

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

CARACTÉRISATION DES PÉRIODES DE SÉCHERESSE SUR LE DOMAINE  
DE L'AFRIQUE SIMULÉE PAR LE MODÈLE RÉGIONAL CANADIEN DU  
CLIMAT (MRCC5)

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

PAR BESSAM BOUAGILA

MAI 2013

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

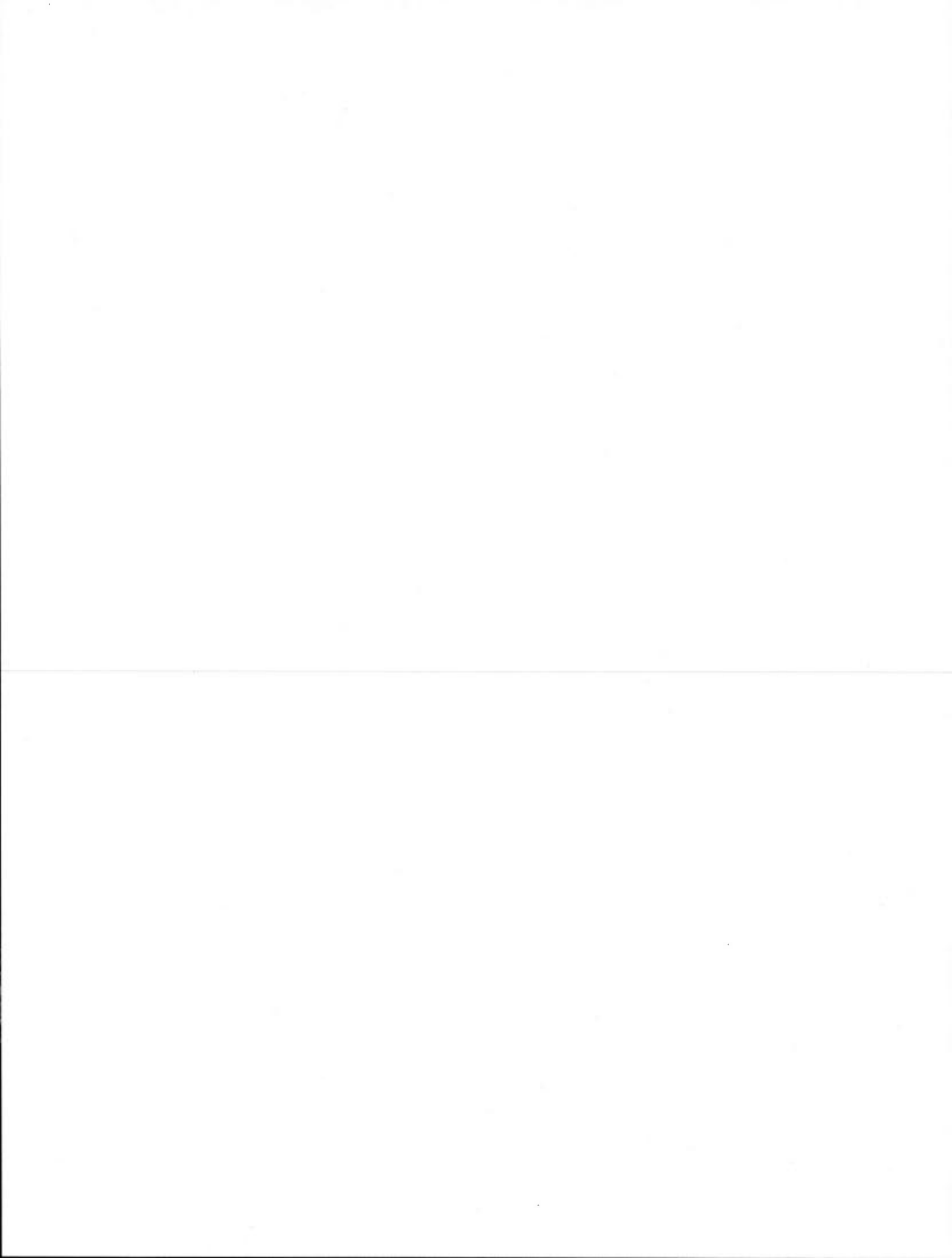
La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études 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 tiens à remercier ma directrice de recherche, Laxmi Sushama, pour m'avoir permis de travailler sur ce projet et pour ses bons conseils. J'aimerais aussi remercier tous mes collègues qui ont su m'aider que ce soit au niveau de la recherche, mais aussi pour le support moral.

Je souhaiterais également remercier le groupe des Sciences de l'Atmosphère d'avoir mis à ma disposition les outils nécessaires pour pouvoir effectuer ce projet. Un gros merci à ma famille et à mes amis pour leur support infini.

Finalement un merci particulier à Jacinthe pour m'avoir soutenu et encouragé durant ce long processus.



## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	III
LISTE DES FIGURES .....	VII
LISTE DES TABLEAUX .....	IX
LISTE DES ACRONYMES.....	XI
LISTE DES SYMBOLES.....	XIII
RÉSUMÉ.....	XV
CHAPITRE I	
INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique générale.....	1
1.2 Méthodologie .....	5
1.3 Objectifs du mémoire .....	9
CHAPITRE II	
ON THE CURRENT AND FUTURE DRY SPELL CHARACTERISTICS OVER AFRICA .....	11
Abstract .....	12
2.1 Introduction .....	13
2.2 Model, Experimental Configuration, Datasets and Methods .....	15
2.2.2 Observational data .....	17
2.2.3 Methods .....	17
2.3 Results .....	20
2.3.1 Assessment of Errors and Added Value .....	20
2.3.2 Projected changes to Dry Spell Characteristics .....	25
2.4 Discussion and conclusions.....	29
Acknowledgements .....	32
FIGURES .....	33
CHAPITRE III	
CONCLUSION .....	45
ANNEXE A	
EXEMPLE DE CALCUL DU MAXIMUM ANNUEL DE JOUR CONSÉCUTIF SANS PRÉCIPITATION ASSOCIÉ À UNE RÉCURRENCE DE 5 ANS POUR LE CLIMAT PRÉSENT (1981-2010).....	51
ANNEXE B	
TABLEAUX ET FIGURES COMPLÉMENTAIRES .....	55
RÉFÉRENCES .....	61



## LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1 African simulation domain for (a) CRCM5 at 0.44° horizontal resolution, with only every 5 <sup>th</sup> grid box displayed. The dashed lines represent the 10 grid-point nesting zone and the dotted line represents the domain of interest. The (b) CanESM2 grid at 2.81° horizontal resolution and (c) GPCP grid at 1° horizontal resolution is also shown. The red horizontal line represents the equator... ..	34
2.2 Number of dry days at 0.5 mm (top) and 3 mm (bottom) thresholds for the (a) annual, (b) boreal summer (JAS) and (c) austral summer (JFM) for CRCM5 driven by ERA-Interim (middle left) and CanESM2 (middle right), CanESM2 (extreme right) and GPCP (extreme left), for the 1997–2008 period.....	35
2.3 Number of dry spells at 0.5 mm (top) and 3 mm (bottom) thresholds for the (a) total 12 years, (b) boreal summer and (c) austral summer period for CRCM5 driven by ERA-Interim (middle left), and CanESM2 (middle right), CanESM2 (extreme right) and GPCP (extreme left), for the 1997–2008 period.....	36
2.4 Same as Figure 2.2, but for the five-year return levels of the maximum dry spell duration. The grid points are masked in grey color where the return levels are larger than 365 days in the case of (a), and 92 days in the cases of (b) and (c).....	37
2.5 Annual (top row), boreal (middle row) and austral (bottom row) summer mean (1997–2008) precipitation for GPCP (extreme left), CRCM5 driven by ERA-Interim (middle left), CRCM5 driven by CanESM2 (middle right) and CanESM2 (extreme right) for the 1997–2008 period. ....	38
2.6 Annual mean number of dry days as simulated by CRCM5 driven by CanESM2 (top panel) and CanESM2 (bottom panel) for the present (1981–2010; left column) and the corresponding projected changes for the 2041–2070 (middle column) and the 2071–2100 (right column) periods for RCP 4.5 scenario for 2 mm threshold. Grid cells where projected changes are not statistically significant at 95% confidence level are shown in white.. ..	39
2.7 Same as Figure 2.6, but for the mean number of dry days for boreal summer.. ..	39
2.8 Same as Figure 2.6, but for the mean number of dry days for austral summer.....	40
2.9 Same as Figure 2.6, but for annual mean number of dry spells .....	40

2.10	Same as Figure 2.6, but for the mean number of dry spells for boreal summer.....	41
2.11	Same as Figure 2.6, but for the mean number of dry spells for austral summer. ....	41
2.12	Same as Figure 2.6, but for the five-year return level of the annual maximum dry spell duration. The grid points where the return levels are larger than 365 days are masked in grey color.....	42
2.13	Same as Figure 2.6, but for the five-year return level of the boreal summer maximum dry spell duration. The grid points where the return levels are larger than 92 days or where the return levels were not computed due to insufficient value of maximum dry spell duration are masked in grey color.. ..	42
2.14	Same as Figure 2.13, but for the austral summer.. ..	43



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
A.1 Tableau représentant les 60 valeurs du nombre de jours consécutifs annuel sans précipitation (x) pour le point de grille (104,109) et pour un seuil de 2 mm. Les résultats sont montrés pour 3 périodes de 30 ans simulés par le MRCC5 piloté par CanESM2; 1981-2010; 2041-2070 et 2071-2100.....	52



## LISTE DES ACRONYMES

A1B	Scénario d'émission de gaz à effet de serre
AIACC	Assessment of Impact and Adaptation to Climate Change
AFRMIP	Greater Horn of AFRica Regional Model Intercomparison Project
AMMA	African Monsoon Multidisciplinary Analysis
CanESM2	2 <sup>nd</sup> version of the Canadian Earth System Model
CGCM	Canadian Global Climate Model
CLASS	Canadian Land Surface Scheme
CORDEX	COordinated Regional climate Downscaling EXperiment
CRCM5	The 5 <sup>th</sup> generation of the Canadian Regional Climate Model
DARLAM	Division of Atmospheric Research Limited Area Model
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA-Interim	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis
GCM	Global Climate Model
GEM	Global Environment Multiscale
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GPCP	Global Precipitation Climatology Project
GPCC	Global Precipitation Climatology Center
GPD	Generalized Pareto Distribution

HadRM3H	Hadley Regional Climate Model
ITCZ	Inter Tropical Convergence Zone
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MCG	Modèle de Circulation Générale
MRC	Modèle Régional du Climat
MRCC5	5 <sup>e</sup> version du Modèle Régional Canadien du Climat
PNUE	Programme des Nation Unies pour l'Environnement
POT	Peak-Over-Threshold
PWM	Probability Weighted Moment
RCM	Regional Climate Model
RCP	Representative Concentration Pathway
RegCM3	Regional Climat Model from the National Center for Atmospheric Research
SST	Sea Surface Temperature
WAMME	West African Monsoon Modeling and Evaluation
WRF	Weather Research and Forecasting
ZCIT	Zone de Convergence Intertropical

## LISTE DES SYMBOLES

$\alpha$	Paramètre d'échelle
$b_0, b_1, b_2$	Estimateurs de la probabilité pondérés
$\beta_0, \beta_1, \beta_2$	Estimateurs théoriques de la probabilité pondérés
$\xi$	Paramètre de localisation
$k$	Paramètre de forme
$\lambda$	Nombre d'occurrence moyen de jour consécutif sans précipitation par année ou par saison
N	Nombre d'année disponible
RL	Return level (Événement de faible récurrence)
T	Période de retour



## RÉSUMÉ

Les conséquences des changements climatiques sur la fréquence ainsi que sur l'intensité des précipitations auront un impact direct sur les périodes de sécheresse et par conséquent sur différents secteurs économiques tels que le secteur de l'agriculture. Ainsi, dans cette étude, l'habilité du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC5) à simuler les différentes caractéristiques des périodes de sécheresse est évaluée pour 4 seuils de précipitation soit 0.5 mm, 1 mm, 2 mm et 3 mm. Ces caractéristiques incluent le nombre de jours secs, le nombre de périodes de sécheresse ainsi que le maximum de jours consécutifs sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans. Les résultats sont présentés pour des moyennes annuelles et saisonnières. L'erreur de performance est évaluée en comparant le MRCC5 piloté par ERA-Interim aux données d'analyses du GPCP pour le climat présent (1997-2008). L'erreur due aux conditions aux frontières c'est-à-dire les erreurs de pilotage du MRCC5, soit par CanESM2 et par ERA-Interim ainsi que l'évaluation de la valeur ajoutée du MRCC5 face au CanESM2 sont également analysées. L'analyse de ces caractéristiques est également faite dans un contexte de climat changeant pour deux périodes futures, soit 2041-2070 et 2071-2100 à l'aide du MRCC5 piloté par le modèle de circulation générale CanESM2 de même que par le modèle CanESM2 sous le scénario RCP 4.5. Les résultats suggèrent que le MRCC5 piloté par ERA-Interim a tendance à surestimer la moyenne annuelle du nombre de jours secs ainsi que le maximum de jours consécutifs sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans dans la plupart des régions de l'Afrique et une tendance à sous-estimer le nombre de périodes de sécheresse. En général, l'erreur de performance est plus importante que l'erreur due aux conditions aux frontières pour les différentes caractéristiques de périodes de sécheresse. Pour les régions équatoriales, les changements appréhendés par le MRCC5 piloté par CanESM2 pour les différentes caractéristiques de périodes de sécheresse et pour deux périodes futures (2041-2070 et 2071-2100), suggèrent une augmentation significatives du nombre de jours secs ainsi que du maximum de jours consécutifs sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans. Une diminution significative du nombre de périodes de sécheresse est aussi prévue.

Mots clés : Modèle Régional du Climat; Changement climatique; Jours secs; Nombre de périodes de sécheresse; Événement de faible récurrence; Afrique





## CHAPITRE I

### INTRODUCTION

#### 1.1 Problématique générale

Le climat sur le continent de l'Afrique est variable dans l'espace et le dans temps; dans l'espace car il est caractérisé par une grande variété dans les climats; équatorial au centre, aride au niveau des tropiques et tempéré à chaud en Afrique du Nord et en Afrique austral. Le climat est également variable dans le temps car il évolue à travers les saisons avec le déplacement de la Zone de Convergence Intertropical (ZCIT) générant les moussons. Cette zone transitoire migre à sa position la plus méridionale durant l'été austral (Janvier-Février-Mars) et atteint sa position la plus septentrionale pendant l'été boréal (Juillet-Aout-Septembre). Cette variation saisonnière de la ZCIT est complexe car celle-ci ne revient pas nécessairement à la même position d'une année à l'autre. Les régions semi-arides sont donc vulnérables à ces changements interannuels. L'étude de Motha et al. (1980) a d'ailleurs montré que lorsque la ZCIT ne remonte pas assez au nord, des répercussions notables sont présentes pour les récoltes au Sahel. En effet, en 1979 plus de 100 000 personnes sont décédées dû à une insuffisance alimentaire. Ainsi, comprendre et prévoir cette variation saisonnière de la ZCIT fait partie des nombreux défis des spécialistes du climat.

Ces changements en termes de quantité et de distributions des précipitations peuvent avoir un effet notable sur les périodes de sécheresse et de pluie ce qui affectera nécessairement plusieurs secteurs économiques tels que l'agriculture. En effet, dans plusieurs régions de l'Afrique, l'agriculture est très dépendante de l'apport quotidien de précipitation.

Par exemple dans la Corne africaine, la vulnérabilité face à la demande en eau est amplifiée par le fait que la population vit essentiellement de l'agriculture et de l'élevage de bétails (Anyah et al., 2010). Or dans cette région, les observations ainsi que les projections futures dénotent une diminution de la précipitation durant la saison sèche ce qui par conséquent pourrait causer plus d'événements de sécheresse.

En se basant sur 21 modèles globaux pour le scénario d'émission A1B, le 4<sup>e</sup> rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) prévoit des changements de température et de précipitation entre la période future (2080-2099) et la période de référence (1980-1990). Pour le GIEC, le scénario d'émission A1B correspond à une croissance économique rapide s'appuyant sur des sources d'énergie équilibrées entre fossiles et autres (nucléaires, renouvelables). En ce qui concerne l'Afrique, la distribution spatiale de la température annuelle augmentera d'ici la fin du siècle et ce, de façon bien plus importante qu'ailleurs dans le monde. Dans ce scénario d'émission, les climats plus arides tels que les déserts se réchaufferont davantage que les zones plus humides de l'équateur. La précipitation annuelle va quant à elle diminuer dans les pays méditerranéens ainsi qu'au nord du Sahara. Un assèchement est également projeté pour l'Afrique du Sud ainsi que le long de la côte Ouest africaine alors qu'une augmentation de la précipitation est prévue en Afrique de l'Est. Ces conclusions restent toutefois précaires car selon le GIEC, les Modèles de Circulation Générale (MCG) ont de la difficulté à bien représenter les processus clés du climat présent africain. En effet, la surestimation des précipitations dans le sud de l'Afrique, la difficulté à simuler la migration latitudinale de la ZCIT, ainsi que la sous estimation des températures sur l'océan au large du désert de Kalahari, ne permettent pas d'avoir un bon niveau de confiance quant aux conséquences des changements climatiques (GIEC, 2007).

D'autre part, les changements projetés en termes de température et de précipitation vont également avoir un impact notable sur la gestion et la disponibilité des ressources en eau. Une étude faite par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) (<http://www.grida.no/publications/vg/africa-fr/page/3150.aspx>) a montré que d'ici 2025, environ la moitié des pays africains feront face à des stress hydriques; c'est-à-dire que la demande en eau dépassera les ressources disponibles. Parmi ces pays, une partie se retrouvera

même sous le statut de pénurie en eau (moins de 1000 m<sup>3</sup> d'eau par habitant par année). C'est donc dans ce contexte que l'Afrique a été désignée comme le continent le plus vulnérable aux changements climatiques par le GIEC dans son 4<sup>e</sup> rapport.

Plusieurs études se sont intéressées aux changements appréhendés des précipitations en utilisant les MCG sur différents continents (Barnett et al., 2005; Dai, 2005, Tebaldi et al., 2006). Plus particulièrement, Tebaldi et al. (2006) se sont concentrés sur les extrêmes, en étudiant le nombre de jours secs à l'aide de 9 MCG. Dans cette étude, un jour sec est défini comme étant un jour où la précipitation est inférieure à 1 mm. Malgré les grandes différences entre les MCG, une diminution du nombre de jours secs à l'équateur ainsi qu'une augmentation dans les tropiques sont projetées d'ici la fin du siècle, sous le scénario A1B.

Les MCG sont souvent utilisés afin de simuler la circulation atmosphérique générale, toutefois lorsque l'intérêt est de faire des études d'impacts et d'adaptation, ceux-ci n'offrent pas une résolution adéquate. En effet, c'est particulièrement le cas dans les régions où l'on retrouve une grande diversité dans le type de terrain (montagne, côte, faune). Il a également été montré que les MCG ont de la difficulté à bien représenter les événements extrêmes tels que les fortes précipitations (Hudson and Jones, 2002). En effet, Sun et al. (2005) ont montré que la plupart des MCG surestiment les faibles précipitations (1-10 mm/jour) et sous-estiment les événements de fortes précipitations (>10 mm/jour). Puisque les processus de précipitations convectifs ont lieu à plus fines échelles, l'utilisation d'un modèle à meilleure résolution, tel qu'un Modèle Régional du Climat (MRC) est plus adéquat pour les études d'impacts et d'adaptation.

L'utilisation d'un MRC sur le domaine de l'Afrique est encore aujourd'hui une approche en émergence dû entre autre au manque de ressources de plusieurs pays africains. Plusieurs études se sont tout de même intéressées à simuler le climat de certaines régions de ce continent. Sun et al. (1999) ont étudié la précipitation sur l'Est de l'Afrique à l'aide d'un MRC de 60 km de résolution horizontale (RegCM2), Patricola and Cook (2006) se sont intéressés à la dynamique des moussons de l'ouest africain à l'aide du modèle Weather Research and Forecasting (WRF) à 90 km de résolution horizontale. Hudson and Jones (2002) ont, quant à eux, examiné le climat de l'Afrique du Sud avec le modèle Hadley Regional

Climate Model (HadRCM3) à 50 km de résolution horizontale. D'autres auteurs, tels que Pal et al. (2007), Sylla et al. (2009) et Hernandez et al. (2012) ont évalué l'habilité des différents modèles climatiques régionaux à représenter les processus clés sur tout le domaine de l'Afrique.

Suite aux conclusions du 4<sup>e</sup> rapport du GIEC, qui font état de la vulnérabilité de l'Afrique face aux changements climatiques, plusieurs projets internationaux ont vu le jour : l'AIACC (The Assessment of Impact and Adaptation to Climate Change; Hewiston et al., 2003) ayant pour but de comprendre l'effet des changements climatiques des pays en voie de développement; ENSEMBLE (van der Linden and Mitchell, 2009) ayant, en outre, pour mandat de simuler le climat de l'Afrique de l'Ouest en contexte de changement climatique avec des MRC à 50 km de résolution horizontale; le projet AFRMIP (The Greater Horn of Africa Regional Model ; Anyah et al., 2010) ayant pour but d'investiguer les multiples incertitudes des simulations du MRC sur diverses régions d'Afrique; le projet AMMA (The African Monsoon Multidisciplinary Analysis; Redelsperger et al., 2002; Sultan et al., 2003; Van der Linden and Mitchell., 2009) visant à mieux comprendre les moussons africaines; le projet WAMME (West African Monsoon Modeling and Evaluation; Xue et al., 2010, Druyan et al., 2010) évaluant le rôle de l'interaction entre la terre et l'océan sur les moussons africaines en utilisant des MCG et des MRC et finalement, le projet CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling EXperiment; Giorgi et al., 2009; Jones et al., 2011) qui a été créé afin de fournir un cadre d'évaluation et de vérification de l'efficacité des modèles et de concevoir une série d'expériences destinée à obtenir des projections climatiques pouvant servir aux études d'impacts et d'adaptation, en ce concentrant tout d'abord sur le domaine de l'Afrique. Malgré le récent intérêt porté sur l'étude du domaine de l'Afrique à l'aide des MRC, à ce jour, il existe très peu d'informations portant sur les extrêmes.

Bref, peu d'études se sont intéressées à l'utilisation d'un MRC pour simuler les différentes caractéristiques des périodes de sécheresse sur le domaine de l'Afrique. Ainsi, la présente étude s'intéresse aux différentes caractéristiques des périodes de sécheresse incluant le nombre de jours secs, le nombre de périodes de sécheresse ainsi que le maximum de jours consécutifs sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans. Le tout est évalué pour

différents seuils de précipitation soit 0.5 mm, 1 mm, 2 mm et 3 mm à l'aide de la 5<sup>e</sup> version du Modèle Régional du Climat Canadien (MRCC). Ces caractéristiques sont simulées de façon annuelle et saisonnière pour le climat présent et le climat futur. La description des différents aspects méthodologiques sont présentés dans la section 1.2 ainsi que les analyses dans le chapitre 3.

## 1.2 Méthodologie

Dans la présente étude, l'analyse des différentes caractéristiques des périodes de sécheresse est réalisée en deux volets. Dans un premier temps, le MRCC5 est évalué pour le climat présent (1997-2008), ce qui consiste à quantifier l'habileté du Modèle Régional du Climat (MRC) en termes d'erreur de performance ou bien en termes d'erreur due aux conditions aux frontières et de l'analyse de la valeur ajoutée. Dans un deuxième temps, les différentes caractéristiques des périodes de sécheresse provenant des mêmes simulations sont analysées pour deux périodes futures (2041-2070 et 2071-2100) sous le scénario d'émission de gaz à effet de serre RCP 4.5. Les résultats obtenus pour les deux périodes sont ensuite comparés avec la période de référence afin de saisir l'évolution de ces différentes caractéristiques dans un climat plus chaud.

L'analyse des différentes caractéristiques des périodes de sécheresse annuelle et saisonnière inclut le nombre de jours secs, le nombre de périodes de sécheresse ainsi que le maximum de jours consécutifs sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans. Il est à noter que dans cette étude, une période de récurrence de 5 ans a été sélectionnée puisque le nombre d'années disponibles pour les observations est limité à 12 ans. Ainsi le choix d'une plus grande période de récurrence résulterait à une plus grande incertitude. Deux saisons ont été choisies afin de représenter la variation saisonnière des précipitations en Afrique : l'été boréal correspondant aux mois de juin, juillet et août et l'été austral correspondant aux mois de décembre, janvier et février. Dans cette étude, un jour sec est défini comme étant un jour où la quantité de précipitation est plus petite qu'un certain seuil préétabli. Dans le cas présent, les seuils de 0.5 mm, 1 mm, 2 mm ainsi que 3 mm sont sélectionnés. Ce choix méthodologique est toutefois subjectif puisque les seuils sélectionnés varient selon les

auteurs : Beniston et al. (2007) ont défini un seuil de 1.8 mm pour différencier un jour de pluie d'un jour sec sur le domaine de l'Europe; Eun-Soon and Kwon (2007) ont utilisé le seuil de 1 mm sur la Corée et Sushama et al. (2010) ont choisi 0.5 mm, 1 mm, 2 mm et 3 mm sur le Canada. Le choix du seuil peut également être déterminé à l'aide de considérations physiques. Une période de sécheresse est définie comme étant une accumulation de jours secs pour un seuil préétabli. Dans cette étude, le minimum de jour sans précipitation requis pour avoir une période de sécheresse est d'un.

Le maximum de jours consécutifs sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans est défini comme étant une estimation statistique du nombre de jours maximum consécutifs sans précipitation qui auraient lieu en moyenne une fois à tous les 5 ans (i.e., une probabilité de 1/5 de survenir à chaque année). Différentes approches existent pour calculer un événement de faible récurrence. Dans la présente étude, l'approche du « Peak-Over-Threshold (POT) » est utilisée. Cette méthode consiste à choisir tous les événements plus grands qu'un certain seuil ou, alternativement, à fixer à priori le nombre moyen d'occurrence de jours consécutifs sans précipitation ( $\lambda$ ) par année ou par saison. C'est à partir du nombre d'année disponible ( $N$ ) que les  $N\lambda$  valeurs les plus extrêmes sont sélectionnées. Dans cette étude,  $\lambda$  peut varier entre 1 et 2 dépendamment de la région d'intérêt. Par exemple, à l'équateur,  $\lambda=2$  car le nombre d'occurrence de périodes de sécheresse est grand. Dans les régions subtropicales,  $\lambda$  varie entre 1 et 2 tandis que dans les régions désertiques,  $\lambda=1$  puisque le nombre d'occurrence d'événement de périodes de sécheresse est petit. Ces données sont par la suite ajustées à la distribution statistique GPD (General Pareto Distribution) à l'aide de la méthode du Probability weighted moment (PWM) (Sushama et al., 2012). Un exemple de ce calcul est fourni dans l'annexe A.

### 1.2.1 Évaluation des erreurs de performance

Afin d'évaluer la performance du modèle, le MRCC5 piloté aux frontières par ERA-Interim est comparé aux données d'analyses du Global Precipitation Climatology Project (GPCP) (Huffman et al., 2001). Puisque les données du GPCP ne commencent qu'en 1997, la période allant de 1997 à 2008 est utilisée à des fins de comparaison. Les différentes caractéristiques des périodes de sécheresse sont calculées de façon annuelle et saisonnière

mis à part pour le nombre total de périodes de sécheresse qui correspond au cumulatif sur 12 ans (1997-2008). Ce choix méthodologique permet d'inclure les périodes de sécheresse qui pourraient durer plus d'une année. En ce qui concerne le nombre d'événements de faible occurrence, puisque la période d'étude est de 12 ans (1997-2008), et que  $\lambda$  varie entre 1 et 2, les valeurs du  $N\lambda$  peuvent varier entre de 12 à 24. Les événements de récurrence de 5 ans sont calculés pour chacun des points de grille situé sur le continent à l'exception des points de grille où le maximum de jours consécutifs sans précipitation est plus grand que 365 (92) pour le cas annuel (saisonnier). L'analyse est faite pour les quatre seuils de précipitation soit 0.5 mm, 1 mm, 2 mm et 3 mm.

Les erreurs dues aux conditions aux frontières peuvent avoir une influence notable sur l'aptitude du MRCC5 à simuler le climat. Ainsi pour évaluer la dépendance des résultats des simulations aux conditions aux frontières, le MRCC5 piloté par ERA-Interim est comparé avec le MRCC5 piloté par CanESM2.

La valeur ajoutée du MRC est de déterminer si ces simulations améliorent la qualité des simulations climatiques par rapport à celle issue des Modèles de Circulation Général (MCGs) qui ont une faible résolution. Les différences entre les deux modèles se retrouvent généralement dans les régions marquées par une diversité de l'orographie, un contraste terre-mer, un changement de type de surface et également là où il existe certains processus atmosphériques qui doivent être résolus à plus fine échelle telle que la convection. Dans le cadre de la présente étude, la valeur ajoutée du MRCC5 est quantifiée en comparant le MRCC5 piloté par CanESM2 à CanESM2.

### 1.2.2 Changements projetés

Les changements projetés des différentes caractéristiques de périodes de sécheresse sont évalués pour deux périodes futures (2041 à 2070 et 2071 à 2100) et sont par la suite comparés à la période de référence (1980-2010). Ces comparaisons sont faites en se basant sur les simulations du MRCC5 piloté par CanESM2 ainsi que CanESM2. Pour le calcul des événements de récurrence de 5 ans, la période d'étude d'une durée de 30 ans permet de recenser de 30 à 60 événements extrêmes (pour  $\lambda=2$ ). L'évaluation des changements

appréhendés des différentes caractéristiques de périodes de sécheresse consiste également à savoir si ces changements sont statistiquement significatifs. Pour ce faire, le Student t-test pour un intervalle de confiance de 95% (Walpole and Myers, 1985) est utilisé pour les deux variables suivantes : le nombre de jours secs et le nombre de périodes de sécheresse. Pour les événements de récurrence de 5 ans, la méthode du bootstrap (Efron and Tibshirani, 1993; Davison and Hinkley, 1997) est employée. Cette approche consiste à calculer un intervalle à 95% de confiance pour des événements de récurrence de 5 ans. Pour ce faire, un ré-échantillonnage, calculé de façon aléatoire, est effectué 1000 fois, pour créer un nouvel échantillon d'événements. Finalement, l'écart type de cet échantillon est utilisé pour déterminer l'intervalle de confiance. Ces intervalles sont construits pour chacun des points de grille pour le climat de référence (1981-2010) et le climat futur (2041-2070 et 2071-2100). Si les intervalles de confiance du climat futur et du climat de référence ne se chevauchent pas, les changements sont dits statistiquement significatifs.

En résumé, la présente étude s'intéresse à l'analyse des différentes caractéristiques des périodes de sécheresse incluant le nombre de jours secs, le nombre de périodes de sécheresse ainsi que le maximum de jours consécutifs sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans. Ces caractéristiques sont simulées à l'aide de la 5<sup>e</sup> version du Modèle Régional du Climat Canadien (MRCC5) ainsi que de la 2<sup>e</sup> génération du Modèle de Circulation Général Système Terre (CanESM2). Dans un premier temps, une analyse de la performance du modèle est faite en comparant le MRCC5 piloté par les réanalyses ERA-Interim à 0.44 degré de résolution avec les analyses du Global précipitation Climatology Project (GPCP) à 1 degré de résolution horizontal pour la période courante (1997-2008). Par la suite, les erreurs dues aux conditions frontières sont analysées en comparant le MRCC5 piloté par ERA-Interim avec le MRCC5 piloté par CanESM2. Finalement, la valeur ajoutée du MRC est évaluée en comparant le MRCC5 piloté par CanESM2 et le modèle global CanESM2. Finalement, les différentes caractéristiques des périodes de sécheresse sont évaluées pour un climat futur (2041-2070 et 2071-2100) en comparaison avec un climat de référence (1980-2010) à l'aide du MRCC5 piloté par CanESM2 ainsi que CanESM2 sous le scénario de gaz à effet de serre RCP 4.5.



### 1.3 Objectifs du mémoire

Ce mémoire vise à estimer les changements appréhendés des différentes caractéristiques de précipitation sur le domaine de l'Afrique à l'aide du MRCC5 et du CanESM2. Il vise également à quantifier la valeur ajoutée du modèle régional en comparaison avec le modèle global. Pour y parvenir, voici les grandes étapes de ce mémoire :

- 1) Calculer le nombre de jours secs, le nombre de périodes de sécheresse ainsi que le nombre de jours consécutifs sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans d'après les seuils de précipitation correspondant à 0.5 mm, 1 mm, 2 mm et 3 mm. Ainsi les erreurs de performances sont évaluées en comparant le MRCC5 piloté par ERA-Interim avec le GPCP.
- 2) Comparer les erreurs de pilotage entre les deux simulations du MRCC5 (ERA-Interim vs CANESM2)
- 3) Déterminer la valeur ajoutée du MRCC5 vs CanESM2
- 4) Estimer les changements appréhendés pour les différentes caractéristiques de périodes de sécheresse entre la période de référence (1980-2010) et les deux périodes futures (2041-2070 et 2071-2100) pour le modèle régional et le modèle global de façon annuelle et saisonnière.
- 5) Vérifier si ces changements sont statistiquement significatifs en utilisant la méthode du t-test pour le nombre de jours secs et le nombre de périodes de sécheresse et la méthode du bootstrap pour les événements de récurrence de 5 ans.

Organisation du mémoire :

Tout d'abord, l'introduction est présentée au chapitre I et est subdivisée en 3 sections 1) Problématique générale 2) Méthodologie et 3) Objectifs du mémoire. Le chapitre II comprend l'article scientifique rédigé en anglais. Cet article est lui-même séparé en plusieurs sections : 1) l'introduction, 2) la description des modèles ainsi que la configuration expérimentale, 3) la méthodologie, 4) l'évaluation des erreurs et de la valeur ajoutée ainsi que l'analyse des changements appréhendés et 5) la discussion des résultats et conclusions. Le dernier chapitre (III) contient la discussion des résultats et les conclusions du mémoire.

Finalemment, quelques figures et tableaux ne se retrouvant pas dans l'article, sont présentés en complément en annexe A et B. L'annexe A est un exemple de calcul du maximum annuel de jour consécutif sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans pour le climat présent (1981-2010). L'annexe B montre les changements appréhendés pour les différentes caractéristiques de périodes de sécheresse pour le seuil de précipitation de 2 mm. Ces résultats diffèrent de ceux présentés dans l'article dans la mesure où les figures des changements appréhendés ne montrent pas seulement les valeurs qui sont statistiquement significatif à 95%.

## CHAPITRE II

### ON THE CURRENT AND FUTURE DRY SPELL CHARACTERISTICS OVER AFRICA

Bessam Bouagila<sup>1</sup>, Laxmi Sushama<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre ESCER (Étude et Simulation du Climat à l'Échelle Régionale), University of Quebec at Montreal, 201-Président-Kennedy, Montreal, Quebec, Canada H3C 3P8.

\*Corresponding author

Tel: +1 514-987-3000 ext. 2414

Fax: +1 514-987-6853

Email: [bessam@sca.uqam.ca](mailto:bessam@sca.uqam.ca)

(Submitted to Atmosphere)

## Abstract

Changes in precipitation frequency and intensity distribution over Africa will have a direct impact on dry spells and, therefore, will affect various climate sensitive sectors. In this study, the ability of the fifth generation of the Canadian Regional Climate Model (CRCM5) in simulating annual and seasonal dry spell characteristics is assessed for four precipitation thresholds (0.5 mm, 1 mm, 2 mm and 3 mm) over Africa. The dry spell characteristics considered are the number of dry days, number of dry spells and five-year return levels of maximum dry spell durations. The performance errors are assessed by comparing ERA-Interim driven CRCM5 with the Global Precipitation Climatology Project (GPCP) dataset, for the common 1997–2008 period. Lateral boundary forcing errors, i.e., errors in the CRCM5 simulation created by errors in the driving Canadian Earth System model (CanESM2) data—as well as the added value—of CRCM5 over CanESM2 are also assessed for the current climate. This is followed by an assessment of projected changes to dry spell characteristics for two future climates (2041–2070 and 2071–2100) simulated by both CRCM5 driven by CanESM2 and CanESM2 itself, for Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5. Results suggest that CRCM5 driven by ERA-Interim has a tendency to overestimate the annual mean number of dry days and the five-year return level of the maximum dry spell duration in a majority of the regions while it slightly underestimates the number of dry spells. In general, the CRCM5 performance errors associated with the annual and seasonal dry spell characteristics are found to be larger in magnitude compared to the lateral boundary forcing errors. Projected changes to the dry spell characteristics for the 2041–2070 and 2071–2100 periods, with respect to the 1981–2010 period suggests significant changes in the tropics, with the mean number of dry days and the five-year return levels of maximum dry spell duration increasing, while the mean number of dry spell days decreases.

**Keywords:** Dry spell characteristics, regional climate model, Africa, climate change

## 2.1 Introduction

According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007), Africa is one of the most vulnerable continents to climate change and climate variability. Global Climate Models (GCMs) participating in IPCC's fourth Assessment Report suggest warmer temperatures, in the range of 2–7 °C for Africa by the end of the 21st century. This warming is non-uniform, with the drier subtropical regions projected to experience warmer temperatures than the moist tropical region. As for precipitation, annual amounts are expected to decrease in parts of Africa above 20°N and below 25°S, while an increase is expected in the Horn of Africa. For regions such as Sahel and the Guinean coast, annual and seasonal mean precipitation show no clear signal (IPCC, 2007).

Changes in precipitation frequency and intensity distribution can have an impact on dry and wet spells and, therefore, will affect various climate sensitive sectors, primarily agriculture. For most parts of Africa, agriculture is predominantly rain fed and thus, very vulnerable to changes in precipitation. The uneven seasonal distribution of precipitation can expose crops to a range of mild to severe intra-seasonal dry spells, which may affect the yield (Barron et al., 2002). For example, for East Africa (Kenya-Uganda-Tanzania), Shongwe *et al.* (2010) report a positive shift in the precipitation distribution, i.e., an increase in high intensity precipitation events, by the end of the century for the two wet seasons (October–December and March–May) based on GCM projections. Their study also suggests less severe droughts for East Africa.

Several previous studies such as Barnett et al. (2006), Dai (2006); Tebaldi et al. (2006) have assessed projected changes to global precipitation characteristics using GCMs. Tebaldi et al. (2006) studied projected changes to 10 indicators of climate extremes using an ensemble of nine GCMs according to a range of emission scenarios. Their study, despite the large spread in GCMs, showed on average a general decrease in the number of dry days (days with precipitation less than 1 mm) for the central east part of the tropics and an increase for the subtropics, over the African continent, for the A1B scenario. The large spread in GCM projections, particularly over Africa, is an indication of the challenges in simulating climate characteristics of the continent. In fact, climatic models still represent the main characteristics in and around Africa with significant errors such as excessive precipitation in the south,

southward displacement of the Atlantic Inter-Tropical Convergence Zone (ITCZ), and insufficient upwelling near the Kalahari desert (IPCC, 2007), making it difficult to assess the changes in future climate with confidence.

Though GCMs provide better simulations for the atmospheric general circulation at a larger scale, they do not offer required detail for regional and local assessment. This is particularly true for heterogeneous regions, with important variations of topography, vegetation, soils and coastlines (Hudson and Jones, 2002). Extreme events such as heavy precipitation are often not well-captured by GCMs. In fact, Sun et al. (2005) showed that over land, most current GCMs overestimate light precipitation (1–10 mm/day) and underestimate heavy precipitation (>10 mm/day). Since precipitation processes occur at finer resolution (Kundzewicz et al., 2007), the Regional Climate Model (RCM) is a more adequate tool for many regional impact and adaptation studies as reported by Gao et al. (2006), May (2008); Sushama et al. (2010); Sanchez et al. (2011) and Heinrich et al. (2012).

Although the use of RCMs over Africa is still in its infancy (Hulme et al., 2001), efforts have been made to assess the main climatic features of Africa with regional models; Sun et al. (1999) used RegCM2 from the National Center for Atmospheric Research to investigate precipitation over East Africa, while Patricola et al. (2006) studied the dynamics of the West African Monsoon with the Weather Research and Forecasting (WRF) model, and Ibrahim et al. (2012) used five RCMs for the same region. Joubert et al. (1999) used the Division of Atmospheric Research Limited Area Model (DARLAM) from Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, and Hudson et al. (2002) used the Hadley Regional Climate Model (HadRM3H) to examine the climate of southern Africa.

In response to the vulnerability of Africa to climate change stated in the fourth Assessment Report of the IPCC (2007), many recent international projects such as the Assessment of Impact and Adaptation to Climate Change (AIACC) (Hewiston et al., 2003), the Greater Horn of Africa Regional Model Intercomparison Project (AFRMIP) (Anyah et al., 2011), the African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA) (Sultan et al., 2004; Redelsperger et al., 2006; Van der Linden and Mitchell, 2009) and the West African Monsoon Modeling and Evaluation (WAMME) (Druryan et al., 2010; Xue et al., 2010) have focused on the application of RCMs over Africa. The latest in the series of international projects, CORDEX (Giorgi et al., 2009) was initiated to evaluate and improve the ability of

an ensemble of RCM simulations, including CRCM5 (Hernández-Díaz et al., 2013; Laprise et al., 2013) over selected domains, such as Africa. CORDEX is also providing a standardized framework of Regional Climate Downscaling for improved regional climate change adaptation and impact assessment (<http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/cordex/about.html>). Africa was selected as the first target region in order to improve simulation of key elements of current climate and then providing climate-change projections with various RCMs. Despite this recent increase in RCM application over Africa, study of extreme events is still very limited for the region (IPCC, 2007).

So far, no studies on projected changes to dry spell characteristics over the African continent using RCMs are available. Such studies are required to aid develop adaptation strategies in the context of a changing climate. This article presents a thorough analysis of the annual and seasonal dry spell characteristics over Africa, as simulated by the fifth generation of the Canadian Regional Climate Model (CRCM5) in the current climate, and their projected changes for future periods. Projected changes based on the Canadian Earth System Model (CanESM2), which provides driving data at the CRCM5 lateral boundaries, are also investigated for the Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5 scenario. The RCPs, which are based on simulations from a set of Integrated Assessment Models (IAMs), provide both concentration and emissions of radiatively important greenhouse gases emissions for several aerosols and their precursor species, and associated land cover change scenarios. In total, a set of four pathways—RCPs 2.6, 4.5, 6 and 8.5—were produced that lead to radiative forcing levels of 2.6, 4.5, 6 and 8.5 W/m<sup>2</sup> by the end of the century (Meinshausen et al., 2011).

The paper is organized as follows: section two describes CRCM5 experimental configuration, observation datasets used and the methodology followed. Assessment of performance and boundary forcing errors and added value of CRCM5 are presented in section three, followed by assessment of projected changes to dry spell characteristics for two future periods (2041–2070 and 2071–2100) with respect to the current 1981–2010 period, for RCP 4.5 scenario. Summary and conclusions are presented in section four.

## 2.2 Model, Experimental Configuration, Datasets and Methods

### 2.2.1 Model and Experimental configuration

The RCM considered in the study is CRCM5 (Zadra et al., 2008), which is based on a limited-area version of the Global Environment Multiscale (GEM) model used for Numerical Weather Prediction (NWP) at Environment Canada (Côté et al., 1998). GEM uses semi-Lagrangian transport and (quasi) fully implicit marching scheme. In its fully elastic non-hydrostatic formulation (Yeh et al., 2002), GEM uses a vertical coordinate based on hydrostatic pressure (Laprise, 1992). The following GEM parameterisations are used for CRCM5: deep convection following Kain et al. (1990), shallow convection based on a transient version of Kuo's (1965) scheme (Bélair et al., 2005), large scale condensation (Sundqvist et al., 1989), correlated-k solar and terrestrial radiations (Li and Barker, 2005), subgrid-scale orographic gravity-wave drag (McFarlane, 1987), low-level orographic blocking (Zadra et al., 2003), and turbulent kinetic energy closure in the planetary boundary layer and vertical diffusion (Benoît et al., 1989; Delage and Girard, 1992; Delage, 1997). In CRCM5, the usual GEM land-surface scheme has been replaced by CLASS version 3.4 (Verseghy, 2009) that allows a mosaic representation of land-surface types and a flexible number of soil layers in the vertical; in this article, 26 soil layers varying in thickness from 0.1 m at the surface to 5 m at the bottom are used.

A 150-year integration, spanning the 1951–2100 period on a  $201 \times 194$  points grid (Figure 2.1a) covering the whole of Africa and the adjoining oceans at 45 km horizontal grid spacing and 56 levels in the vertical is considered in this paper. This integration performs dynamical downscaling of the CanESM2 simulation to produce climate projections at the regional scale. In this simulation, the Sea Surface Temperature (SST) is prescribed and corresponds to that of CanESM2. CanESM2 simulation grid has a horizontal resolution of  $2.81^\circ$  with 35 vertical layers (Figure 2.1b), and follows RCP 4.5 scenario (Meinshausen et al., 2011) for the 2010–2100 period. Though the CRCM5 simulation spans the 1951–2100 period, this study focuses on the current 1981–2010 and the future 2041–2070 and 2071–2100 30-year periods.

In addition, a validation experiment, i.e., CRCM5 simulation forced at the lateral boundary by ERA-Interim (Simmons et al., 2007; Uppala et al., 2008) data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) for the 1984–2008 period is also considered. In this simulation, the prescribed SST follows ERA-Interim. According to IPCC, RCM simulations nested by reanalysis can reveal RCM 'performance errors' primarily



due to the dynamics and physics of the regional model, and should precede any attempt to make climate-change projections (Sushama et al., 2010). Hereafter, the CRCM5 driven by ERA-Interim and CRCM driven by CanESM2 will be referred to as CRCM5\_ERA\_Interim and CRCM5\_CanESM2, respectively.

### 2.2.2 Observational data

The observed dry spell characteristics used for evaluating CRCM5 are derived from the Global Precipitation Climatology Project (GPCP) (Huffman et al., 2001)  $1 \times 1^\circ$  dataset (Figure 2.1c) covering  $40^\circ\text{N}$  to  $40^\circ\text{S}$  at three-hourly intervals. GPCP is based on geosynchronous satellite data and gauge measurements from the Global Precipitation Climatology Center (GPCC). The data set extends from October 1996 to present.

It should be noted though that the GPCP dataset may not be accurate for certain regions. For example, Nikulin et al. (2011), based on a detailed analysis of the number of gauge stations included in the GPCC product, and therefore in GPCP, found that almost no station observations over central Africa (Angola, Democratic Republic of the Congo, Tanzania and Mozambique) were used for any of the months for the 1998–2006 period. This may have influenced the quality of the dataset over this region.

### 2.2.3 Methods

The objective of this article is two-fold. The first objective is to assess performance and boundary forcing errors (discussed below) associated with CRCM5 simulated dry spell characteristics and the added value of CRCM5 over the driving GCM, i.e., CanESM2. The second objective is to assess projected changes to dry spell characteristics from CRCM5 transient climate change simulations for the RCP 4.5 scenario. It must be noted that all analysis presented in this article are performed on respective grids. In other words, CanESM2 and GPCP data were not interpolated to CRCM5 grid, unless otherwise specified.

The dry spell characteristics considered in this study include the mean annual and seasonal number of dry days, dry spells and five-year return levels of annual and seasonal maximum dry spell duration, defined as the statistical estimate of the annual and seasonal maximum dry spell duration that would occur on average once every five years. The seasons considered correspond to the boreal (July–September; JAS) and austral (January–March; JFM) summers. In the present study, a dry day is defined as a day with a precipitation amount

less than a predefined threshold. This threshold is subjective and, in this study, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm and 3 mm are considered. As in previous studies (Lana et al., 2006; Beniston et al., 2007; Sushama et al., 2010; She et al., 2012), dry spell is defined as an extended period of dry days, including those of one day duration.

The return levels of dry spell durations are computed using the peaks-over-threshold (POT) approach. The advantage of the POT over the annual/seasonal maximum approach is that it considers those extreme values that are larger than some of the annual/seasonal maximum extremes that will not normally be considered in the annual/seasonal maximum approach (Sushama et al., 2010; She et al., 2012). In this approach, the average number of dry spell durations per year/season (say  $\lambda$ ) are set a priori and the largest  $n\lambda$  values are selected, from the  $n$  years considered. In this study,  $\lambda$  varies from 1 to 2 depending on the region. For the tropics where the number of dry spells is large,  $\lambda$  is set to 2, while for the subtropics,  $\lambda$  varies from 1 to 2 and for the Sahara  $\lambda$  is set to 1 since the number of dry spells are small though they are of very long durations. This approach strategy is equivalent to fixing the threshold at the, say, 95th or 98th percentile value (Coles, 2001). For probabilistic modelling of POT values, the General Pareto Distribution (GPD) is used (Sushama et al., 2010).

#### 2.2.3.1 Performance Errors

The performance errors are assessed by comparing dry spell characteristics, i.e., number of dry days, number of dry spells and return levels of maximum dry spell durations derived from the ERA-Interim driven CRCM5 simulation, for the current 1997–2008 climate, with those derived from GPCP (Huffman et al., 2001) analysis. The 1997–2008 period was chosen since GPCP is only available for this period. The performance errors are assessed for various characteristics at annual and seasonal time scales, except for the number of dry spells where, the total number of dry spells for the 12-year period is considered; this is to include the dry spells that will extend from the end of a given year to the beginning of the next year. For the computation of return levels, since the comparison period is the 12-year period, with  $\lambda$  for the POT analysis varying from 1 to 2, 12 to 24 maximum dry spell durations are considered. The five-year return levels of maximum duration of dry spell are computed for all land points, and are masked in grey at those grid points where the return levels of maximum

duration of dry spells are found larger than 365 (92) days in the case of annual (seasonal) maximum dry spells. The five-year return period is chosen since the number of years for which observation data is available is only 12 years. Return levels corresponding to higher return periods will have larger uncertainties given the small sample size and are therefore not considered. Though analysis has been performed for all four thresholds, validation results will be presented only for 0.5 mm and 3 mm threshold for the dry spell characteristics. Where appropriate, results for other thresholds, i.e., 1 mm and 2 mm are discussed.

#### 2.2.3.2 Boundary Forcing Errors

In addition to performance errors, the CRCM5\_CanESM2 simulations will have additional errors due to errors in the nesting CanESM2 data since RCMs are strongly influenced by the large-scale circulation from driving GCMs (Christensen et al., 1997). These errors, referred to as boundary forcing errors, are assessed by comparing CRCM5 driven by CanESM2 with CRCM5 driven by ERA-Interim. Reducing boundary forcing errors requires that the GCM provides more realistic boundary values.

#### 2.2.3.3 Added Value

The added value of the RCM is the ability to improve the representation of the regional to local climate compared to the more coarsely resolved global climate models. In other words, RCM can provide additional details for regions with important orography, land-sea contrasts and changes in surface type. The small-scale atmospheric features such as convective cells that are not well represented in the global climate models are better captured in RCMs. The added value is assessed by comparing the CRCM5\_CanESM2 simulation with CanESM2 simulation.

#### 2.2.3.4 Projected changes

The projected changes to dry spell characteristics for two future time slice windows, i.e., 2041–2070 and 2071–2100 are assessed by comparing the future dry spell characteristics with those for the current 1981–2010 period of the CRCM5\_CanESM2 simulation. All figures corresponding to projected changes show absolute changes, i.e.,  $X_f - X_c$ , where  $X_f$  and  $X_c$  are the future and current values of the variable of interest  $X$ . However, reference in terms of percentage changes is also used where required, which is computed as  $(X_f - X_c) /$

$X_c$ . Projected changes are also assessed based on CanESM2 simulation for the same two future periods. For the computation of return levels, using POT, for the current and future 30-year time slices, the values of maximum dry spell durations considered can vary from 30 up to 60. Projected changes for grid points where the return levels of maximum duration of dry spells are found larger than 365 (92) days in the case of annual (seasonal) maximum dry spells for current and/or future climates are masked in grey color. The results related to projected changes are presented only for the 2 mm threshold and other thresholds are discussed as required.

The statistical significance of projected changes to the mean number of dry days and dry spells is assessed using the Student's t-test (Walpole and Myers, 1985) at 95% confidence level, while the nonparametric bootstrap resampling method (Efron and Tibshirani, 1993; GREPHYS, 1996; Khaliq et al., 2009) is used for return levels of maximum dry spell duration. The 95% confidence interval for return levels is calculated as:  $R0 \pm 1.96SE$ , where  $R0$  is the sample return level and  $SE$  is the standard error of the return level estimated using 1000 bootstrap resamples. Such confidence intervals for return levels are calculated for each grid-point for both future and current climates. The statistical significance of the difference between the future and current period values is assessed using these confidence intervals, i.e., the change (positive/negative) is considered significant if these confidence intervals do not overlap.

## 2.3 Results

### 2.3.1 Assessment of Errors and Added Value

#### 2.3.1.1 Performance Errors

As discussed under the methods section, performance errors are assessed by comparing CRCM5\_ERA\_Interim and GPCP for the 1997–2008 period. Figure 2.2a shows the spatial distribution of annual mean number of dry days for the precipitation thresholds of 0.5 mm and 3 mm. GPCP shows minimum values of dry days in the tropics where strong convective precipitation occurs. The lowest values of annual number of dry days in the 120–240 days range is located in the Democratic Republic of Congo, along the South-East coast of Africa and in the mountainous regions of the eastern Madagascar, the East Africa

Highlands and the elevated terrain of Ethiopia and Sudan. The maximum number of dry days are, as expected, in the subtropics where the deserts are located. For northern-most and southern-most parts of Africa, the values of dry days are generally regulated by the passage of mid-latitude fronts (IPCC, 2007). Annually, CRCM5\_ERA\_Interim overestimates the mean number of dry days in the tropics and in the sub-tropics compared to GPCP, while it underestimates along the eastern coast of Africa starting from South Africa and extending to the south of Somalia. As the precipitation threshold increases, the number of dry days increases. For example, in the Central African Republic, the number of dry days in the 180–210 range for 0.5 mm increases to the 210–240 range for the 3 mm threshold. The spatial patterns are more similar at the 2 mm and 3 mm threshold for GPCP and CRCM5\_ERA\_Interim.

The seasonal number of dry days in the tropics changes with the migration of the Inter Tropical Convergence Zone (ITCZ) from its northern most position in boreal summer to its southern position during the austral summer. Figure 2.2b shows that in the boreal summer, GPCP shows a minimum number of dry days to the north of the equator, where it precipitates the most, due to the northerly position of ITCZ during this season. In the sub-tropics, i.e., the regions of Sahara and Kalahari deserts, the values of dry days are found larger. As the threshold is increased from 0.5 mm to 3 mm, the number of dry days increases especially in the ITCZ region; dry days in the 10–25 range at 0.5 mm increase to the 25–40 range at a 3 mm threshold. In the austral summer (Figure 2.2c), GPCP shows minimum values in the ITCZ region, i.e., south of the Equator during this season, and higher values are located in the Sahara desert. For boreal summer, CRCM5\_ERA\_Interim overestimates the number of dry days in the Sahel (Mali, Niger, Chad) compared to GPCP. This is due to the southward bias in the position of the Sahara Heat Low that does not move enough north, which results in a narrower West African Monsoon rainfall band (Hernández-Díaz et al., 2013). For both austral and boreal summers (Figure 2.2b,c), CRCM5\_ERA\_Interim generally underestimates the number of dry days especially in the tropics compared to GPCP. However, Hernández-Díaz et al. (2013) showed that for some regions such as the Gabon, Democratic Republic of Congo and Madagascar, CRCM5 driven by ERA-Interim simulates more realistic precipitation than GPCP. In these regions, GPCP misses the rainfall peak.

The total number of dry spells at 0.5 mm and 3 mm thresholds for

CRCM5\_ERA\_Interim are now compared with GPCP (Figure 2.3a) for the 1997–2008 period. GPCP shows high values of number of dry spells in the tropics where there are many days with precipitation, which leads to several short dry spells. GPCP shows in the subtropics small number of dry spells because of the small number of precipitation days that leads to longer dry spells. High values of the number of dry spells are also seen along the northern coast of the Maghreb (Morocco-Algeria-Tunisia) and the southeast coast of South Africa, particularly at 0.5 mm. Figure 2.3a shows that CRCM5\_ERA\_Interim underestimates the values in the Kalahari desert and in the tropics but overestimates the number of dry spells along the eastern coast of Africa extending from the South of Somalia to the South of Africa and also the Guinean coast of Africa compared to GPCP. In fact, for the south coast of South Africa, CRCM5\_ERA\_Interim shows number of dry spells in the 700–800 range, while GPCP has dry spells in the 400–500 range at 0.5 mm threshold. These results are consistent with the underestimation of the mean number of dry days (Figure 2.2) linked with the model tendency to precipitate more, for instance, frequent change between wet and dry spells in the model simulation. As the threshold increases, the mean number of dry spells decreases.

For the boreal summer (Figure 2.3b), the observed (i.e., GPCP based) maximum number of dry spells are collocated with the position of the ITCZ at around 10°N latitude, while in the austral summer (Figure 2.3c), the observed maximum of number of dry spells shift with the position of the ITCZ to around 10°S latitude. For the boreal summer, CRCM5\_ERA\_Interim represents the narrow rain belt in the tropics reasonably well. At 0.5 mm and 3 mm thresholds, CRCM5\_ERA\_Interim overestimates the mean number of dry spells along the eastern coast of Africa extending from South of Somalia to South Africa. In the tropics, CRCM5\_ERA\_Interim generally overestimates the mean number of dry spells. Annually and seasonally, CRCM5\_ERA\_Interim agrees better with GPCP with maximum values located in the Democratic Republic of Congo and lower values in the desert regions (Sahara and Kalahari).

As mentioned earlier, the return levels of maximum annual/seasonal dry spell duration are computed using the POT approach, with  $\lambda$  varying from 1 to 2 (Figure 2.4). Grey colors are used for grid cells where the annual (seasonal) maximum dry spell duration is higher than 365 (92) days. It should be noted that the points that are masked vary for GPCP and model simulations. The GPCP based five-year return levels of annual maximum dry spell

durations have low values in the tropics (where it rains the most), which is consistent with the large number of dry spells of shorter duration for that region. High return values are found in the southern part of Africa in the vicinity of the Kalahari Desert (Angola, Botswana). Eastern Madagascar, East Africa Highlands and the elevated terrains of Ethiopia and Sudan also have low values of dry spell duration since it rains more frequently.

For the five-year return levels of annual maximum dry spell duration (Figure 2.4a), GPCP shows that the values are in the range of 40 consecutive days in the tropical region, while in the subtropics, the values are larger. In general, CRCM5\_ERA\_Interim overestimates the annual maximum dry spell duration compared to GPCP. The differences are larger in both Sahara and Kalahari deserts where CRCM5\_ERA\_Interim has too many consecutive dry days. For boreal summer (Figure 2.4b), CRCM5\_ERA\_Interim overestimates the five-year return level especially in the north of the Democratic Republic of Congo. In fact, CRCM5\_ERA\_Interim shows values in the 50–70 range, while GPCP values are less than 30 at the 3 mm threshold. CRCM5\_ERA\_Interim also overestimates return levels in the Mediterranean region.

In austral summer (Figure 2.4c), CRCM5\_ERA\_Interim overestimates the return levels in the Sahara desert and in the Sahel compared to GPCP. As the threshold increases from 0.5 to 3 mm, the maximum dry spell duration increases. The annual and boreal summer figures for the Guinean coast (near Gabon and Liberia) shows that the difference between the 3 mm and 0.5 mm threshold is very small which means that the daily precipitation rate is often higher than 3 mm threshold.

#### 2.3.1.2 Boundary Forcing Errors

As discussed previously, boundary-forcing errors are assessed by comparing CRCM5\_CanESM2 and CRCM5\_ERA\_Interim simulations. Since precipitation will have a direct influence on the dry spell characteristics, precipitation in CRCM5\_ERA\_Interim and CRCM5\_CanESM2 are first compared. Figure 2.5 shows that the boreal summer (annual) precipitation is larger (smaller) for CRCM5\_CanESM2 compared to CRCM5\_ERA\_Interim for the Guinean coast, but there are a number of other differences in the two experiments. The CRCM5\_CanESM2 is wetter over the north-eastern southern Africa in the annual mean. It is also wetter over sub-tropical southern Africa especially in austral summer. On the other

hand, the CRCM5\_CanESM2 is dryer over north-western equatorial/tropical Africa (notably in Liberia and Sierra Leone) and in Ethiopia, especially in the boreal summer. It was also shown in a previous study of Laprise et al. (2013) that CRCM5\_CanESM2 has difficulties in representing the precipitation over the West African Monsoon region, and that only CRCM5\_ERA\_Interim was able to reproduce the seasonal migration of the West African Monsoon precipitation. The inability of CRCM5\_CanESM2 to well simulate the rainy season in the West African Monsoon is related to the misrepresentation of the seasonal cycle of the GCM-simulated SSTs in the equatorial Atlantic Ocean (Laprise et al., 2013).

The difference between CRCM5\_CanESM2 and CRCM5\_ERA\_Interim simulated dry spell characteristics show that, in general, CRCM5\_CanESM2 has positive boundary forcing errors, i.e., more number of dry days, along the Guinean coast for the annual mean (Figure 2.2a), while for the same region, negative boundary forcing errors are noted for the boreal summer (Figure 2.2b). CRCM5\_CanESM2 has positive boundary forcing errors over the north-eastern southern Africa, while negative errors are noted over the north-western equatorial region in austral summer (Figure 2.2c). For the number of dry spells, CRCM5\_CanESM2 exhibits negative boundary forcing errors, i.e., less number of dry spells in the Guinean coast for the annual mean (Figure 2.3a), while for the same region, CRCM5\_CanESM2 shows positive errors for boreal summer (Figure 2.3b). In austral summer (Figure 2.3c), positive boundary forcing errors over the north-western equatorial region can be seen. For the five-year return levels associated with annual and austral summer maximum dry spell duration (Figure 2.4a,c), CRCM5\_CanESM2 has a positive boundary forcing errors in south central Africa and in the Ethiopian highlands compared to CRCM5\_ERA\_Interim while in boreal summer (Figure 2.4b), positive boundary forcing errors are found for the Horn of Africa and Maghreb regions.

Comparing the lateral boundary forcing errors of the three dry spell characteristics considered here, those associated with the return levels of maximum dry spell duration are larger than those for the mean number of dry days and mean number of dry spells, especially over south central Africa. Comparison of performance errors and lateral boundary errors show that, in general, performance errors associated with the annual and seasonal dry spell characteristics are larger in magnitude compared to the lateral boundary forcing errors, particularly for austral summer.



### 2.3.1.3 Added Value

For many regions over Africa, CRCM5\_CanESM2 improves representation of the dry spell characteristics compared to CanESM2. As an example, for the mean annual number of dry days (Figure 2.2a), CRCM5\_CanESM2 (third column) has more dry days in the tropics compared to CanESM2 (fourth column), and therefore, is in better agreement with GPCP (first column). The CanESM2 daily precipitation rate is relatively high compared to GPCP and CRCM5. The same is observed for the boreal and austral summers. CRCM5\_CanESM2 also represents better the number of dry days and the number of dry spells (Figures 2.2 and 2.3) compared to CanESM2. Thus, CRCM5\_CanESM2 exhibit clear added value compared to CanESM2 for the dry days and the number of dry spells. The added value is less obvious though in the case of return levels (Figure 2.4).

### 2.3.2 Projected changes to Dry Spell Characteristics

In this section, projected changes to dry spell characteristics over Africa for RCP 4.5 scenario are evaluated as differences between the future 2041–2070 and 2071–2100 periods and the current 1981–2010 period of the CRCM5\_CanESM2 simulation. Projected changes are also assessed based on CanESM2 simulation. It should be noted that the projected changes are presented as absolute differences. However, reference in terms of percentage changes are used where appropriate. Here, the results of projected changes are presented for the 2 mm threshold. Where relevant, results for other thresholds are discussed.

Figure 2.6 shows projected changes to the mean annual number of dry days as simulated by CRCM5\_CanESM2 and CanESM2 at 2 mm threshold. CRCM5\_CanESM2 and CanESM2 show some significant increases, according to the t-test at 95% confidence level for the tropics, with the absolute changes increasing from 2041–2070 to 2071–2100. For CRCM5\_CanESM2, in relative terms, the number of dry days increases by 0–30% (0–45%) for the future 2041–2070 (2071–2100) period. The spatial extent of the region with significant increase in the tropics is much larger for CanESM2 compared to CRCM5\_CanESM2. For the Horn of Africa, CanESM2 shows scattered significant decreases for the 2041–2070 period, which is also visible for the 2071–2100 period; no significant changes are noted for the region in CRCM5\_CanESM2. Conflicting climate change signal can be noticed for more regions. As an example, in some parts of the Maghreb (Tunisia,

Algeria, Morocco, Libya), CRCM5\_CanESM2 shows a significant increase, while CanESM2 shows a significant decrease for the 2071–2100 period.

Significant increase in the mean number of dry days for the boreal summer (Figure 2.7) is noted for some regions of the tropics for CRCM5\_CanESM2, especially in the western parts of the tropics where the increase is around 60% (16–24 range in terms of absolute change) by the end of the 21st century. Significant increases in dry days for the tropics are also shown by CanESM2 and the magnitude of changes increases from the 2041–2070 period to the 2071–2100 period. CRCM5\_CanESM2 shows significant decrease in dry days in the Sahel and in the eastern part of South Africa. Though not significant, CRCM5\_CanESM2 suggests some increases in the mean number of dry days in the Sahara and Kalahari deserts, while CanESM2 shows a decrease in the number of dry days where the Heat Low (near Algeria) is located.

For austral summer (Figure 2.8), CRCM5\_CanESM2 shows a significant increase in the mean number of dry days in the central tropics while some decrease is projected for the Horn of Africa, particularly for the 2071–2100 period. CanESM2 shows a significant increase in the central tropics for the 2041–2070 period followed by a significant decrease for the 2071–2100 period. For the western tropics region, CanESM2 shows a decrease in the dry days while CRCM5\_CanESM2 shows an increase for the 2071–2100 period. Analysis of the soil moisture and precipitation fields for this region (figure not shown) indicate that, though precipitation and soil moisture are larger in CanESM2 compared to CRCM5\_CanESM2, CanESM2 shows an increasing tendency in precipitation and soil moisture for the 2071–2100 period, while CRCM5\_CanESM2 shows a clear decrease in precipitation and a non-significant decrease in soil moisture. The above appear to be responsible for the conflicting climate change signal in CRCM5\_CanESM2 and CanESM2. However, CanESM2 is in agreement with CRCM5\_CanESM2 for the central eastern part of Africa where significant decreases are projected for the 2041–2070 and 2071–2100 period.

Figure 2.9 shows projected changes to annual mean number of dry spells as simulated by CRCM5\_CanESM2 and CanESM2 at 2 mm threshold. CRCM5\_CanESM2 projects significant decreases in the annual mean number of dry spells from current to future for parts of the tropics and for the Maghreb. This decrease is consistent with the increase in the number of dry days that can lead to longer dry spells. On the other hand, CanESM2

shows significant increases and decreases in the tropics and a decrease in the south part of Africa (Namibia, Angola, Botswana, Zimbabwe, Zambia, Mozambique, South Africa, Lesotho, Swaziland). For the Horn of Africa, CanESM2 shows general significant decreases in the mean number of dry spells for the 2041–2070 period, followed by mostly significant increases for the 2071–2100 period. This is less evident in CRCM5\_CanESM2 simulation. However, CanESM2 projection of the mean annual number of dry spells agrees with CRCM5\_CanESM2 projection for the regions of South Africa and Horn of Africa at 2 mm threshold.

The contradictory climate signal for the tropics for CanESM2 and CRCM5\_CanESM2 over the tropical region can also be due to the fact that daily precipitation in CanESM2 is often higher than 2 mm/day and therefore do not represent adequately dry spell characteristics at lower precipitation thresholds. The annual precipitation intensity for the 1981–2010 period vary spatially between 4 and 10 mm/day for CanESM2 in the tropics (figure not shown). Some preliminary analysis at 5 mm precipitation threshold revealed that both CanESM2 and CRCM5\_CanESM2 project decreases in the mean number of dry spells for the 2041–2070 and 2071–2100 period (figure not shown).

For the boreal summer (Figure 2.10), CRCM5\_CanESM2 shows a decrease in the number of dry spells along the east coast starting from Somalia and extending to the South of Mozambique. The magnitude of the changes lies between –25% to –50% for the 2041–2070 period and between –50% to –75% for the 2071–2100 periods. However, CRCM5\_CanESM2 and CanESM2 show important differences for the tropics, the Sahel and the Maghreb regions. For the tropics, CRCM5\_CanESM2 shows a general significant decrease with spotted increase while the CanESM2 shows mostly an increase. As discussed previously, CanESM2 has a higher daily precipitation rate and the choice of 5 mm and 10 mm thresholds (figure not shown) shows better agreement.

For the austral summer (Figure 2.11), CRCM5\_CanESM2 shows a general significant decrease in the central part of Africa and in the Maghreb regions for the 2041–2070 and 2071–2100 period. A scattered significant increase in the mean number of dry spells can be noted in the Horn of Africa (Ethiopia, Somalia). For CanESM2, however, projected changes are in general not significant at 95% confidence level.

Figure 2.12 shows projected changes to the five-year return levels of the annual

maximum dry spell duration at 2 mm threshold. The value of  $\lambda$  for a given grid-cell is constant in current and future climates. As discussed in the methodology, the return levels are computed using the GPD distribution. The statistical significance is assessed using the Bootstrap method at 95% confidence level. For CRCM5\_CanESM2, the Sahara desert is masked (grey color in the figures) since most of the sampled maximum dry spell durations are equal to 365 days and therefore the calculation of the return levels cannot be performed satisfactorily. CRCM5\_CanESM2 shows scattered significant increase in the tropics and along the east coast starting from Somalia and extending to the South of Mozambique. CRCM5\_CanESM2 shows also significant increases in the northern part of the Maghreb, with absolute change in the 45–60 range for both periods. CanESM2 shows significant increases over a relatively large area in the tropics with absolute changes in the 15–30 range, for the 2041–2070 period, but is considerably reduced in extent for the 2071–2100 period.

Figure 2.13 shows the 5-year return levels of the maximum dry spell duration for the boreal summer for the current period and their projected changes at 2 mm threshold. Notice here that both deserts (Sahara and Kalahari) are masked (grey color) for the same reason as mentioned previously. Here, calculation of return levels were not performed for some grid points along the Equator for CanESM2, for the boreal and austral summers since the daily precipitation rate is often greater than 2 mm/day which leads to insufficient number of values of maximum dry spell duration. Very few points show significant changes to 5-year return levels in boreal summer in future climate for CRCM5\_CanESM2 and CanESM2. CRCM5\_CanESM2 shows a scattered significant increase in the 5-year return levels of maximum dry spell duration in the tropics for the two future periods. CanESM2 shows significant increases to the south-west of the Sahel for the 2041–2070 period, with absolute changes in the 5 to 15 range.

For the austral summer (Figure 2.14), significant increases in parts of the tropics are projected by CRCM5\_CanESM2 for the future climate, with increasing magnitude from 2041–2070 to 2071–2100 period. An increase of the maximum dry spell duration is also seen in the north-eastern part of Maghreb region with a magnitude of 15 to 30% (15–20 range in terms of absolute change). No significant changes are noted for CanESM2. The results for 0.5 mm, 1 mm, and 3 mm thresholds are in general similar to those for 2 mm threshold.

## 2.4 Discussion and conclusions

In this study, we present an evaluation of errors—i.e., performance and lateral boundary forcing errors—of selected dry spell characteristics over Africa as simulated by CRCM5 for different precipitation thresholds used to define a dry day. Also presented are the added value and projected changes to dry spell characteristics. The annual/seasonal dry spell characteristics considered are the mean number of dry days, mean number of dry spells and the five-year return level of the maximum dry spell duration. Performance errors are assessed by comparing the ERA-Interim driven simulation (CRCM5\_ERA\_Interim) with GPCP for the current 1997–2008 period. Boundary forcing errors are assessed by comparing the CanESM2 driven CRCM5 simulation (CRCM5\_CanESM2) with CRCM5\_ERA\_Interim and finally added value of the RCM is assessed by comparing CRCM5\_CanESM2 with CanESM2. The projected changes to dry spell characteristics for two future time slice windows, 2041–2070 and 2071–2100, corresponding to RCP 4.5 scenario, are then assessed by comparing the future characteristics with those for the current 1981–2010 period for both CRCM5\_CanESM2 and CanESM2. A summary of the main results follows:

- The ability of CRCM5 in simulating dry spell characteristics in current climate is evaluated prior to the assessment of projected changes. The results for the various precipitation thresholds were similar (0.5 mm, 1 mm, 2 mm and 3 mm). Results suggest that the annual (seasonal) numbers of dry days are generally overestimated (underestimated) by CRCM5\_ERA\_Interim, i.e., positive (negative) performance errors, particularly for North Equatorial Central Africa and Central Southern Africa regions, compared to GPCP. This overestimation in the annual mean number of dry days decreases with increasing precipitation thresholds. Consistent with these results, the annual (seasonal) number of dry spells are underestimated (overestimated) by CRCM5\_ERA\_Interim over the same regions. The five-year return levels of annual and seasonal maximum dry spell duration computed using the POT approach is generally overestimated by CRCM5\_ERA\_Interim.
- Results suggest that, in general, the performance errors are larger than the lateral boundary forcing errors. Performance errors can be reduced by further improving the representation of processes in the model such as convection, land-atmospheric

interactions, West African Monsoon (WAM), while reduction of lateral boundary forcing errors require improved quality of the GCM data used as boundary conditions. CRCM5 reproduces the West African Monsoon, but fails to bring the precipitation far enough north into Sahel due to a weaker monsoonal flow associated with a cold bias in the Sahara as was also reported in Hernández-Díaz et al. (2012). This is the reason for the overestimation of dry days in that region. As for the tropics, it was noted that the soil moisture is generally underestimated in the model due to increased drainage in comparison with the Global Land Data Assimilation System (GLDAS) (Rodell et al., 2004) database, which leads to less evaporation and therefore, a reduced number of precipitation days. Thus, better representation of land-surface processes is important as was pointed out by Taylor et al. (2011) in their study over West Africa.

- The added value analysis showed that for many regions in Africa, CRCM5\_CanESM2 improves local representation of the dry spell characteristics compared to CanESM2. In fact, CRCM5 driven by CanESM2 provides realistic spatial detail in the tropics since the regional model is able to capture the convection cells in the monsoon region more realistically, which is the main source of precipitation, due to its higher resolution compared to CanESM2.
- Analysis of the projected changes to dry spell characteristics revealed, that annually and seasonally in the tropics, CRCM5\_CanESM2 shows significant increases in the number of dry days and in the five-year return levels of maximum dry spell durations. Analysis also showed significant decreases in the number of dry spells for the 2041–2070 and 2071–2100 periods. In other words, dry spells of longer durations can be expected in future climate with increasing magnitude from 2041–2070 to 2071–2100. For both periods, CanESM2 projections are similar to that of CRCM5\_CanESM2 for the annual number of dry days and five-year return levels of annual maximum dry spell duration. However, conflicting climate change signal can be noted for the number of dry spells for the annual and boreal summer, where CRCM5\_CanESM2 shows a significant increase while CanESM2 shows a significant decrease. This difference can partly be explained by the fact that CanESM2 is unable to reproduce the dry spell characteristics at lower precipitation thresholds.

- Projected changes to dry spell characteristics for the Horn of Africa are in general not found to be significant. However, CRCM5\_CanESM2 shows some significant increase in the number of dry spells for boreal summer for the 2071–2100 periods. Similarly, for the Sahel region, projected changes to dry spell characteristics are not found significant, except for some significant decreases in the number of dry days for the boreal summer for the 2041–2070 and 2071–2100 periods for CRCM5\_CanESM2.

Though the return levels presented in this study corresponds to the five-year return level period, many impact and adaptation studies would require information about higher return period. Analysis of projected changes to 10-, 20- and 30-year return levels (not shown) suggest increases for some parts of the tropics and in the south eastern part of Africa. The magnitude of absolute changes between the future period and the current climate increases with increasing return periods.

Changes in dry spell characteristics will have direct impact on climate sensitive sectors such as agriculture. More wet days combined with shorter dry spell duration during the growing season could be beneficial to the agriculture sector for regions such as the Horn of Africa and for some part of the Sahel for the 2071–2100 period. On the contrary, an increase in the number of dry days and in the maximum dry spell duration combined with less number of dry spells, but of longer duration, could affect agriculture adversely in the tropics and in the North of Africa.

In this study, the precipitation thresholds were selected subjectively following previous studies for other parts of the world. For practical applications, one would need to pick other thresholds. For example, for the tropics, evaporation is higher and therefore higher thresholds are desirable, as in Mupangwa et al. (2011), where a 4.95 mm threshold was used to calculate the dry days for the agriculture season since the observed daily evaporation is between 5 mm/day to 8 mm/day.

It should also be noted that a dry spell is defined as at least one day with precipitation below the selected threshold. However, for some applications, it might be desirable to redefine this. For instance, Cook et al. (2004) used a five-day consecutive period with precipitation below predefined threshold to define the dry spell.

This study relies on a single RCM driven by a single GCM for current and future periods. Multi-model ensembles are desirable to obtain more robust climate change signal. This will partly be fulfilled with the CORDEX project that will provide this multi-GCM, multi-RCM and multi-scenario outputs (Nikulin et al., 2012).

#### Acknowledgements

This research was funded by the Ministère du Développement Économique, de l'Innovation et de l'Exportation (MDEIE) of Quebec and the Ouranos Consortium on regional climatology and adaptation to climate change.



## FIGURES

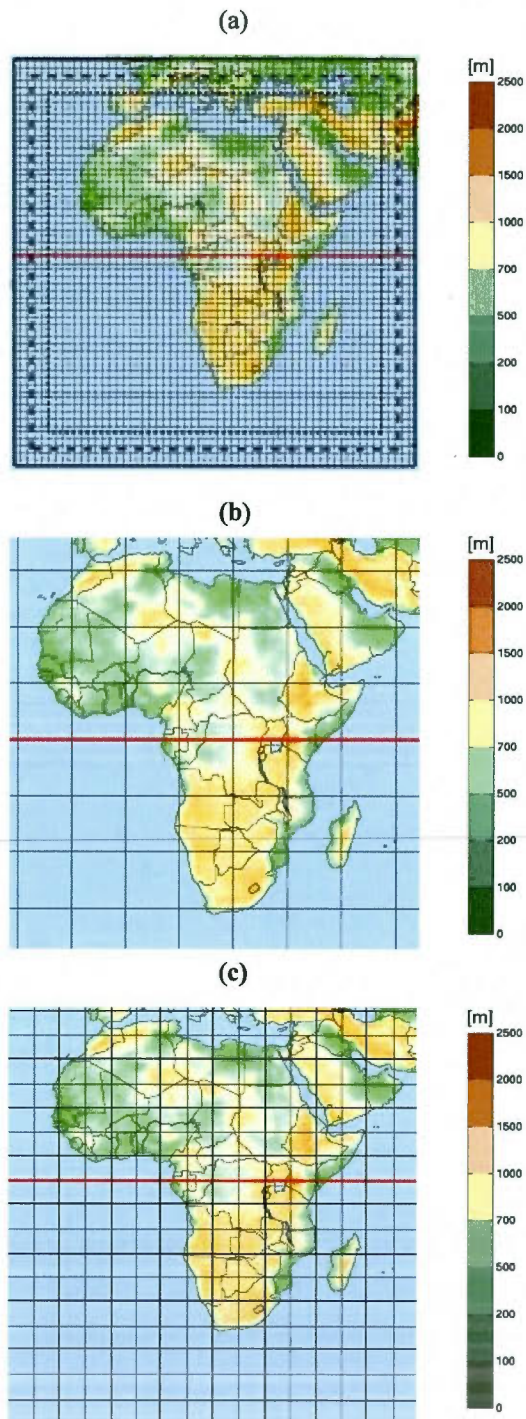


Figure 2.1: African simulation domain for (a) CRCM5 at  $0.44^\circ$  horizontal resolution, with only every 5th grid box displayed. The dashed lines represent the 10 grid-point nesting zone and the dotted line represents the domain of interest. The (b) Canadian Earth System Model (CanESM2) grid at  $2.81^\circ$  horizontal resolution and (c) Global Precipitation Climatology Project (GPCP) grid at  $1^\circ$  horizontal resolution is also shown. The red horizontal line represents the equator.

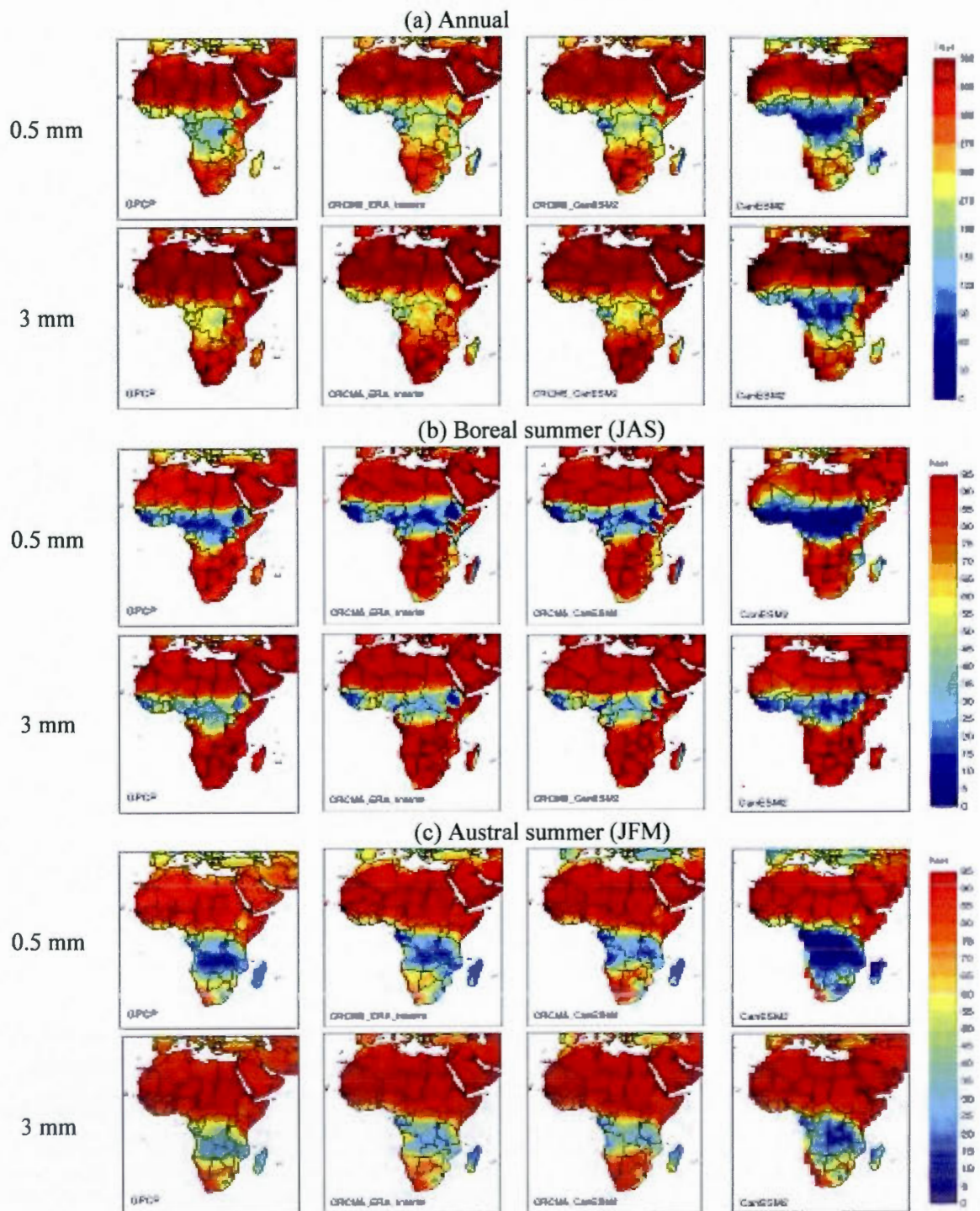


Figure 2.2: Number of dry days at 0.5 mm (top) and 3 mm (bottom) thresholds for the (a) annual, (b) boreal summer (JAS) and (c) austral summer (JFM) for CRCM5 driven by ERA-Interim (middle left) and CanESM2 (middle right), CanESM2 (extreme right) and GPCP (extreme left), for the 1997–2008 period.

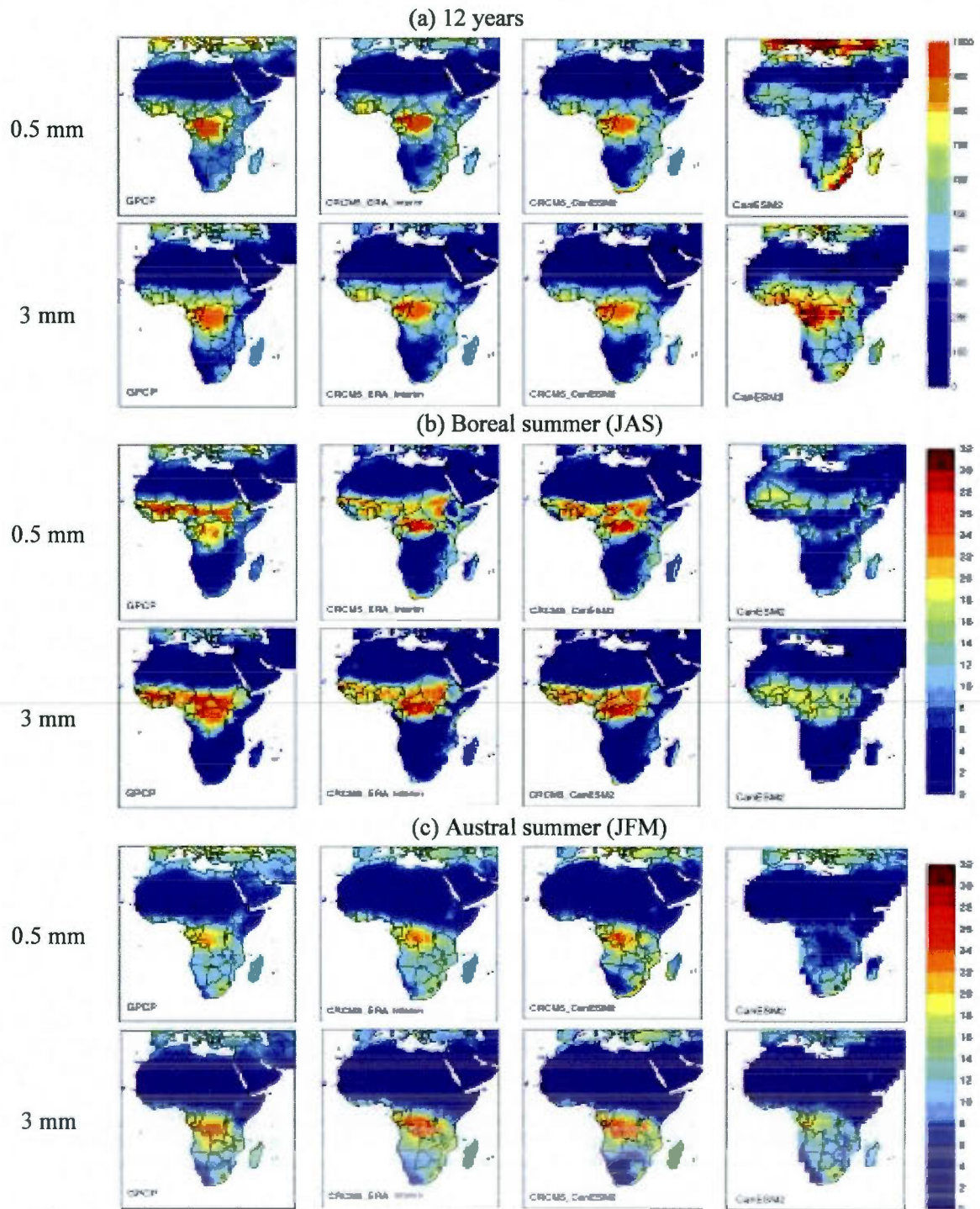


Figure 2.3: Number of dry spells at 0.5 mm (top) and 3 mm (bottom) thresholds for the (a) total 12 years, (b) boreal summer and (c) austral summer period for CRCM5 driven by ERA-Interim (middle left), and CanESM2 (middle right), CanESM2 (extreme right) and GPCP (extreme left), for the 1997–2008 period.

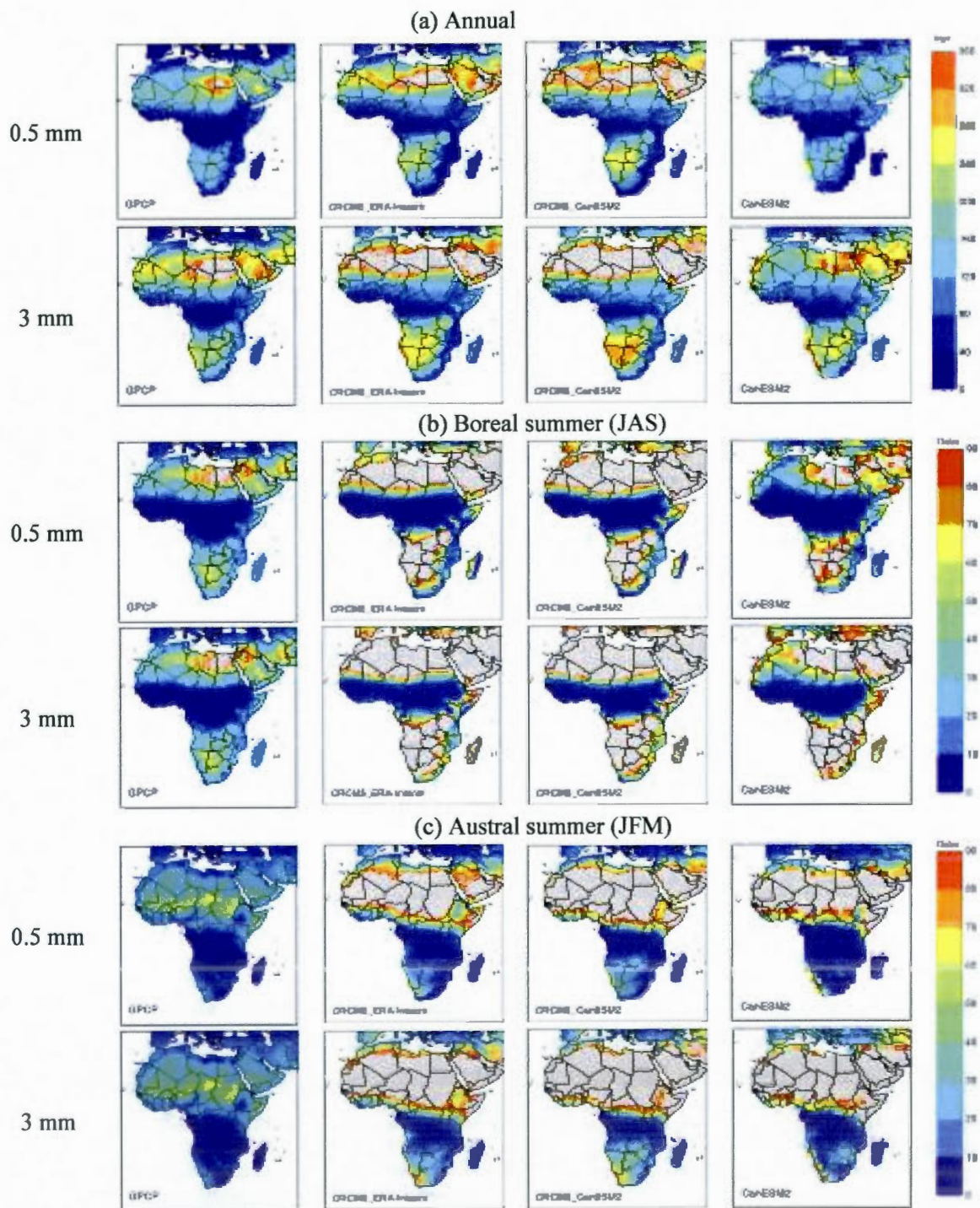


Figure 2.4: Same as Figure 2.2, but for the five-year return levels of the maximum dry spell duration. The grid points are masked in grey color where the return levels are larger than 365 days in the case of (a), and 92 days in the cases of (b) and (c).

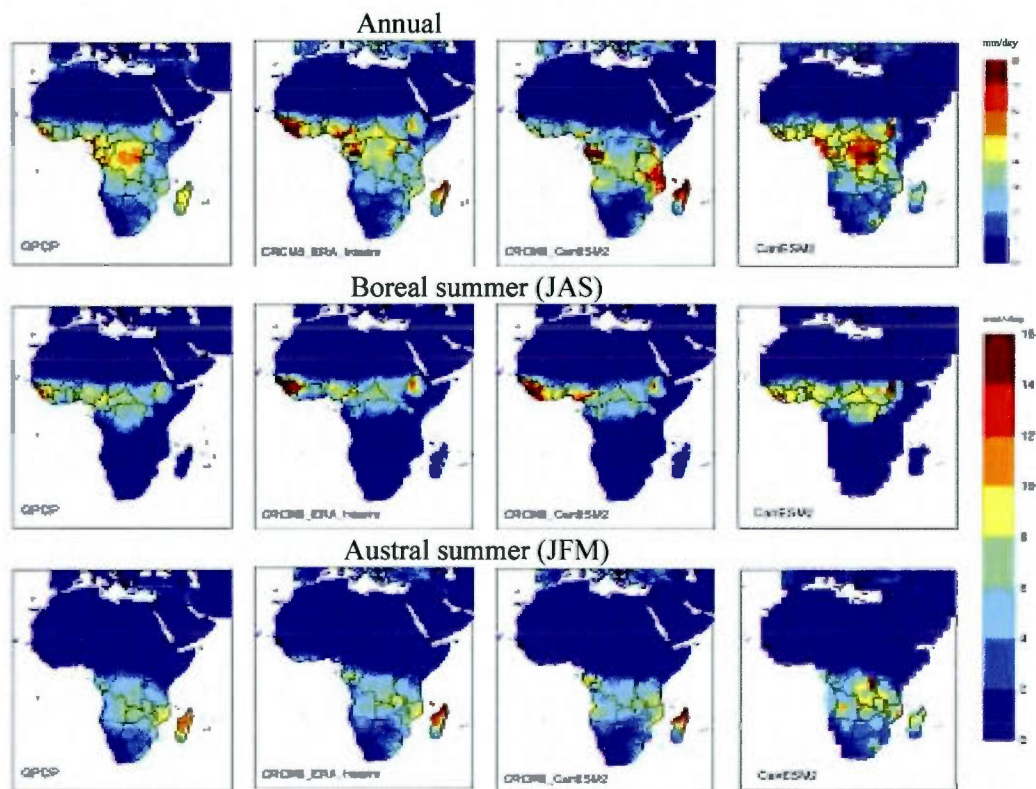


Figure 2.5: Annual (top row), boreal (middle row) and austral (bottom row) summer mean (1997–2008) precipitation for GPCP (extreme left), CRCM5 driven by ERA-Interim (middle left), CRCM5 driven by CanESM2 (middle right) and CanESM2 (extreme right) for the 1997–2008 period.

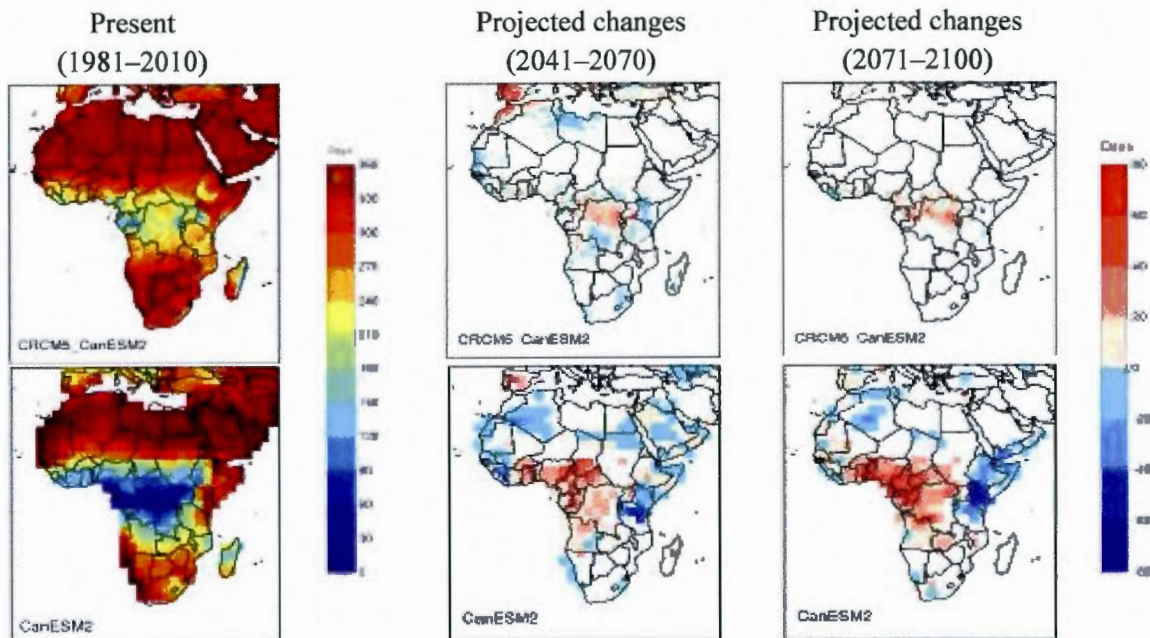


Figure 2.6: Annual mean number of dry days as simulated by CRCM5 driven by CanESM2 (top panel) and CanESM2 (bottom panel) for the present (1981–2010; left column) and the corresponding projected changes for the 2041–2070 (middle column) and the 2071–2100 (right column) periods for RCP 4.5 scenario for 2 mm threshold. Grid cells where projected changes are not statistically significant at 95% confidence level are shown in white.

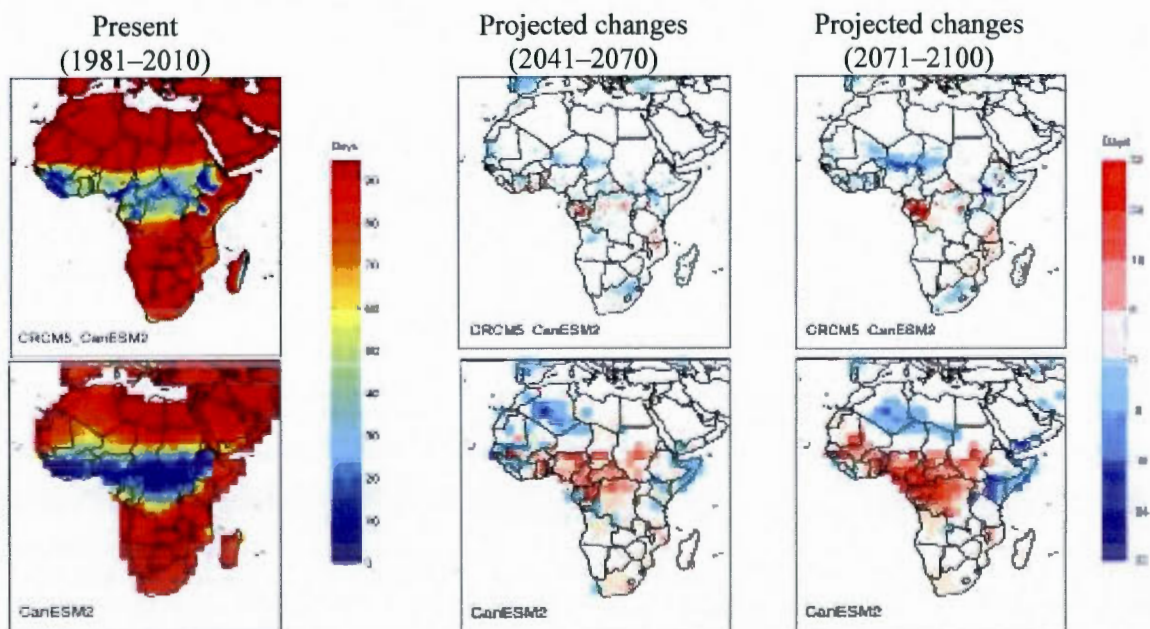


Figure 2.7: Same as Figure 2.6, but for the mean number of dry days for boreal summer.

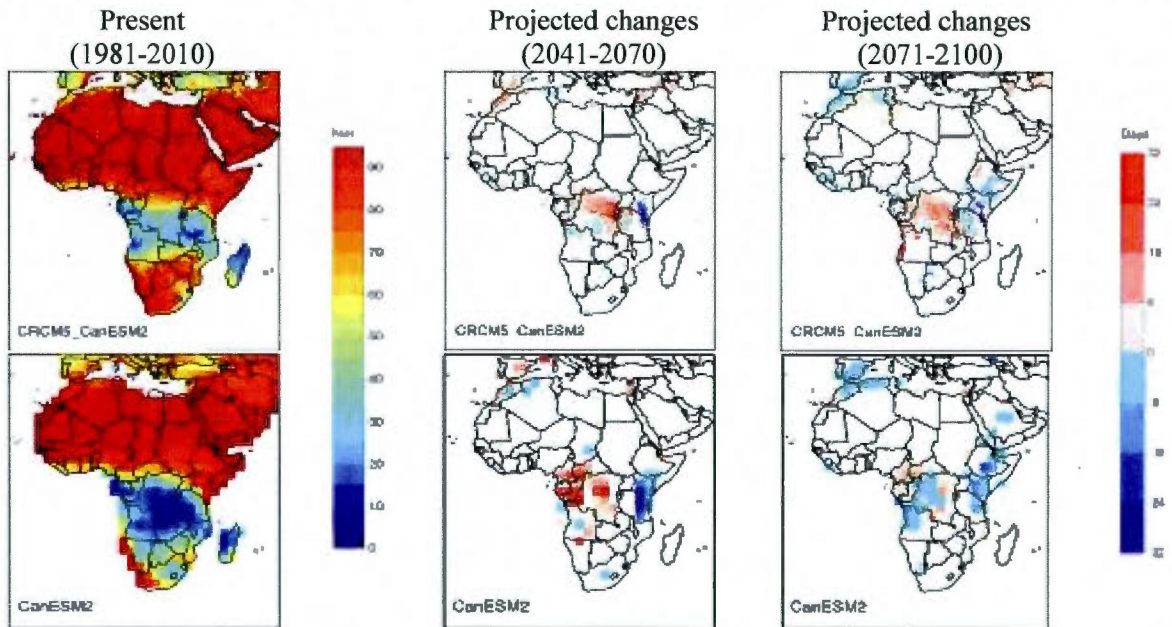


Figure 2.8: Same as Figure 2.6, but for the mean number of dry days for austral summer.

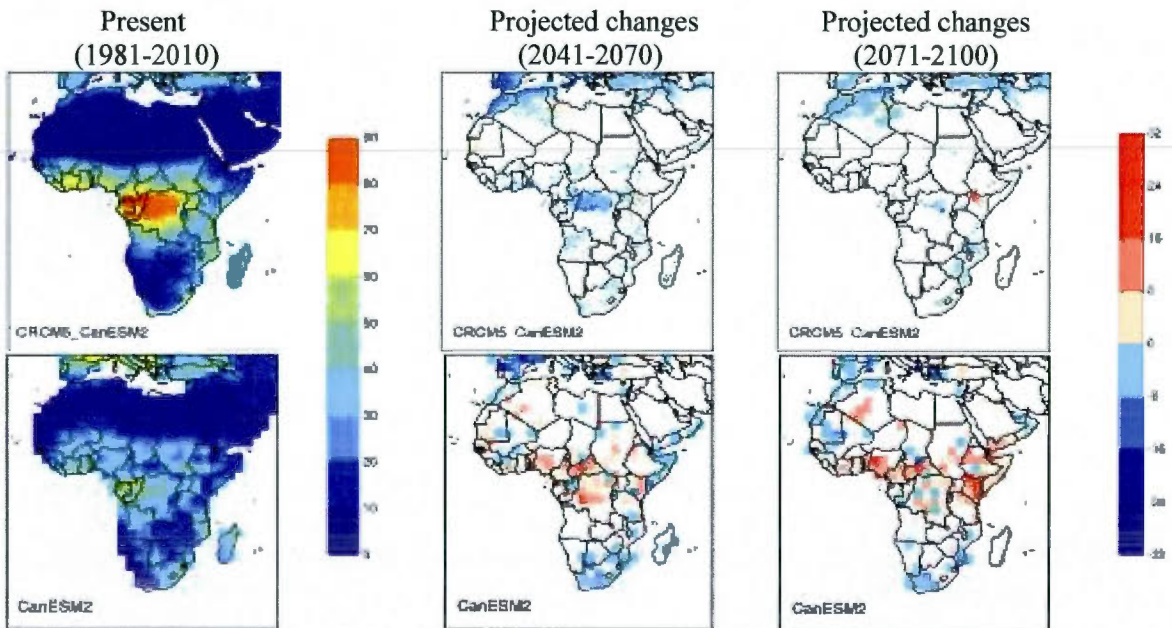


Figure 2.9: Same as Figure 2.6, but for the annual mean number of dry spells.



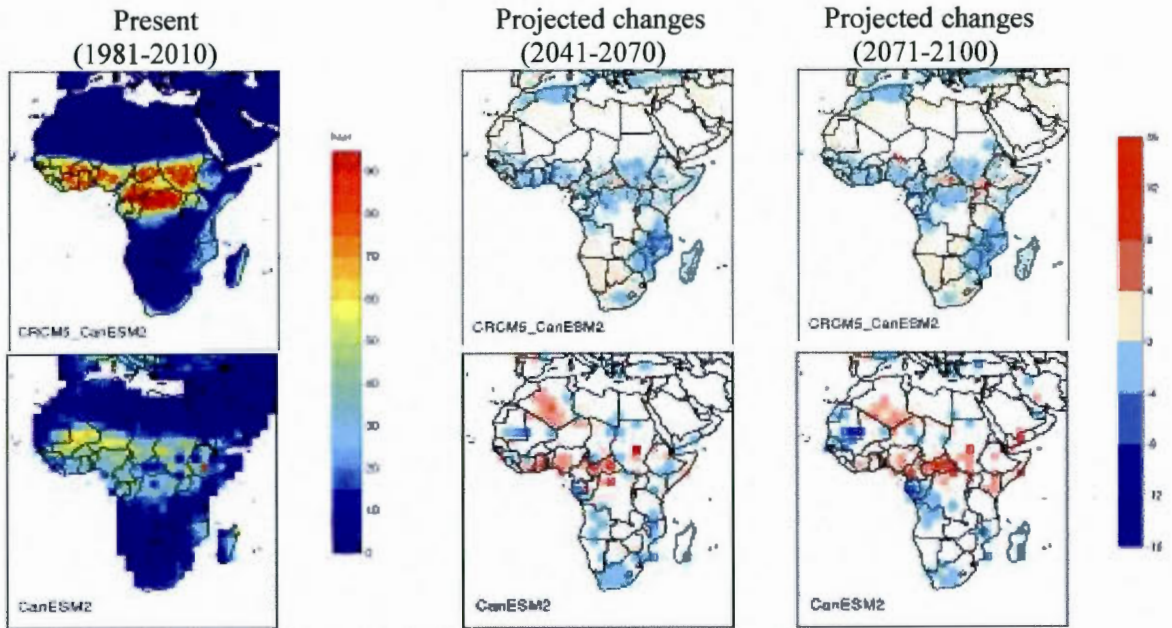


Figure 2.10: Same as Figure 2.6, but for the mean number of dry spells for boreal summer.

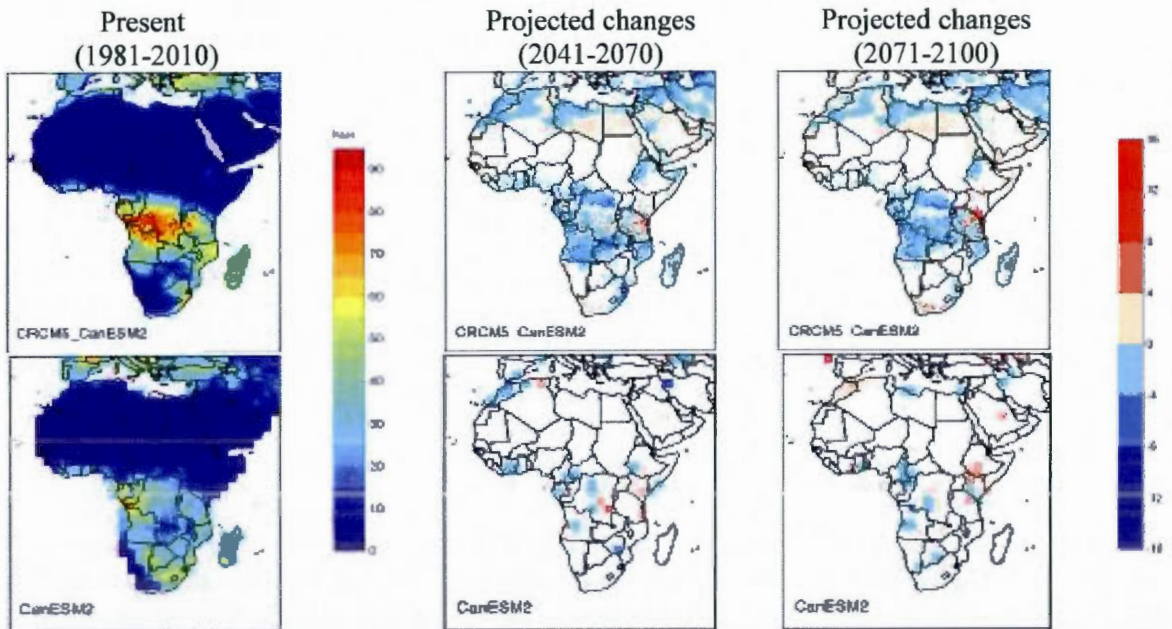


Figure 2.11: Same as Figure 2.6, but for the mean number of dry spells for austral summer.

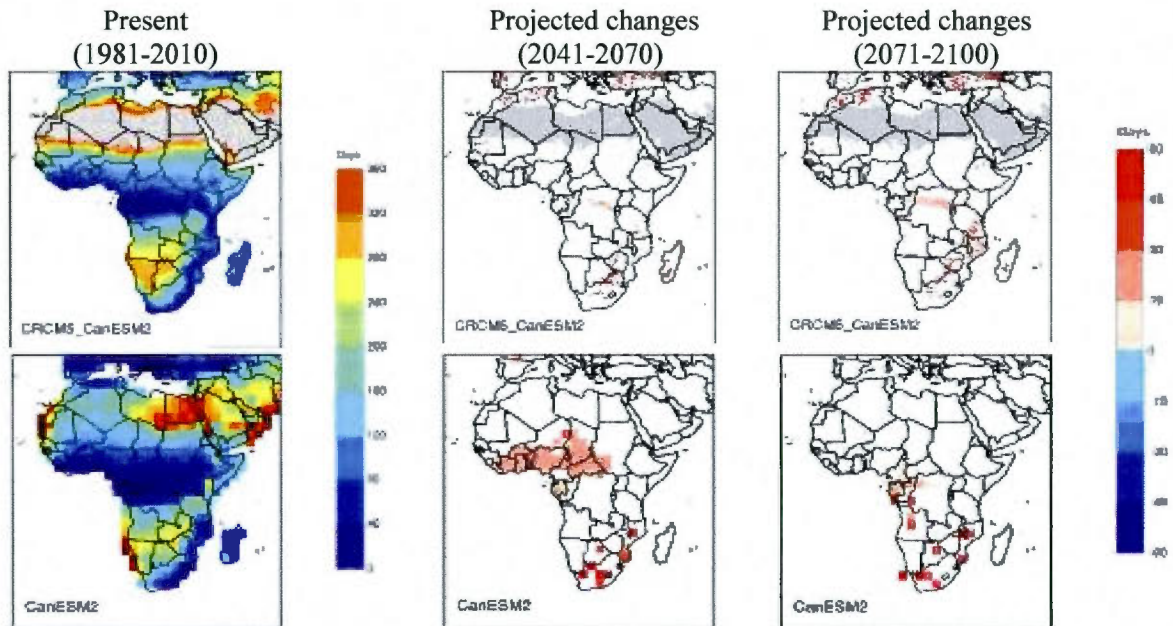


Figure 2.12: Same as Figure 2.6, but for the five-year return level of the annual maximum dry spell duration. The grid points where the return levels are larger than 365 days are masked in grey color.

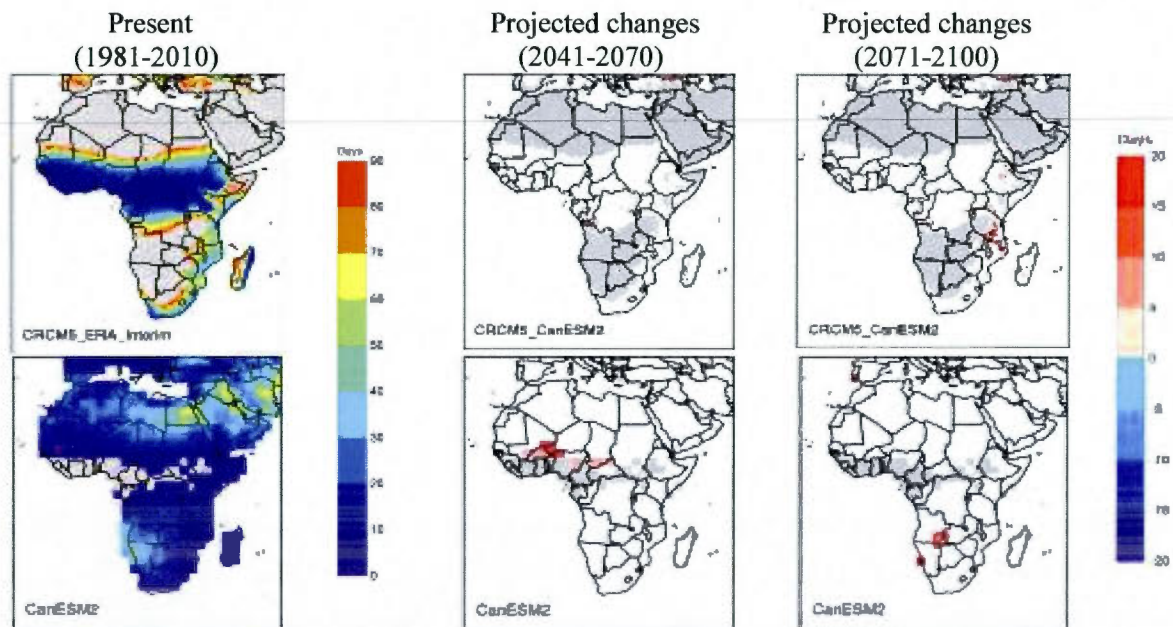


Figure 2.13: Same as Figure 2.6, but for the five-year return level of the boreal summer maximum dry spell duration. The grid points where the return levels are larger than 92 days or where return levels were not computed due to insufficient values of maximum dry spell duration are masked in grey color.

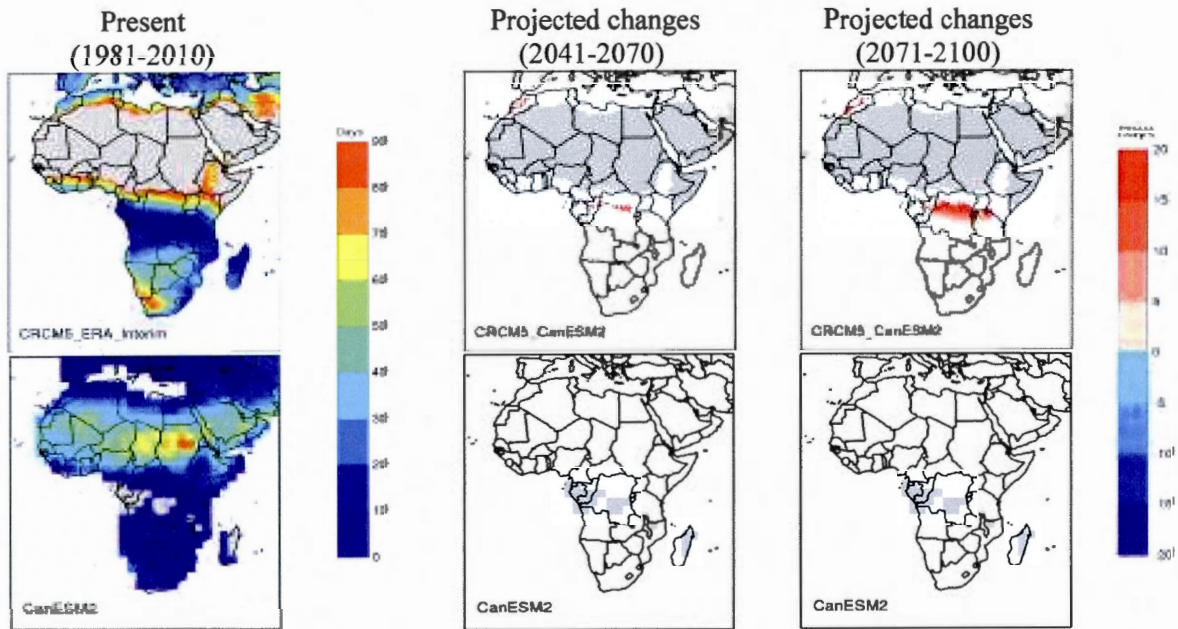


Figure 2.14: Same as Figure 2.13, but for the austral summer maximum dry spell duration.



## CHAPITRE III

### CONCLUSION

En résumé, cette étude a présenté l'habilité du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC5) à simuler les différentes caractéristiques de périodes de sécheresse pour le climat présent ainsi que pour les changements appréhendés sur le domaine de l'Afrique. Ces caractéristiques incluent le nombre de jours secs, le nombre de périodes de sécheresse ainsi que le maximum de jours consécutifs sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans pour les seuils de 0.5 mm, 1 mm, 2 mm et 3 mm. Cette analyse a été réalisée de façon annuelle ainsi que saisonnière pour les saisons boréales et australes. Dans un premier temps, l'étude du climat présent (1997-2008) a été faite en calculant les erreurs dues aux performances des modèles, celles dues aux conditions aux frontières et en effectuant une analyse de la valeur ajoutée. Dans un deuxième temps, les changements appréhendés ont été évalués en comparant deux périodes futures (2041-2070 et 2071-2100) au climat présent (1981-2010).

Les différentes caractéristiques de périodes de sécheresse ont été simulées à partir de données de précipitation journalière fournies par le modèle régional, global ainsi que ceux des analyses du GPCP. Le nombre de jours secs ainsi que le maximum de jours consécutifs sans précipitation ont été représentés en termes de moyenne annuelle alors que le nombre de périodes de sécheresse a été calculé sur les 12 ans de simulations pour le climat présent. Le calcul des événements de récurrence de 5 ans a été faite en utilisant la méthode du Peak-Over-Threshold (POT).

L'habilité du modèle régional à évaluer les différentes caractéristiques de périodes de sécheresse est faite en évaluant l'erreur de performance. Pour ce faire, le modèle régional piloté par ERA-Interim a été comparé avec les analyses du GPCP pour les seuils de 0.5 mm, 1 mm, 2 mm ainsi que 3 mm. Les résultats montrent que le MRCC5 a tendance à surestimer la moyenne annuelle et la moyenne saisonnière en été boréal pour le nombre de jours secs particulièrement pour les régions proche de l'Afrique centrale. Cette surestimation diminue avec l'augmentation des seuils de précipitation utilisés. Conséquent avec les résultats mentionnés, une légère sous-estimation du nombre de périodes de sécheresse est simulée par le MRCC5 sur ces mêmes régions. Le maximum de jours consécutifs sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans est généralement surestimé par le MRCC5 comparé aux analyses du GPCP.

L'erreur due aux conditions aux frontières des différentes caractéristiques annuelles et saisonnières de précipitation a été évaluée en comparant le MRCC5 piloté par ERA-Interim avec le MRCC5 piloté par CanESM2. Les résultats montrent que le MRCC5 piloté par CanESM2 a tendance à surestimer la précipitation le long de la côte guinéenne en été boréale. En été austral, cette même simulation a plus de précipitation le long de la côte Ouest central africaine alors que les précipitations sont un peu moins importantes le long de la côte Sud-Est africaine. Ces changements en termes de précipitation saisonnière auront un impact direct sur les différentes caractéristiques de périodes de sécheresse. En effet, une plus grande quantité de précipitation engendrera moins de jours secs, un plus grand nombre de périodes de sécheresse ainsi que moins de maximum de jours consécutifs sans précipitation. Les résultats montrent également que de façon générale, les erreurs dues aux performances sont plus importantes que les erreurs dues aux conditions aux frontières. Cette différence est particulièrement plus importante en été austral.

Dans le cadre de l'évaluation de la valeur ajoutée, le MRCC5 piloté par CanESM2 est comparé au CanESM2 pour les différentes caractéristiques de périodes de sécheresse. On constate que pour plusieurs régions d'Afrique, le modèle régional améliore la représentation du climat local. En effet, dans les régions équatoriales, le MRCC5 simule mieux les minimums de nombre de jours secs, puisque celui-ci, dû à sa meilleure résolution, est en

mesure de capter les cellules convectives générant la précipitation dans ces régions. Le MRCC5 représente également de façon plus réaliste les différentes caractéristiques de périodes de sécheresse en terrain montagneux (la côte Est du Madagascar, les terrains élevés de l'Éthiopie et du Soudan) comparativement au modèle global. D'autre part, due à sa résolution plus grossière, le modèle global ne représente pas bien le nombre de jours secs ainsi que le nombre de périodes de sécheresse dans les régions équatoriales. En effet, on constate que le minimum de jours secs est largement sous-estimé alors que le nombre de périodes de sécheresse est surestimé.

En ce qui concerne les changements appréhendés, le modèle régional piloté par le modèle global et le modèle global ont simulé les différentes caractéristiques de périodes de sécheresse pour le climat futur (2041-2070 et 2071-2100) en comparaison avec le climat présent (1981-2010). Les résultats montrent des augmentations statistiquement significatives pour la moyenne annuelle et saisonnière du nombre de jours secs ainsi que le nombre de jours consécutifs sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans pour les deux modèles dans les régions équatoriales. En d'autres mots, les résultats suggèrent des périodes de sécheresse qui seront plus longues et encore plus intenses pour la période allant de 2071 jusqu'en 2100.

Pour la région de la Corne africaine, les changements appréhendés pour différentes caractéristiques de périodes de sécheresse montrent qu'en général les changements ne sont pas statistiquement significatifs. Par contre, le MRCC5 piloté par CanESM2 montre une augmentation significative du nombre de périodes de sécheresse en été boréal et ce, pour les deux périodes futures à l'étude. De même pour le Sahel, bien que les résultats soient généralement non significatifs, on constate une diminution significative du nombre de jours secs en été boréal pour les deux périodes futures.

Cette étude montre les résultats associés au maximum de jour consécutif sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans, toutefois pour des études d'impacts et d'adaptation, l'utilisation d'événement de récurrence plus élevée pourrait être plus appropriée. Des études préliminaires associées à des événements de récurrences de 10, 20 et 30 ans ont montrées des augmentations significatives pour certaines régions de l'Afrique

centrale ainsi que pour la partie du Sud-Est de l'Afrique. Ces augmentations deviennent plus importantes lorsque l'événement de récurrence augmente.

Les changements appréhendés des différentes caractéristiques des périodes de sécheresse auront un effet notable sur l'agriculture. En effet, l'augmentation du nombre de jours de pluie combinée à la diminution du nombre de périodes de sécheresse prévu par le MRCC5 pourraient être bénéfique pour certaines régions de l'Afrique telles que la Corne africaine et la partie Est du Sahel. D'autre part, une augmentation du nombre de jours secs ainsi que du maximum de jours consécutifs sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans, combinée à une diminution du nombre de périodes de sécheresse, pourraient être néfaste pour les différentes cultures notamment dans les régions équatoriales.

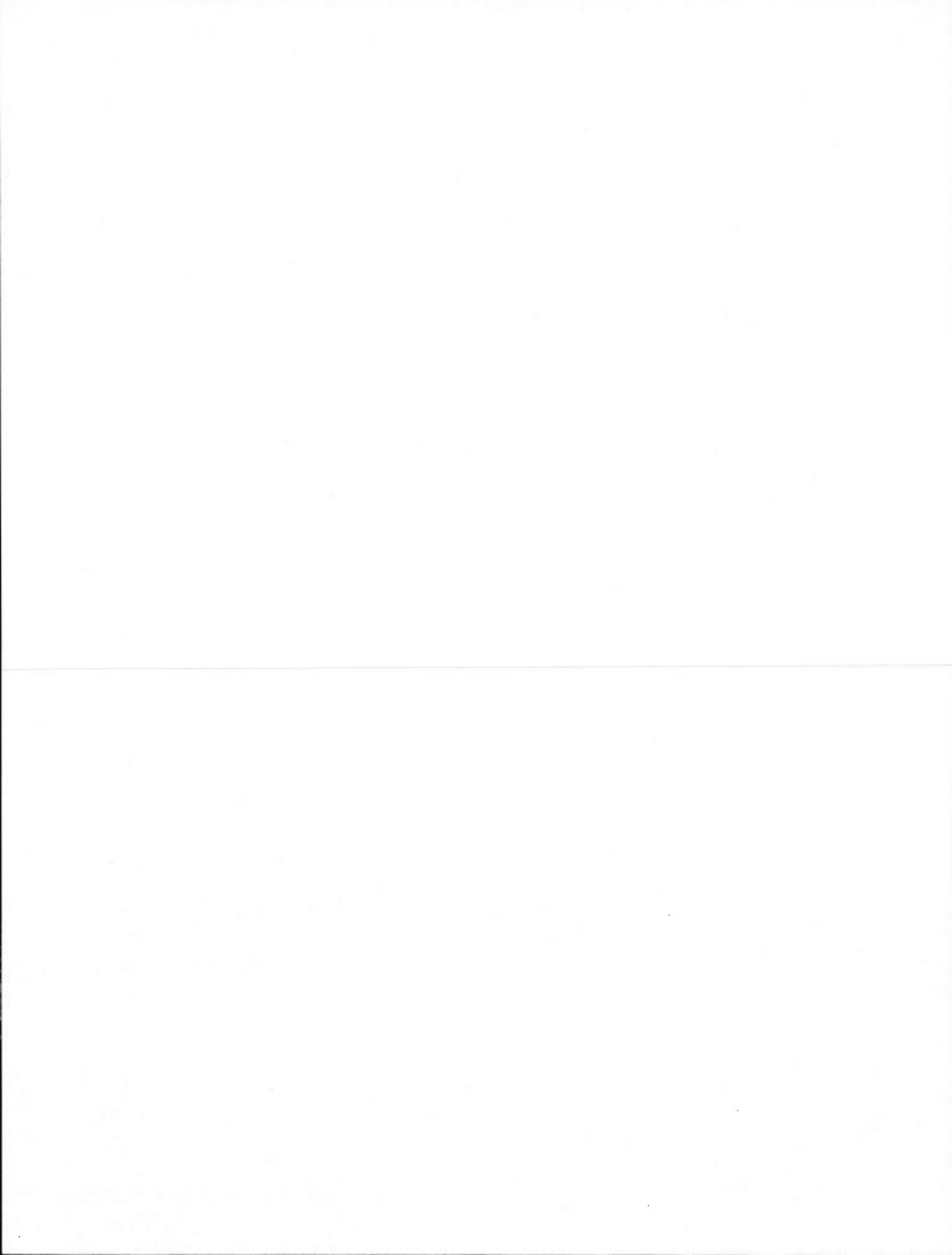
Le choix du seuil de précipitation a été fait de façon subjective en se basant sur certains auteurs (Eun-Soon and Kwon, 2007; Beniston et al., 2007). Il est à noter que d'autres méthodes plus physiques peuvent être utilisées pour déterminer ce seuil. Par exemple, l'étude de Bogardi et al. (1992) s'est basé sur le seuil d'évapotranspiration journalier pour définir un jour sec. C'est dans cette même ordre d'idée que Mupangwa et al. (2011) ont choisit un seuil de 4.95 mm au Zimbabwe pour définir un jour sec pendant la période d'agriculture en sachant que le seuil d'évapotranspiration varie entre 5 mm/jour et 8 mm/jour dans ces régions.

Dans cette étude, une période de sécheresse se définit comme étant un minimum d'un jour sans précipitation. Pour d'autres applications, l'utilisation d'un autre seuil pourrait être plus appropriée. Par exemple, l'étude de Cook et al. (2004) ont défini un minimum de 3 jours et 5 jours pour définir une période de sécheresse dans le sud de l'Afrique.

Les résultats de cette étude s'appuient sur un seul modèle régional ainsi qu'un seul modèle global. Afin d'avoir un signal plus robuste, des projets futurs devraient utiliser un ensemble de modèles régionaux et un ensemble de modèles globaux. Une partie de cette demande sera comblée par le projet CORDEX ayant comme objectif de concevoir une série d'expériences destinée à obtenir des projections climatiques pour plusieurs domaines, dont



l'Afrique, à l'aide d'un ensemble de modèles régionaux et de modèles globaux pour différents scénarios climatiques (Nikulin et al., 2012).



## ANNEXE A

### Exemple de calcul du maximum annuel de jour consécutif sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans pour le climat présent (1981-2010)

La partie suivante illustre un exemple pour le cas du point de grille (104,109) située en République Démocratique du Congo dans la zone de mousson pour la période allant de 1981 à 2010 pour un seuil de précipitation de 2 mm. Les diverses étapes permettant de calculer l'événement de récurrence de 5 ans basée sur la méthode du Peak-Over-Threshold (POT) sont présentées. Cette méthode consiste à choisir tous les événements plus grands qu'un certain seuil ou, alternativement, à fixer à priori le nombre d'occurrence moyen de jour consécutif sans précipitation ( $\lambda$ ) par année ou par saison. C'est à partir du nombre d'année disponible (N) que les  $N\lambda$  valeurs les plus extrêmes sont sélectionnées. Pour le point de grille (104,109),  $\lambda=2$  à l'Équateur et avec les 30 années disponibles, on considère les 60 événements les plus extrêmes.

	1981-2010			2041-2070				2071-2100			
	x		x		x		x		x		x
1	69	31	23	1	81	31	28	1	83	31	32
2	60	32	23	2	73	32	28	2	74	32	31
3	58	33	23	3	72	33	27	3	70	33	30
4	58	34	22	4	71	34	27	4	69	34	30
5	53	35	22	5	71	35	27	5	68	35	29
6	53	36	22	6	64	36	25	6	66	36	28
7	52	37	21	7	62	37	25	7	65	37	28
8	51	38	21	8	60	38	25	8	61	38	28
9	50	39	20	9	58	39	25	9	61	39	27
10	47	40	20	10	57	40	24	10	58	40	27
11	45	41	19	11	57	41	23	11	57	41	26
12	45	42	19	12	56	42	22	12	56	42	26
13	44	42	19	13	56	42	21	13	56	42	26
14	44	44	18	14	49	44	20	14	55	44	25
15	44	45	18	15	48	45	20	15	55	45	25
16	38	46	18	16	48	46	19	16	54	46	24
17	38	47	18	17	47	47	19	17	53	47	24
18	38	48	18	18	46	48	19	18	53	48	23
19	38	49	17	19	42	49	19	19	52	49	23
20	37	50	17	20	42	50	19	20	50	50	23
21	36	51	17	21	40	51	18	21	50	51	22
22	35	52	17	22	40	52	18	22	47	52	21
23	30	53	17	23	37	53	18	23	43	53	21
24	28	54	16	24	33	54	18	24	39	54	21
25	27	55	16	25	33	55	17	25	38	55	21
26	26	56	16	26	32	56	17	26	36	56	20
27	25	57	16	27	31	57	17	27	35	57	20
28	25	58	16	28	31	58	16	28	34	58	19
29	25	59	15	29	29	59	16	29	34	59	19
30	24	60	15	30	29	60	16	30	34	60	19

Tableau A.1: Tableau représentant les 60 valeurs du nombre de jours consécutifs annuel sans précipitation (x) pour le point de grille (104,109) et pour un seuil de 2 mm. Les résultats sont montrés pour les 3 périodes de 30 ans simulés par le MRCC5 piloté par CanESM2; 1981-2010; 2041-2070 et 2071-2100.

À partir des 60 données extrêmes sélectionnées, il est alors possible d'estimer les trois moments de probabilité pondérés (Probability-weighted-moments; PWM) (Hosking & Wallis, 1987; Wang, 1991).

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{(i)} \quad (\text{B.1})$$

$$b_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{i-1}{n-1} x_{(i)} \quad (\text{B.2})$$

$$b_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(i-1)(i-2)}{(n-1)(n-2)} x_{(i)} \quad (\text{B.3})$$

où  $x_{(i)}$  est la  $i^{\text{th}}$  plus petite valeur de l'échantillon

La fonction de distribution cumulative à trois paramètres GPD (Generalized Pareto Distribution) est donnée par :

$$F(x) = 1 - \left[ 1 - k \left( \frac{x-\xi}{\alpha} \right) \right]^{\frac{1}{k}} \text{ où } k \neq 0 \quad (\text{B.4})$$

Dans cette équation,  $\xi$  représente le paramètre de localisation,  $\alpha$  est le paramètre d'échelle et  $k$  est le paramètre de forme.

Pour cette distribution statistique, les trois premiers PWM s'écrivent comme suit :

$$\beta_0 = \xi + \frac{\alpha}{k} \left[ 1 - \frac{1}{k+1} \right] \quad (\text{B.5})$$

$$\beta_1 = \frac{1}{2} \xi + \frac{\alpha}{k} \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{(k+1)(k+2)} \right] \quad (\text{B.6})$$

$$\beta_2 = \frac{1}{3} \xi + \frac{\alpha}{k} \left[ \frac{1}{3} - \frac{2}{(k+1)(k+2)(k+3)} \right] \quad (\text{B.7})$$

Les paramètres  $\xi$ ,  $\alpha$  et  $k$  peuvent être estimés en approximant  $b_0, b_1, b_2$  à leurs estimateurs théoriques correspondant  $(\beta_0, \beta_1, \beta_2)$  en effectuant la résolution de ces équations. Cela mène donc aux relations suivantes:

$$k = \frac{9b_2 - 10b_1 + 2b_0}{2b_1 - 3b_2} \quad (\text{B.8})$$

$$\alpha = (2b_1 - b_0)(k + 1)(k + 2) \quad (\text{B.9})$$

$$\xi = b_0 - \frac{\alpha}{1 + k} \quad (\text{B.10})$$

À l'aide des relations précédentes, les différents paramètres du point de grille (104,109) sont calculés pour la période de référence (1981-2010) :

$$\xi = 0.126 \qquad \alpha = 18.755 \qquad k = 13.460$$

Ainsi l'événement de récurrence de 5 ans (RL) correspondant à la période de retour T est donnée par :

$$RL_T = \xi + \frac{\alpha}{k} \left[ \frac{1}{(\lambda T)^k} \right] \quad (\text{B.11})$$

où  $\lambda$  représente le nombre d'occurrence moyen de jour consécutif sans précipitation par année ou par saison.

Pour le point de grille (104,109), l'événement de récurrence de 5 ans est

$$RL_5 = 51.4203;$$

## ANNEXE B

### TABLEAUX ET FIGURES COMPLÉMENTAIRES

Fig. B.1	Sous-section 2.5 Projected changes to dry spell characteristics
Fig. B.2	Sous-section 2.5 Projected changes to dry spell characteristics
Fig. B.3	Sous-section 2.5 Projected changes to dry spell characteristics
Fig. B.4	Sous-section 2.5 Projected changes to dry spell characteristics
Fig. B.5	Sous-section 2.5 Projected changes to dry spell characteristics
Fig. B.6	Sous-section 2.5 Projected changes to dry spell characteristics
Fig. B.7	Sous-section 2.5 Projected changes to dry spell characteristics
Fig. B.8	Sous-section 2.5 Projected changes to dry spell characteristics
Fig. B.9	Sous-section 2.5 Projected changes to dry spell characteristics

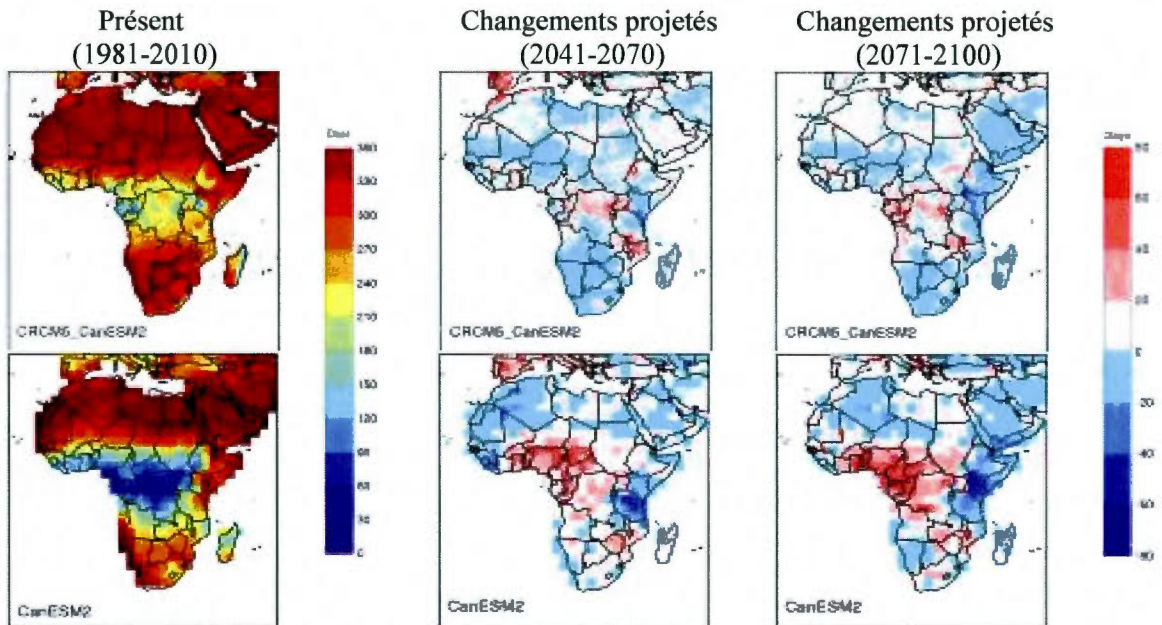


Figure B1: Moyenne annuelle du nombre de jours secs simulée par le MRCC5 piloté par CanESM2 ainsi que CanESM2 pour les deux périodes futures (2041-2070; colonne du centre et 2071-2100; colonne de droite) comparées à la période présente (1981-2010; colonne de gauche) pour un seuil de 2 mm.

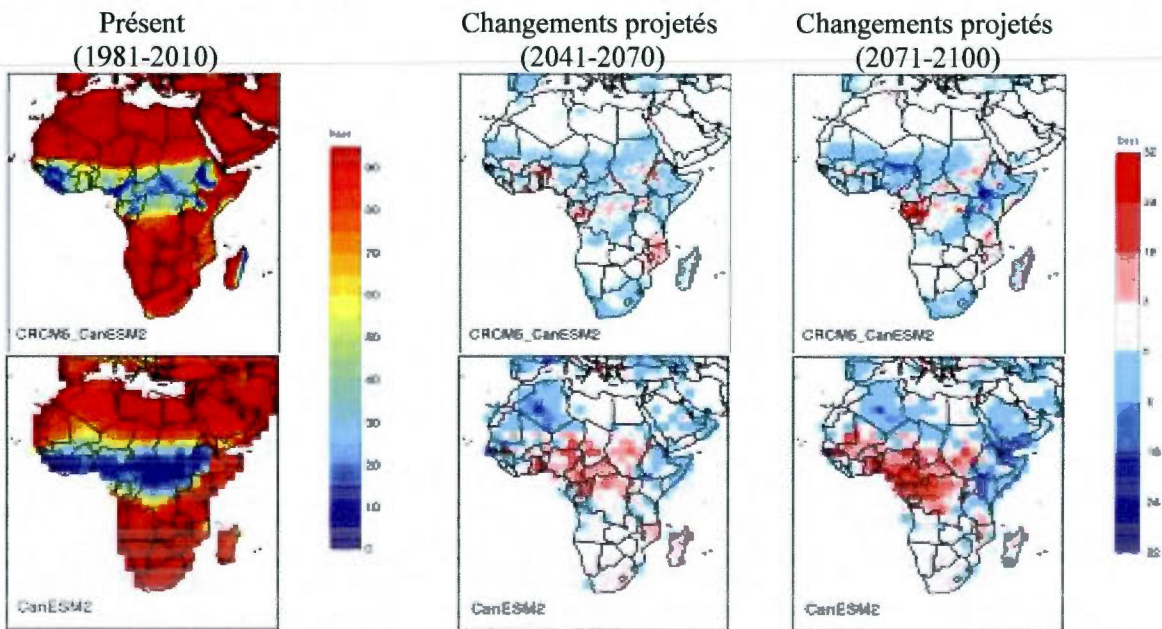


Figure B2: Moyenne saisonnière correspondant à l'été boréal du nombre de jours secs simulée par le MRCC5 piloté par CanESM2 ainsi que CanESM2 pour les deux périodes futures (2041-2070; colonne du centre et 2071-2100; colonne de droite) comparées à la période présente (1981-2010; colonne de gauche) pour un seuil de 2 mm.



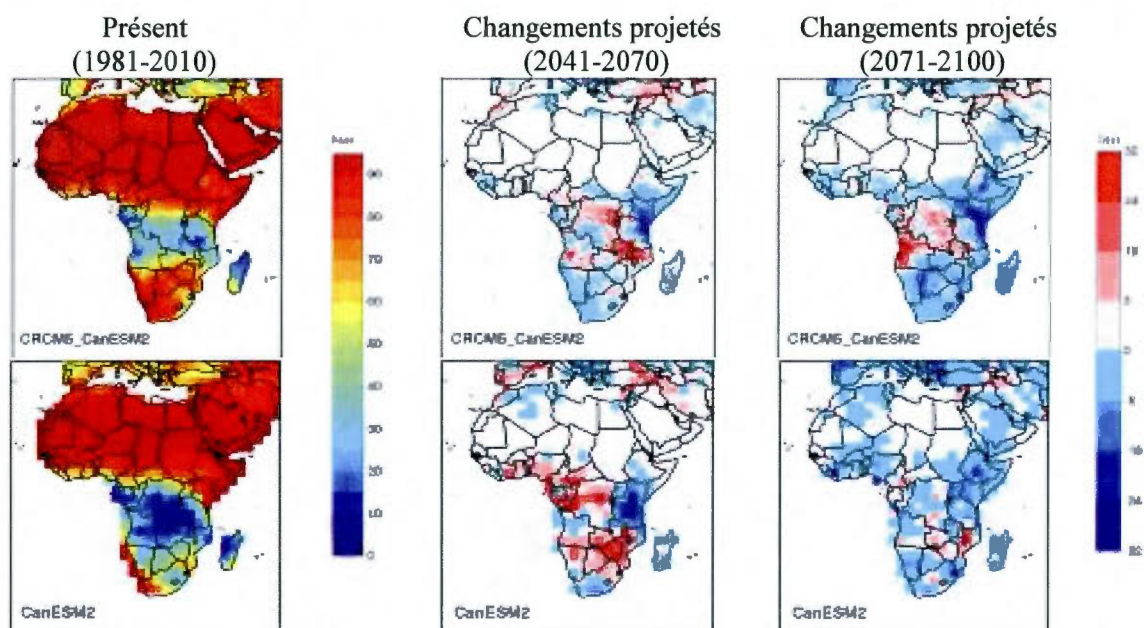


Figure B3: Moyenne saisonnière correspondant à l'été austral du nombre de jours secs simulée par le MRCC5 piloté par CanESM2 ainsi que CanESM2 pour les deux périodes futures (2041-2070; colonne du centre et 2071-2100; colonne de droite) comparées à la période présente (1981-2010; colonne de gauche) pour un seuil de 2 mm.

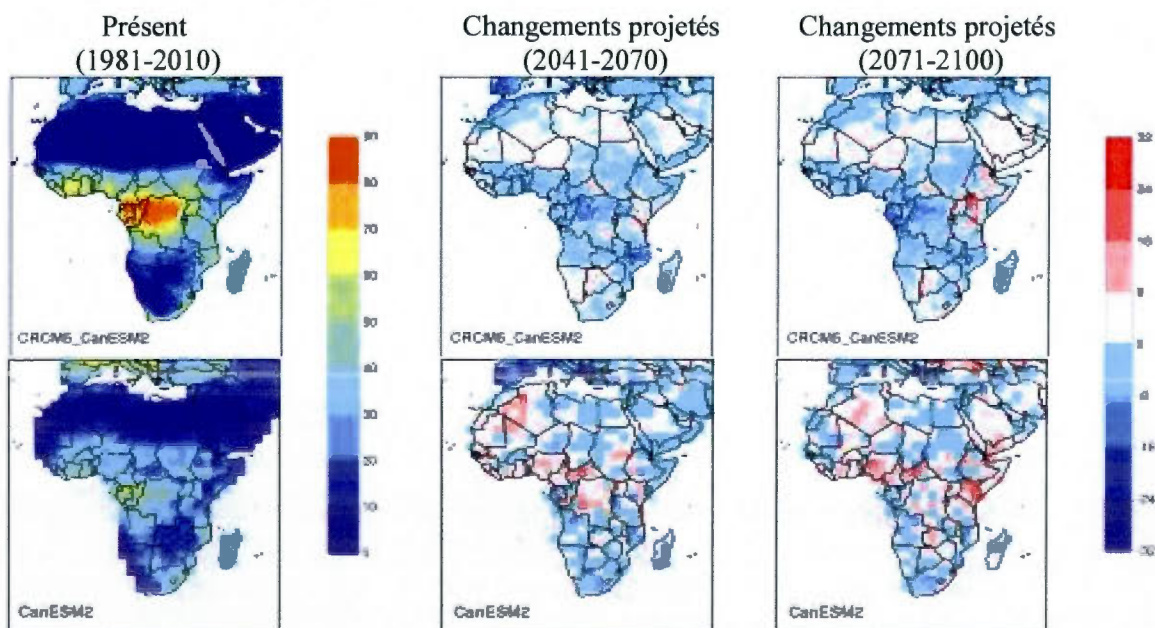


Figure B4: Moyenne annuelle du nombre de périodes de sécheresse simulée par le MRCC5 piloté par CanESM2 ainsi que CanESM2 pour les deux périodes futures (2041-2070; colonne du centre et 2071-2100; colonne de droite) comparées à la période présente (1981-2010; colonne de gauche) pour un seuil de 2 mm.

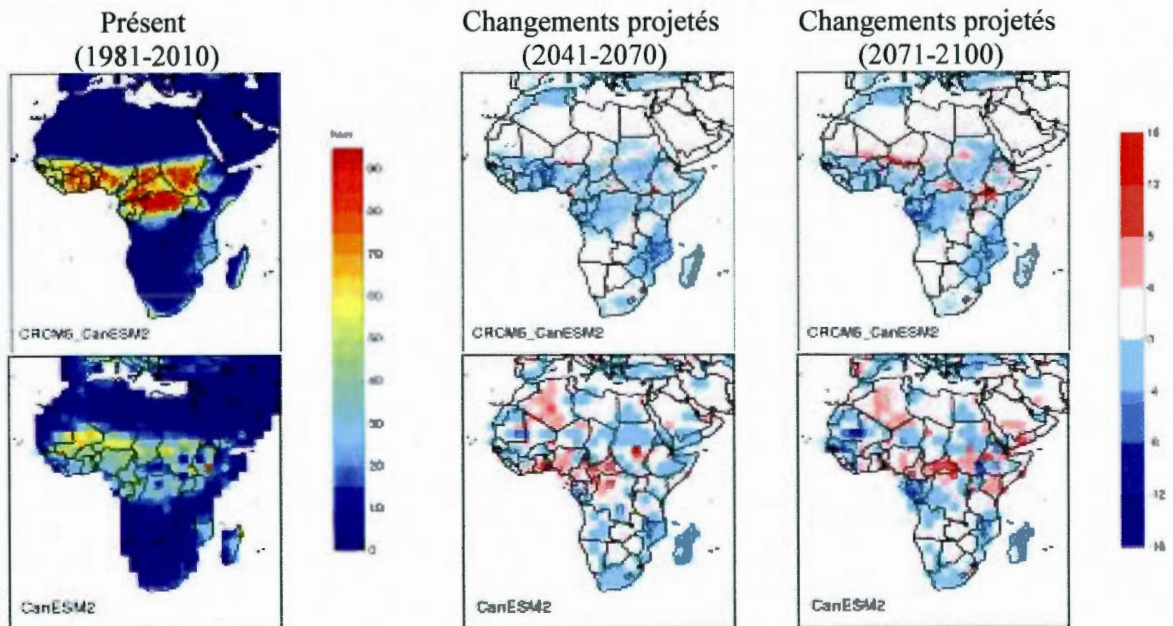


Figure B5: Moyenne saisonnière correspondant à l'été boréal du nombre de périodes de sécheresse simulée par le MRCC5 piloté par CanESM2 ainsi que CanESM2 pour les deux périodes futures (2041-2070; colonne du centre et 2071-2100; colonne de droite) comparées à la période présente (1981-2010; colonne de gauche) pour un seuil de 2 mm.

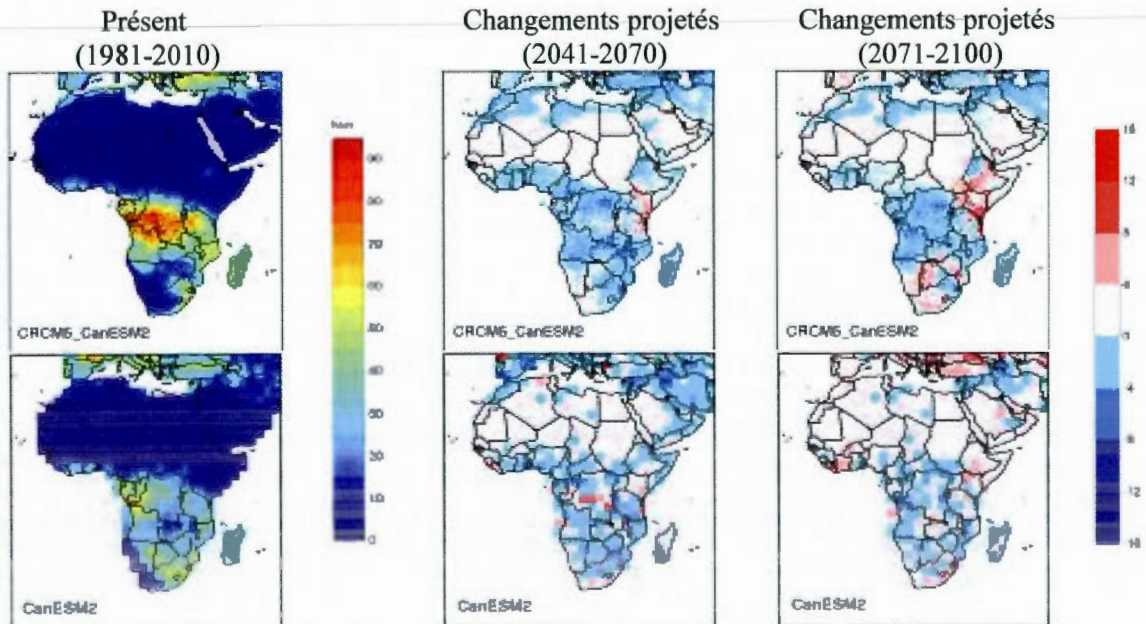


Figure B6: Moyenne saisonnière correspondant à l'été austral du nombre de périodes de sécheresse simulée par le MRCC5 piloté par CanESM2 ainsi que CanESM2 pour les deux périodes futures (2041-2070; colonne du centre et 2071-2100; colonne de droite) comparées à la période présente (1981-2010; colonne de gauche) pour un seuil de 2 mm.

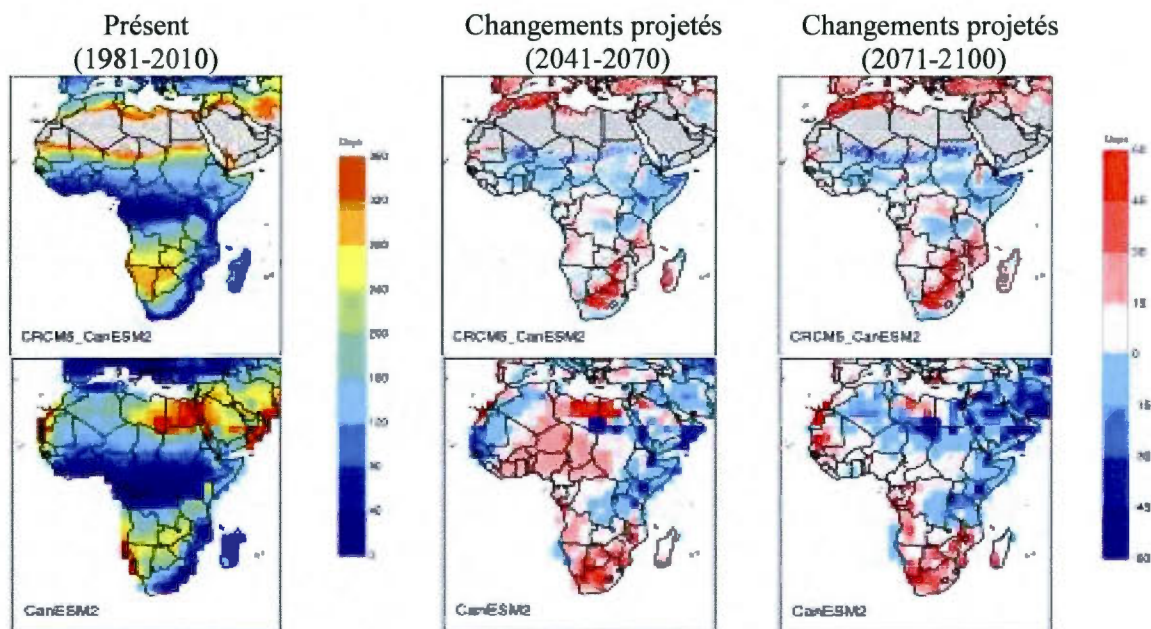


Figure B7: Moyenne annuelle du nombre de jours consécutifs sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans simulée par le MRCC5 piloté par CanESM2 ainsi que CanESM2 pour les deux périodes futures (2041-2070; colonne du centre et 2071-2100; colonne de droite) comparées à la période présente (1981-2010; colonne de gauche) pour un seuil de 2 mm.

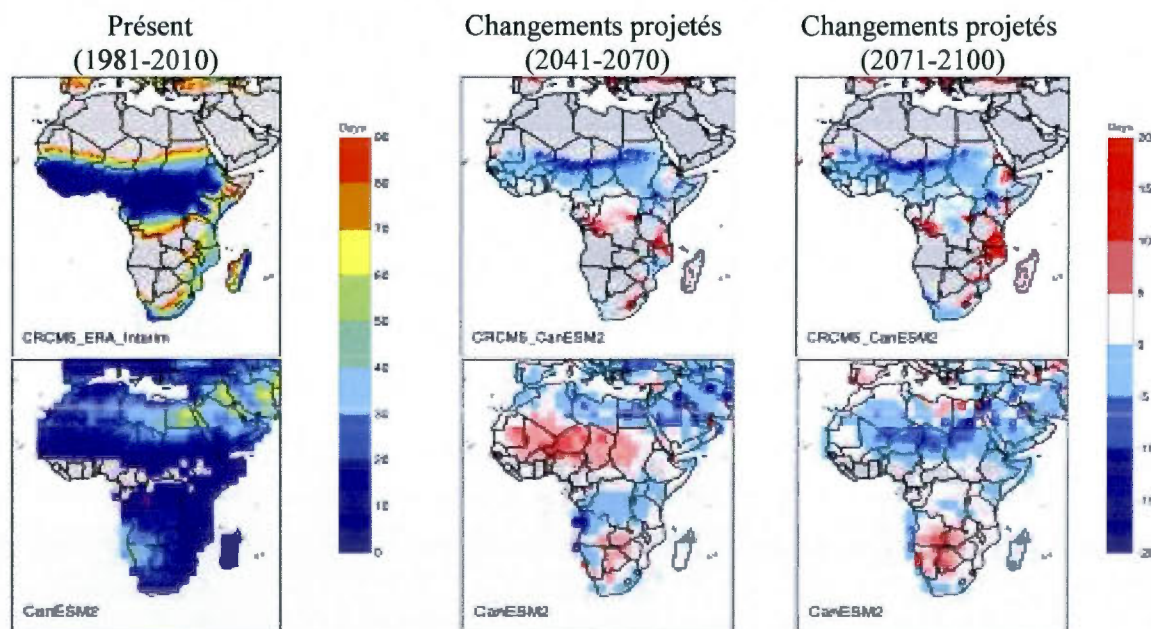


Figure B8: Moyenne saisonnière correspondant à l'été boréal du nombre de jours consécutifs sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans simulée par le MRCC5 piloté par CanESM2 ainsi que CanESM2 pour les deux périodes futures (2041-2070; colonne du centre et 2071-2100; colonne de droite) comparées à la période présente (1981-2010; colonne de gauche) pour un seuil de 2 mm. Les points de grilles où l'analyse n'a pas été faite sont montrés en gris.

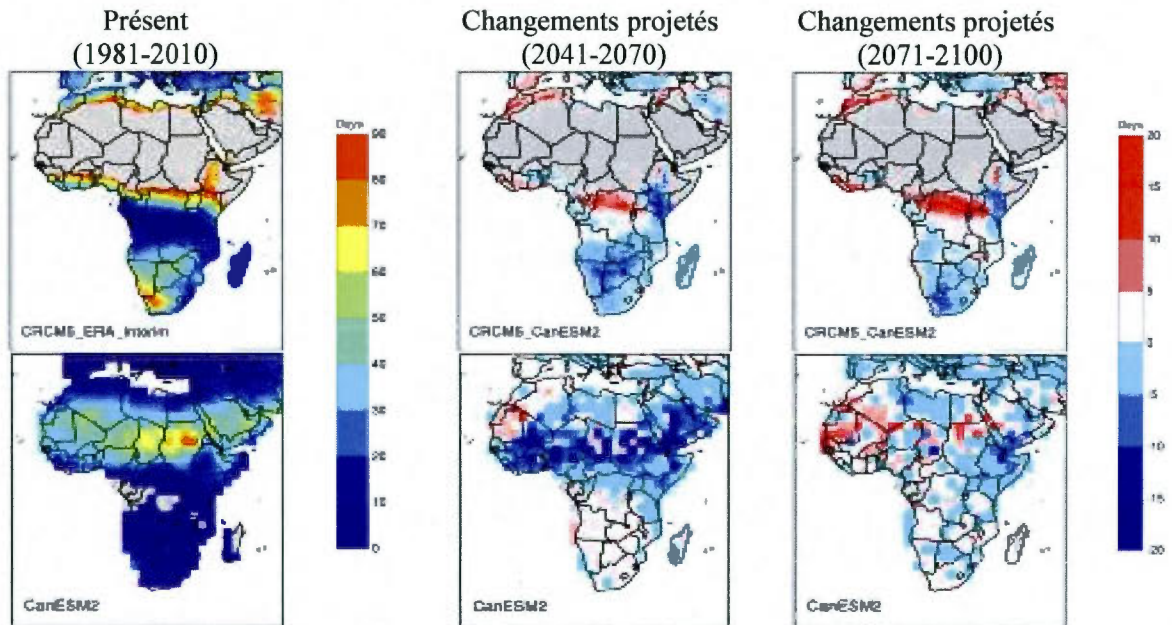


Figure B9: Moyenne saisonnière correspondant à l'été austral du nombre de jours consécutifs sans précipitation associé à une récurrence de 5 ans simulée par le MRCC5 piloté par CanESM2 ainsi que CanESM2 pour les deux périodes futures (2041-2070; colonne du centre et 2071-2100; colonne de droite) comparées à la période présente (1981-2010; colonne de gauche) pour un seuil de 2 mm. Les points de grilles où l'analyse n'a pas été faite sont montrés en gris.

## RÉFÉRENCES

- Afiesimama, E.A., Pal, J.S., Abiodun, B.J., Gutowski, J.W.J., Adedoyin, A., 2006. Simulation of West African Monsoon using the RegCM3. Part I: Model validation and interannual variability. *Theor. Appl. Climatol.*, 86, 23–37.
- Arora, V.K., Boer, G.J., 2010. Uncertainties in the 20th century carbon budget associated with land use change. *Glob. Change Biol.*, 16, 3327–3348.
- Anyah, R.O., Qiu, W., 2011. Characteristic 20th and 21st century precipitation and temperature patterns and changes over the Greater Horn of Africa. *Int. J. Climatol.*, 32, 347–363.
- Barnett, D.N., Brown, S.J., Murphy, J.M., Sexton, D.M.H., Webb, M.J., 2006. Quantifying uncertainty in changes in extreme event frequency in response to doubled CO<sub>2</sub> using a large ensemble of GCM simulations. *Clim. Dyn.*, 26, 489–511.
- Barron, J., Rockström, J., Gichuki, F., Hatibu, N., 2003. Dry spell analysis and maize yields for two semi-arid locations in East Africa. *Agric. Forestry Meteorol.*, 117, 23–37.
- Bélair, S., Mailhot, J., Girard, C., Vaillancourt, P., 2005. Boundary layer and shallow cumulus clouds in a medium range forecast of a large scale weather system. *Mon. Weather Rev.*, 133, 1938–1960.
- Beniston, M., Stephenson, D.B., Christenson, O.B., Ferro, C.A.T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., Woth, K., 2007. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Clim. Change*, 81, 71–95.
- Benoit, R., Cote, J., Mailhot, J., 1989. Inclusion of a TKE boundary layer parameterization in the Canadian regional finite-element model. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1726–1750.
- Bogardi, J.J., Duckstein, L., 1993. Event-based analysis of the dry spell phenomenon. *Rev. Sci. Eau*, 6, 23–46.
- Chaboureau, J.-P., Bechtold, P., 2005. Statistical representation of clouds in a regional model and the impact on the diurnal cycle of convection during tropical convection, cirrus and

- nitrogen oxides (TROCCINOX). *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2004JD005645.
- Christensen, J.H., Machehauer, B., Jones, R.G., Schär, C., Ruti, P.M., Castro, M., Visconti, G., 1997. Validation of present regional climate simulations over Europe: LAM simulations with observed boundary conditions. *Clim. Dyn.*, 13, 489–506.
- Coles S., 2001. An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer, USA, 210 pp.
- Cook, C., Reason, C.J.C., Hewitson, B.C., 2004. Wet and dry spells within particularly wet and dry summers in the South African summer rainfall region. *Clim. Res.*, 26, 17–31.
- Côté, J., Desmarais, J.-G., Gravel, S., Méthot, A., Patoine, A., Roch, M., Staniforth, A., 1998. The Operational CMC–MRB Global Environmental Multiscale (GEM) Model. Part II: Results. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 1397–1418.
- Côté, J., Gravel, S., Méthot, A., Patoine, A., Roch, M., Staniforth, A., 1998. The Operational CMC–MRB Global Environmental Multiscale (GEM) Model. Part I: Design Considerations and Formulation. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 1373–1395.
- Dai, A., 2006. Precipitation Characteristics in Eighteen Coupled Climate Models. *J. Climate*, 19, 4605–4630.
- Davison, A.C., Hinkley, D.V., 1997. Bootstrap Methods and Their Application. Cambridge University Press, UK, 582 pp.
- Delage, Y., 1997. Parameterising sub-grid scale vertical transport in atmospheric models under statically stable conditions. *Bound.-Layer Meteor.*, 82, 23–48.
- Delage, Y., Girard, C., 1992. Stability functions correct at the free convection limit and consistent for both the surface and Ekman layers. *Bound.-Layer Meteor.*, 58, 19–31.
- Druyan, L.M., 2010. Studies of the 21<sup>st</sup> century precipitation trends over West Africa. *Int. J. Climatol.*, doi:10.1002/joc.2180.
- Druyan, L.M., Feng, J., Cook, K.H., Xue, Y., Fulakeza, M., Hagos, S.M., Konaré, A., Moufouma-Okia, W., Rowell, D.P., Vizy, E.K., Ibrah, S.S., 2010. The WAMME regional model intercompariason study. *Clim. Dyn.*, 35, 175–192.
- Dyson, L.L., 2009. Heavy daily-rainfall characteristics over the Gauteng Province. *Water SA.*, 35, 627–638.
- Easterling, D.R., Evans, J.L., Groisman, P.Y., Karl, T.R., Kunkei, K.E., Ambenje, P., 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review. *Bull. Amer.*

- Meteor. Soc.*, 81, 417–425.
- Easterling, D.R., Gerald, A., Meehl, C., Stanley, P., Changnon, A., Karl, R.T., Mearns, O.L., 2000. Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science*, 289, 2068–2074.
- Efron, B., Tibshirani R.J., 1993. An Introduction to the Bootstrap. Chapman and Hall, USA, 436 pp.
- Eun-Soon, I., Kwon, W.-T., 2007. Characteristics of Extreme Climate Sequences over Korea Using a Regional Climate Change Scenario. *SOLA*, 3, 17–20.
- Gao, X., Pal, J.S., Giorgi, F., 2006. Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from a high resolution double nested RCM simulation. *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1029/2005GL024954.
- Giorgi, F., Jones, C., Asrar, G., 2009. Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework. *WMO Bull.*, 58, 175–183.
- GREPHYS., 1996. Inter-comparison of regional flood frequency procedure for Canadian rivers. *J. Hydrol.*, 186, 85–103.
- Haensler, A., Hagemann, S., Jacob, D., 2010. Dynamical downscaling of ERA40 reanalysis data over southern Africa: added value in the simulation of the seasonal rainfall characteristics, *Int. J. Climatol.*, 32, 2338–2349.
- Heinrich, G., Gobiet, A., 2012. The future of dry and wet spells in Europe : A comprehensive study based on the ENSEMBLES regional climate models. *Int. J. Climatol.*, 32, 1951–1970.
- Hernández-Díaz, L., Laprise, R., Sushama, L., Martynov, A., Winger, K., Dugas, B., 2013. Climate simulation over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5), *Clim. Dyn.*, 40, 1415–1433.
- Hewitson, B., 2003. Developing perturbations for climate change impact assessments. *EOS*, 84, 337–339.
- Hudson, D.A., Jones, R.G., 2002. Simulations of present-day and future climate over southern Africa using HadAM3H, Met Office Hadley Center, Exeter, UK.
- Hudson, D.A., Jones, R.G., 2002. Regional climate model simulations of present-day and future climates of southern Africa, Met Office Hadley Center, Exeter, UK.
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Morrissey, M.M., Curtis, S., Joyce, R., McGavock, B., Susskind,

- J., 2001. Global Precipitation at One-Degree Daily Resolution from Multisatellite Observations. *J. Hydrometeor.*, 2, 36–50.
- Hulme, M., Doherty, R., Ngara, T., New, M., Lister, D., 2001. African climate change: 1900–2100. *Clim. Res.*, 17, 145–168.
- Ibrahim, B., Polcher, J., Karambiri, H., Rockel, B., 2012. Characterization of the rainy season in Burkina Faso and its representation by regional climate models. *Clim. Dyn.*, 39, 1287–1302.
- Jacob, D., Elizalde, A., Haensler, A., Hagemann, S., Kumar, P., Podzun, R., Rechid, D., Remedio, A.R., Saeed, F., Sieck, K., Teichmann, C., Wilhelm, C., 2012. Assessing the Transferability of the Regional Climate Model REMO to Different COordinated Regional Climate Downscaling EXperiment (CORDEX) Regions. *Atmosphere*, 3, 181–199.
- Joubert, A.M., Katzfey, J.J., McGregor, J.L., Nguyen, K.C., 1999. Simulating midsummer climate over southern Africa using a nested regional climate model. *J. Geophys. Res.*, 104, 19015–19025.
- Kain, J.S., 1990. A One-Dimensional Entraining/Detraining Plume Model and Its Application in Convective Parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 47, 2784–2802.
- Khaliq, M.N., Ouarda, T.B.M.J., Gachon, P., Sushama, L., St-Hilaire, A., 2009. Identification of hydrological trends in the presence of serial cross correlations: a review of selected methods and their application to annual flow regimes of Canadian rivers. *J. Hydrol.*, 368, 117–130.
- Kijazi, A.L., Reason, C.J.C., 2009. Analysis of the 2006 floods over northern Tanzania. *Int. J. Climatol.*, 29, 955–970.
- Kundzewicz, Z.W., Mata, L.J., Arnell, N., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miller, K., Oki, T., Şen, Z., Shiklomanov, I., 2007. Freshwater resources and their management, in *Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge Univ. Press, UK, 173–210.
- Kuo, H.L., 1965. On formation and intensification of tropical cyclone through latent heat release by cumulus convection. *J. Atmos. Sci.*, 22, 40–63 .
- Lana, X., Martínez, M.D., Burgueño, A., Serra, C., 2006. Statistical distribution and sampling



- strategies for the analysis of extreme dry spells in Catalonia (NE Spain). *J. Hydrol.*, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.09.013.
- Laprise, R., 1992. The Euler Equations of Motion with Hydrostatic Pressure as an Independent Variable. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 197–207.
- Laprise, R., Hernandez-Diaz, L., Tete, K., Sushama, L., Separovic, L., Martynov, A., Winger, K., Valin, M., 2013. Climate projections over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian Regional Climate Model. *Clim. Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-012-1651-2.
- Li, J., Barker, H.W., 2005. A radiation algorithm with correlated-k distribution. Part I: local thermal equilibrium. *J. Atmos. Sci.*, 62, 286–30.
- Matarira, C.H., Jury, M.R., 1992. Contrasting meteorological structure of intra-seasonal wet and dry spells in Zimbabwe. *Int. J. Climatol.*, 12, 165–176.
- May, W., 2008. Potential future changes in the characteristics of daily precipitation in Europe simulated by the HIRHAM regional climate model. *Clim. Dyn.*, 30, 581–603.
- McFarlane, N.A., 1987. The Effect of Orographically Excited Gravity Wave Drag on the General Circulation of the Lower Stratosphere and Troposphere. *J. Atmos. Sci.*, 44, 1775–1800.
- Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K., Daniel, J.S., Kainuma, M.L.T., Lamarque, J.-F., Matsumoto, K., Montzka, S.A., Raper, S.C.B., Riahi, K., Thompson, A., Velders, G.J.M., van Vuuren, D.P.P., 2011b. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Clim. Change*, doi: 10.1007/s10584-011-0156-z.
- Motha, R.P., Sharon, K., Leduc, L.T., Steyaert, C., Sakamoto, M., Norton, D.S., 1980. Precipitation Patterns in West Africa. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1567–1578.
- Mupangwa, W., Walker, S., Twomlow, S., 2011. Start, end and dry spells of the growing season in semi-arid southern Zimbabwe. *J. Arid Environ.*, 75, 1097–1104.
- Nikulin, G., Jones, C., Giorgi, F., Asrar, G., Büchner, M., Cerezo-Mota, R., Christensen, O.B., Déqué, M., Fernandez, J., Hänsler, A., van Meijgaard, E., Samuelsson, P., Sylla, M.B., Sushama, L., 2012. Precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-Africa regional climate simulations. *J. Clim.*, doi:10.1175/JCLI-D-11-00375.1.
- Pal, J.S., Giorgi, F., Bi, X., Elguindi, N., Solomon, F., Gao, X., Francisco, R., Zakey, A., Winter, J., Ashfaq, M., Syed, F., Bell, J.L., Diffanbaugh, N.S., Kamacharya, J., Konare,

- A., Martinez, D., da Rocha, R.P., Sloan, L.C., Steiner, A., 2007. The ICTP RegCM3 and RegCNET: regional climate modeling for the developing world. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 88, 1395–1409.
- Paeth, H., Hall, N.M.J., Gaertner, M.A., Alonso, M.D., Moumouni, S., Polcher, J., Ruti, P.M., Fink, A.H., Gosset, M., Lebel, T., Gaye, A.T., Rowell, D.P., Moufouma-Okia, W., Jacob, D., Rockel, B., Giorgi, P., Rummukainen, M., 2011. Progress in regional downscaling of West African precipitation. *Atmos. Sci. Lett.*, 12, 75–82.
- Patricola, C.M., Cook, K.H., 2006. Dynamics of the West African Monsoon under Mid-holocene Precessional Forcing: Regional Climate Model Simulations. *J. Clim.*, 20, 694–716.
- Perzyna, G., 1994. Spatial and temporal characteristics of maximum dry spells in Southern Norway. *Int. J. Climatol.*, 14, 895–909.
- Ratnam, J., Behera, S., Masumoto, Y., Takahashi, K., Yamagata, T., 2011. A simple regional coupled model experiment for summer-time climate simulation over southern Africa. *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-011-1190-2.
- Redelsperger, J.-L., Thorncroft, C.D., Lebel, T., Douglas, J.P., Polcher, J., 2006. African monsoon multidisciplinary analysis — an international research project and field campaign. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 87, 12, 1739–1746.
- Rodell, M., Houser, P.R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J.K., Walker, J.P., Lohmann, D., Toll, D., 2004. The global land data assimilation system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 85, 381–394.
- Sanchez, E., Dominguez, M., Romera, R., Lopez De la Franca, N., Gaertner, M.A., Gallardo, C., Castro, M., 2011. Regional modeling of dry spells over the Iberian Peninsula for present climate and climate change conditions. *Clim. Change*, 107, 625–634.
- Schmidli, J., Frei, C., 2005. Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. *Int. J. Climatol.*, 25, 753–771.
- Semenov, V.A., Bengtsson, L., 2002. Secular trends in daily precipitation characteristics: Greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM. *Clim. Dyn.*, 19, 123–140.
- Sharma, T.C., 1996. Simulation of the Kenyan longest dry and wet spells and the longest rain sums using a Markov model. *J. Hydrol.*, 178, 55–67.

- She, D., Xia, J., Song, J., Du, H., Chen, J., Wan, L., 2012. Spatio-temporal variation and statistical characteristic of extreme dry spell in Yellow River, China. *Theor. Appl. Climatol.*, doi: 10.1007/s00704-012-0731-x.
- Shongwe, M.E., van Oldenborgh, G.J., van den Hurk, B.J.J.M., van Aalst, M.K., 2010. Projected changes in mean and extreme precipitation in Africa under global warming. Part II: East Africa. *J. Clim.* 24, 3718–3733.
- Simmons, A.S., Uppala, D.D., Kobayashi, S., 2007. ERA-interim: new ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsl.*, 110, 29–35.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L., 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, UK, 996 pp.
- Sultan, B., Serge, J., Philippe, D., 2007. Characterization of the Diurnal Cycle of the West African Monsoon around the Monsoon Onset. *J. Clim.*, 20, 4014–4032.
- Sultan, B., Janicot, S., 2004. La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles intra-saisonnières. I : mise en place de la mousson et variabilité intra-saisonnière de la convection. *Sécheresse*, 15, 321–30.
- Sun, Y., Solomon, S., Dai, A., Portmann, R., 2005. How often does it rain? *J. Clim.*, 19, 916–934.
- Sun, L., Semazzi, F.H.M., Giorgi, F., Ogallo, L., 1999a. Application of the NCAR regional climate model to eastern Africa. 1. Simulation of the short rains of 1988. *J. Geophys. Res.*, 104, 6529–6548.
- Sun, L., Semazzi, F.H.M., Giorgi, F., Ogallo, L., 1999b. Application of the NCAR regional climate model to eastern Africa. 2. Simulation of interannual variability of short rains. *J. Geophys. Res.*, 104, 6549–6562.
- Sundqvist, H., Berge, E., Kristjansson, J.E., 1989. Condensation and Cloud Parameterization Studies with a Mesoscale Numerical Weather Prediction Model. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1641–1657.
- Sushama, L., Khaliq, M.N., Laprise, R., 2010. Dry spell characteristics over Canada in a changing climate as simulated by the Canadian RCM. *Global Planet. Change*, 74, 1–14.
- Sylla, M.B., Coppola, E., Mariotti, L., Giorgi, F., Ruti, P.M., Dell'Aquila, A., Bi, X., 2010. Multiyear simulation of the African climate using the regional climate model (RegCM3)

- with the high resolution ERA-Interim reanalysis. *Clim. Dyn.*, 35, 231–247.
- Taylor, C.M., Parker, D.J., Kalthoff, N., Gaertner, M.A., Philippon, N., Bastin, S., Harris, P.P., Boone, A., Guichard, F., Agustin-Panareda, A., Baldi, M., Cerlini, P., Descroix, L., Douville, H., Flamant, C., Grandpeix, J.Y., Polcher, J., 2011. New perspectives on land-atmosphere feedbacks from the African monsoon multidisciplinary analysis. *Atmos. Sci. Lett.*, 12, 38–44.
- Tebaldi, C., Hayhoe, K., Arblaster, J.M., Meehl, G.A., 2006. An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Clim. Change*, 79, 185–211.
- Tebaldi, C.J., Arblaster, M., Hayhoe, K., Meehl, G.A., 2006. Going to the extremes: An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Clim. Change*, 79, 185–211.
- Uppala, S., Dee, D., Kobayashi, S., Berrisford, P., Simmons, A., 2008. Towards a climate data assimilation system: status update of ERA-interim. *ECMWF Newsl.*, 115, 12–18.
- Van der Linden, P., Mitchell, J.F.B., 2009. ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of Research and Results from the ENSEMBLES Project. Met Office Hadley Centre, UK.
- Verseghy, L.D., 2000. The Canadian Land Surface Scheme (CLASS): Its History and Future. *Atmos.-Ocean*, 38, 1–13.
- Von Salzen, K., McFarlane, N.A., Lazare, M., 2005. The role of shallow convection in the water and energy cycles of the atmosphere. *Clim. Dyn.*, 25, 671–688.
- Xue, Y., De Sales, F., Lau, W.K.M., Boone, A., Feng, J., Dirmeyer, P., Guo, Z., Kim, K.-M., Kitoh, A., Kumar, V., Pocard-Leclercq, I., Mahowald, N., Moufouma-Okia, W., Pegio, P., Rowell, D.P., Schemm, J., Schubert, S.D., Sealy, A., Thiaw, W., Vintzileos, A., Williams, S.F., Wu, M.-L.C., 2010. Intercomparison and analyses of the climatology of the West African Monsoon in the West African Monsoon Modeling and Evaluation project (WAMME) first model intercomparison experiment. *Clim. Dyn.*, 35, 3–27.
- Yeh, K., Côté, J., Gravel, S., Méthot, A., Patoine, A., Roch, M., Staniforth, A., 2002. The CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) Model. Part III: Nonhydrostatic Formulation. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 339–356.
- Walpole, R.E., Myers, R.H., 1985. Probability and statistics for engineers and scientists. Macmillan, USA, 680 pp.

- Wang, Q.J., 1991. The POT model described by the generalized Pareto distribution with Poisson arrival rate. *J. Hydrol.*, 129, 263–280.
- Zadra, A., Roch, M., Laroche, S., Charron, M., 2003. The subgrid scale orographic blocking parametrization of the GEM model. *Atmos.-Ocean*, 41, 155–170.
- Zadra, A., Caya, D., Cote, J., Dugas, B., Jones, C., Laprise, R., Winger, K., Caron, L-P., 2008. The Next Canadian Regional Climate Model. *Phys. Can.*, 64, 75–83.