot, A. Patoine, M. Roch and A. Staniforth (2002) The CMC-MRB global environmental multiscale (GEM) model. Part III: Nonhydrostatic formulation. *Mon. Weather Rev.*, 130:339–356
- Zadra, A., R. McTaggart-Cowan and M. Roch (2012) Recent changes to the orographic blocking. Seminar presentation, RPN, Dorval, Canada, 30 March 2012.
- Zadra, A., D. Caya, J. Côté, B. Dugas, C. Jones, R. Laprise, K. Winger and L-P Caron (2008) The next Canadian regional climate model. *Phys. Canada*, 64:74-83.
- Zadra, A., M. Roch, S. Laroche and M. Charron (2003) The subgrid scale orographic blocking parametrization of the GEM model. *Atmosphere-Ocean*, 41(2):155–170
- Zhang G. J. (2003), Roles of tropospheric and boundary layer forcing in the diurnal cycle of convection in the U.S. Southern Great Plains. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 2281, doi:10.1029/2003GL018554.
- Zhang, G. J. and N. A. McFarlane, Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian Climate Centre general circulation model. *Atmosphere-Ocean*, 33:407-446, 1995.