

Université Assane Seck de Ziguinchor



UFR : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

Mémoire de Master 2

Mention : Physiques et Applications

Spécialité : Sciences de l'Atmosphère et de l'Océan

Analyse Multi-modèles des Extrêmes Hydro-climatiques en Afrique de l'Ouest dans les Simulations du CMIP5

Présenté par **Alioune MBAYE**

Sous la Direction de **Dr Samo DIATTA**

Sous la Supervision de **Dr Moctar CAMARA**

Soutenu publiquement le 21/04/2018 devant le jury composé de :

Prénoms et Noms	Grade	Qualité	Etablissement
Bamol Ali SOW	Maître de Conférences	Président	UASZ
Mamadou Lamine MBAYE	Assistant	Rapporteur	UASZ
Moctar CAMARA	Maître de Conférences	Examineur	UASZ
Joseph Sambasene DIATTA	Assistant	Examineur	UASZ
Samo DIATTA	Maître-Assistant	Encadrant	UASZ

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Ma mère Anna NDIAYE et mon père Ousmane MBAYE de m'avoir donné une bonne éducation.

Ma soeur feu Fatima Élisabeth MBAYE (Que la terre lui soit légère).

Mes frères et soeurs de m'avoir encouragé et soutenu dans les études.

Remerciement

Tout d'abord je rend grâce à ALLAH Le Tout Puissant de m'avoir donné force et santé pour mener à bien ce travail.

Mes sincères remerciements à Dr Samo DIATTA et Dr Youssouph SANÉ, pour m'avoir accompagné dans mes travaux et de m'avoir apporté soutiens et conseils jusqu'à la rédaction finale de ce mémoire.

Je tiens à remercier tout particulièrement le Directeur de l'ANACIM pour m'avoir permis de faire une partie de mon stage dans cette structure.

Mes remerciements s'adressent aussi aux étudiants du Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC), en particulier, Mr Alioune Badara Sarr, Mr Ibrahima Diba pour tous les éclaircissements et conseils.

Un grand merci au Responsable du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan Simeon-Fongang (LPAO-SF) pour m'avoir facilité l'accès à leur laboratoire durant mon séjour à DAKAR.

Enfin je remercie toute ma promotion, pour les discussions enrichissantes qu'on a eu depuis le début du cycle de master.

Résumé / Abstract

Résumé

Ce travail est une analyse des extrêmes hydro-climatiques sur l’Afrique de l’Ouest pendant la période de mousson de l’Afrique de l’ouest (juin-juillet-août-septembre) sur une durée de 23 ans et obtenus à partir des simulations du programmes CMIP5 (Phase 5 du programme d’intercomparaison des modèles couplés). Il consiste d’abord à déterminer les indices extrêmes de précipitations avec un ensemble de six modèles du programme CMIP5 ainsi que leur moyenne d’ensemble, et ensuite de les comparer avec les observations. Un ensemble d’outils statistiques est utilisé par étudier la fiabilité des modèles à simuler les extrêmes hydro-climatiques.

La distribution spatiale des indices extrêmes hydro-climatiques de précipitations a permis de caractériser les zones de précipitations extrêmes sur l’Afrique de l’Ouest en l’occurrence les régions montagneuses et au sud de l’océan atlantique.

Les biais relatifs entre les données CMIP5 et les observations satellitaires montrent une incertitude sur les simulations des événements extrêmes et qui peut s’expliquer par la non maîtrise de la paramétrisation des systèmes météorologiques à fort impacts dans cette région. Cependant, certains indices notamment ceux liés à des seuils donnent une bonne représentation des événements extrêmes sur le Sahel tandis que d’autres liés aux indices relatifs montrent une performance faible des modèles.

Les résultats du changement dans le futur montrent une projection favorable à la diminution de la précipitation moyenne journalière et du nombre de jours consécutifs humides et à l’augmentation de l’intensité moyenne sur les jours de pluies et du nombre de jours consécutifs humides. Ce qui est en accord avec les études antérieures sur l’Afrique de l’ouest.

Mots Clés : Événement extrême ; Précipitation ; Modèle ; Observation ; Scénario ; Projection.

Abstract

This work is an analysis of the hydro-climatic extremes of West Africa during the monsoon period of West Africa (June-July-August-September) over a period of 23 years and obtained from simulations of the CMIP5 program (Phase 5 of the Coupled Model Intercomparison Program). It first consists in determining extreme precipitation indices with a set of six models of the CMIP5 program as well as their overall average, and then comparing them with the observations. A set of statistical tools is used to study the reliability of models to simulate hydro-climatic extremes.

The spatial distribution of the extreme hydro-climatic rainfall indices made it possible to characterize the areas of extreme rainfall over West Africa, in the mountainous regions and south of the Atlantic Ocean.

The relative bias between CMIP5 data and satellite observations shows uncertainty in extreme event simulations and can be explained by the lack of mastery of the parameterization of high impact weather systems in this region. However, some indices, particularly those linked to thresholds, give a good representation of the extreme events on the Sahel while others linked to relative indices show a weak performance of the models.

The results of the change in the future show a favorable projection for the decrease of the average daily precipitation and the number of consecutive wet days and the increase of the average intensity on the days of rain and the number of consecutive wet days. This is in line with previous studies on West Africa.

Keywords : Extreme event ; Precipitation ; Model ; Observation ; Scenario ; Projection.

Liste des Acronymes

- ANACIM** : Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie.
- AR5** : 5th Assessment Report/Cinquième Rapport d'Évaluation (du GIEC).
- ARC2** : African Rainfall Climatology Version 2.
- AMMA** : Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine.
- FIT/ITF** : Front Intertropical / Inter-Tropical Front.
- GES** : Gaz à Effet de Serre.
- GIEC** : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat.
- JEA/AEJ** : Jet d'Est Africain/African Easterly Jet.
- JET/ TEJ** : Jet d'Est Tropical /Tropical Easterly Jet.
- MCG** : Modèles Climatiques Globaux.
- MCR** : Modèles Climatiques Régionaux.
- MOA** : Mousson Ouest Africaine.
- RCP** : Representative Concentration Pathways / Profil Représentatif d'Évolution de Concentration.
- ZCIT/ ITCZ** : Zone de Convergence Intertropicale / Inter-Tropical Convergence Zone.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciement	ii
Résumé / Abstract	iii
Liste des Acronymes	v
Liste des tableaux	ix
Introduction	1
1 Description du Climat de l’Afrique de l’Ouest	3
1.1 Présentation de la Zone d’Étude	3
1.2 Circulation Générale de l’Atmosphère en Afrique de l’Ouest	3
1.2.1 Les Systèmes Convectifs	3
1.2.2 La Mousson Ouest-Africaine (MOA) : Mécanisme et Variabilité	4
1.2.3 Les Éléments de la Mousson Ouest-Africaine	5
1.3 Contexte et Définition des événements extrêmes	7
2 Données et Méthodes	8
2.1 Données Utilisées	8
2.1.1 Les Modèles du CMIP5	8
2.1.2 Les Données d’Observation :	10
2.2 Méthode de traitement des Données	11
2.2.1 Les Indices Hydro-climatiques	11
2.2.2 Les Méthodes statistiques et Outils Utilisés	11
3 Analyse des Résultats et Discussion	13
3.1 Distribution Spatiale des précipitations et des indices extrêmes moyens observés et simulés par les modèles de CMIP5	13
3.2 Évaluation des Biais	18
3.3 Projections Climatiques	23
3.3.1 Évolution future des indices extrêmes hydro-climatiques au Sahel	23
3.3.2 Changement dans le Futur	27
CONCLUSION ET PERSPECTIVE	33
Bibliographie	35
Webographie	38

Table des figures

1.1	Topographie de l’Afrique de l’ouest avec les sous-domaines(Sahel-est, Sahel-centre, Sahel-ouest et la Région Guinéenne) (Sarr et al., 2015)	3
1.2	Les éléments clés de la circulation méridienne en Afrique de l’Ouest. Source : Manuel de Météorologie tropicale-Florent Beucher-Météo-France © - 2010 .	6
2.1	Forçage radiatif, concentration en partie par million (ppm) de masse de CO2 par litre d’air et trajectoires associés pour chaque scénarios (https://www.dkrz.de)	10
3.1	Pluie (mm/jour) en été (JJAS) sur la période 1983-2005 pour l’observation ARC, les modèles du CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean). . . .	15
3.2	Distribution spatiale moyenne du R90p (jours humides) en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour l’observation ARC, les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean)	15
3.3	Distribution spatiale moyenne du R95p (jours très humides) en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour l’observation ARC, les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean)	16
3.4	Distribution spatiale moyenne du CDD en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour l’observation ARC, les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean).	16
3.5	Distribution spatiale moyenne du CWD en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour l’observation ARC, les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean).	17
3.6	Distribution spatiale moyenne du SDII en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour l’observation ARC, les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean).	17
3.7	Distribution spatiale moyenne du RX5DAY en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour l’observation ARC, les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean)	18
3.8	Biais moyen des précipitations en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean).	20
3.9	Biais moyen du R90p en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean).	20
3.10	Biais moyen du R95p en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean).	21
3.11	Biais moyen du SDII en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean).	21
3.12	Biais moyen du R20mm en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean).	22

3.13	Biais moyen du CDD en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour les modèles CMIP5 et leur moyenne d'ensemble (Ensmean).	22
3.14	Biais moyen du CWD en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour les modèles CMIP5 et leur moyenne d'ensemble (Ensmean).	23
3.15	Évolution de la pluie moyenne dans le présent et le futur lointain(JJAS) . .	25
3.16	Évolution du SDII dans le présent et le futur lointain(JJAS)	25
3.17	Évolution du RX5DAY dans le présent et le futur lointain(JJAS)	26
3.18	Évolution du CDD dans le présent et le futur lointain(JJAS)	26
3.19	Évolution du CWD dans le présent et le futur lointain(JJAS)	27
3.20	Changement moyen dans le futur de la pluie moyenne en pourcentage (JJAS)	29
3.21	Changement moyen dans le futur du SDII moyenne en pourcentage (JJAS)	29
3.22	Changement moyen dans le futur du R90p moyenne en pourcentage (JJAS)	30
3.23	Changement moyen dans le futur du R95p moyenne en pourcentage (JJAS)	30
3.24	Changement moyen dans le futur du R90ptot moyenne en pourcentage (JJAS)	31
3.25	Changement moyen dans le futur du R95ptot moyenne en pourcentage (JJAS)	31
3.26	Changement moyen dans le futur du CDD moyenne en pourcentage (JJAS)	32
3.27	Changement moyen dans le futur du CWD moyenne en pourcentage (JJAS)	32

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Définition et Grilles des modèles CMIP5 utilisés.

Tableau 2.2 : Forçage radiatif, concentration en partie par million (ppm) de masse de CO₂ par litre d'air et trajectoire associés pour chaque scénario.

Tableau 2.3 : Liste des Indices de Précipitations et leurs unités.

Introduction

Selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du climat (GIEC), le changement climatique est défini comme étant l'ensemble des évolutions du climat dans le temps, qu'elles soient dues à la variabilité naturelle ou aux activités humaines.

Cette variabilité affecte la plupart des secteurs socio-économiques en Afrique de l'ouest. Les études antérieures (par exemple Kouame et al., 2013; Ly et al., 2013) montrent une tendance au réchauffement sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest qui est selon certains spécialistes à l'origine de différents événements tels que les sécheresses (Giorgi et al., 2014, Sylla et al., 2015). La cause principale de ce réchauffement est l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Solomon et al., 2007, et 2009).

Plusieurs hypothèses ont été donc proposées en vue d'expliquer les causes de cette variabilité climatique :

- ✓la rétroaction positive entre les précipitations et l'albédo local via la modification de la végétation et les processus de surface (Charney, 1975);
- ✓les télé-connexions associées aux variations de températures de surface des océans (Folland et al., 1986);
- ✓la variabilité des ondes est-africaines (Diedhiou et al., 1999; Grist et al., 2002);
- ✓l'augmentation accrue de la concentration des GES dans l'atmosphère (Solomon et al., 2007 et 2009; IPCC, 2007);

Cependant, cette variabilité climatique n'est pas sans conséquences sur les rendements agricoles en particulier les cultures vivrières. Bazzaz et Sombroek (1996) ainsi que Salack et al., (2013) ont montré que le principal moyen de subsistance de la population ouest-africaine est l'agriculture qui est fortement dépendante de la saison des pluies. A cela s'ajoute la position de l'Afrique de l'ouest dans la zone équatoriale ou l'interaction entre l'océan et le continent génère une importante quantité de précipitation.

Certaines études sur les extrêmes climatiques ont été entreprises sur la zone ouest-Africaine. Sarr et al., (2015), Sylla et al., (2015) ont montré que les précipitations seront à la baisse dans le futur lointain. Il est également prévu une augmentation des centiles 95 et 99 et de la durée maximale des séquences sèches.

Ce travail consiste à faire une évaluation des modèles du CMIP5 et une projection du climat futur à l'aide d'indices pluviométriques.

Ainsi, le premier chapitre de notre mémoire présente les éléments caractéristiques du climat ouest-africain. Ensuite nous avons présenté les données et les outils de calculs dans le deuxième chapitre. Le troisième chapitre présente l'ensemble des résultats accompagnés

de discussions suivie de la conclusion et des perspectives.

Description du Climat de l'Afrique de l'Ouest

1.1 Présentation de la Zone d'Étude

L'Afrique de l'ouest est une région qui occupe la partie la plus occidentale du continent Africain avec une superficie d'environ 6.140.000 km².

C'est un ensemble géographique composé par les pays côtiers au nord du golfe de Guinée jusqu'au fleuve Sénégal, les pays couverts par le bassin du fleuve Niger et les pays de l'arrière-pays sahélien.

Pour notre étude, nous avons considéré quatre sous-domaines à savoir le sahel-est, le sahel-centre, le sahel-ouest et la région guinéenne (figure 1.1).

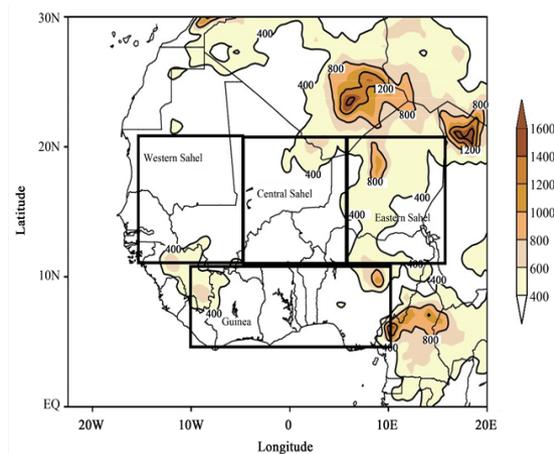


FIGURE 1.1 – Topographie de l'Afrique de l'ouest avec les sous-domaines (Sahel-est, Sahel-centre, Sahel-ouest et la Région Guinéenne) (Sarr et al., 2015)

1.2 Circulation Générale de l'Atmosphère en Afrique de l'Ouest

1.2.1 Les Systèmes Convectifs

Les systèmes convectifs désignent l'ensemble des mouvements internes (verticaux ou horizontaux) qui animent un fluide et qui impliquent alors le transport des propriétés des parcelles de ce fluide au cours de son déplacement dans l'atmosphère.

En Afrique de l'ouest, nous pouvons distinguer trois types de systèmes selon leurs capacités d'alimentation continue en masses d'air instable et humide (Camara, 2006) :

- Les systèmes unicellulaires (isolés) : leur formation se fait à partir de nuages composés d'une cellule unique avec des précipitations limitées au sol.
- L'orage multicellulaire : sa formation n'est possible que lorsque dans les basses couches de l'atmosphère, l'humidité est très forte avec un fort cisaillement du vent accompagné d'une instabilité de l'environnement sur le plan thermodynamique.
- Les systèmes convectifs de méso-échelles : ces systèmes sont à l'origine d'une grande partie des précipitations en Afrique de l'ouest du fait de la présence des lignes de grains qui sont des phénomènes météorologiques créées par la rencontre de deux masses d'air à propriétés différentes. Ces lignes de grains se forment lorsque des orages isolés se rassemblent en une ligne et que cette ligne se déplace avec le vent moyen dans l'atmosphère.

1.2.2 La Mousson Ouest-Africaine (MOA) : Mécanisme et Variabilité

La mousson est définie comme étant un flux de masse d'air, originaire d'un hémisphère géographique et qui s'intègre dans la circulation du second hémisphère. Ce phénomène tire son nom du mot arabe «mausim» qui signifie saison et est causée par la différence de température entre la terre et la mer car la terre s'échauffe et se rafraîchit beaucoup plus vite que la mer.

Selon Beltrando et Chemery(1995), la mousson est source de 80 % de l'eau précipitable pour la moitié de la population mondiale. Elle dépend de certains facteurs tels que les conditions hydriques des surfaces continentales et de la couverture végétale (Janicot, 2000). En Afrique de l'ouest, la formation de la MOA se traduit par la différence importante de température et de pression entre la surface continentale (source de basse pression) et la surface océanique (source de haute pression) entraînant ainsi un transport de masses d'air chargé d'humidité de l'océan vers le continent (Janicot et al., 2012). Une fois au-dessus du continent, ce flux d'air humide est ensuite transporté vers le nord et subit une transformation en systèmes orageux nommés lignes de grain. Ces lignes de grain se déplacent alors d'est en ouest, arrosant toute la région avant d'arriver sur l'atlantique, où ils se transforment parfois en cyclones.

Le cycle saisonnier de la MOA est caractérisé par le mouvement méridien de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) et de la circulation atmosphérique associée. Il peut être résumé en trois étapes qui sont les suivants :

- la pré-onset : il correspond à la phase de pré-mousson (début mai) où la ZCIT migre de 2°N à 5°N ;
- l'onset : il correspond à la phase d'installation de la mousson (fin juin) où la ZCIT migre de 5°N à 10°N ;
- le retrait : il correspond à la phase de retrait de la ZCIT (fin août) vers l'équateur.

Au niveau du Sahel, la MOA constitue la seule épisode de pluie (seulement trois mois). Ce qui entraîne une dépendance totale en ressources en eau, donc en ressources végétales naturelles et cultivées de cette localité (Salack et al., 2013).

La région saharienne joue un rôle important dans le processus de la MOA car elle est

source de basse pression qui renforce la dépression de la ZCIT.

Toutefois, L'étude de la mousson ouest africaine peut se faire à différentes échelles :

✓ à méso-échelles : à cette échelle, l'activité de la ZCIT associée à la MOA peut être réduite pendant plusieurs jours consécutifs.

✓ à grande échelles : échelle temporelle de l'ordre du mois et spatiale de l'ordre de milliers de Km.

Cependant, il existe d'autres types de mousson comme celle de type indien qui présente des différences particulières par rapport à la MOA :

- la MOA a une symétrie zonale alors que la mousson indienne est très complexe,
- la MOA est moins résistante (en termes de précipitations). Ceci se justifie par les années de sécheresses importantes observées au cours du 20ème siècle dans la zone sahélienne.
- d'une année à l'autre, la variation des précipitations est de 40 % pour la MOA et de 10 % pour la mousson indienne.

La ZCIT est une zone de basses pressions formée par la convergence des masses d'air chaudes et humides en provenance des tropiques transportées par les alizés. En mai (juillet), sa position est repérée entre 5°N et 10°N où l'énergie disponible est favorable à la convection (Peyrillé, 2006). Du fait de la présence des systèmes convectifs de méso-échelle au sein de la ZCIT, cet élément de la MOA est à l'origine de la majeure partie des précipitations en Afrique de l'ouest.

L'autre mécanisme qui influence la MOA est la Dépression Thermique Saharienne en anglais «Saharian Heat Low (SHL)» qui est un acteur principal de la MOA. Elle désigne une zone de basse pression qui se forme pendant l'été sous l'effet de la forte chaleur qui existe au-dessus du Sahara. Selon une étude menée par le centre de recherches de Météo-France en 2011, le SHL est une zone qui se réchauffe fortement au passage de la MOA.

1.2.3 Les Éléments de la Mousson Ouest-Africaine

la figure 1.2 est une illustration de la circulation atmosphérique méridienne en Afrique de l'ouest et de ses principaux éléments.

Le Flux de Mousson : c'est un vent de sud-ouest dirigé de l'océan Atlantique vers le continent. Son épaisseur varie de 3000 m sur la mer, à moins de 1000 m vers 15-20 N.

L'Harmathan : il s'agit d'un vent chargé de poussière chaud et sec qui souffle vers le sud-ouest en provenance du Sahara. De décembre à février, il souffle sur l'Afrique de l'ouest et repousse le front intertropical au dessus du golfe de Guinée.

Le FIT : c'est le lieu de convergence entre le flux de mousson et le flux d'Harmatan en basse couche. Cette convergence provoque une ascendance de masse d'air dans la moyenne troposphère au niveau de la ZCIT pour générer des précipitations.

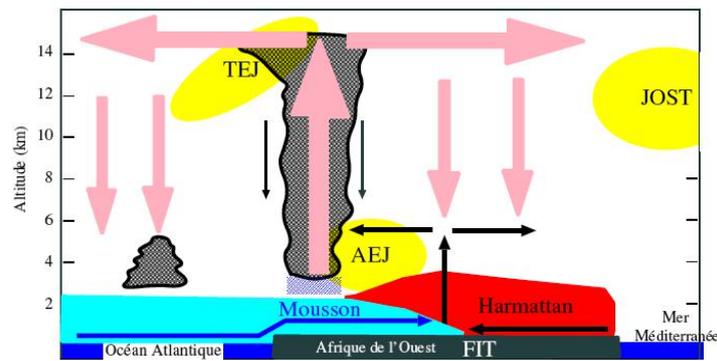


FIGURE 1.2 – Les éléments clés de la circulation méridienne en Afrique de l'Ouest. Source : Manuel de Météorologie tropicale-Florent Beucher-Météo-France © - 2010

Le Jet d'est-africain (JEA) : le JEA est un jet d'échelle régionale qui s'établit en été boréal dans la moyenne troposphère (500-700 hPa) et dont la vitesse maximale est située à 15°N. Il provient d'un fort gradient thermique existant dans les basses couches entre le Sahara et le golfe de Guinée et du renversement de ce gradient méridien en altitude (Burpee, 1972, 1974).

Tout comme la mousson et la ZCIT, son déplacement se fait vers le nord au printemps pour atteindre sa position la plus septentrionale en août, puis redescend vers le sud en automne.

C'est un composant clé pour la météorologie car il est source d'activité ondulatoire dans le domaine ouest-africain. Ce jet participe à l'activité convective dans la mousson avec sa formation d'ondes (source d'énergie) qui se développe autour de son axe entraînant ainsi des circulations cycloniques et anticycloniques qui se déplacent vers l'ouest (Pytharoulis et Thorncroft, 1999 ; Hsieh et Cook, 2008).

Le Jet d'est Tropical (JET) : il est observé pendant la période de mousson à des latitudes situés au sud du FIT et est situé entre 100 et 200 hPa. C'est un vent thermique d'est qui est observé en Afrique de l'ouest entre fin juin et début septembre autour de 10°N avec une force moyenne de 15 à 18 m/s. Il est lié à la différence de température entre les hauts plateaux du Tibet et l'océan indien (Charney, 1962 ; Burpee, 1972, 1974).

Le Jet d'ouest subtropical (JOST) : le JOST est un vent d'ouest situé vers 200 hPa, autour de 30° de latitude nord et tire son origine de la déviation vers la droite des cellules de Hadley. Il permet de transférer l'énergie entre les tropiques et les moyennes latitudes (Burpee, 1972).

Les Ondes d'Est Africaines (OEA) : les ondes d'est-africaines (en anglais, African easterlies waves, abrégé AEW) sont des perturbations atmosphériques d'échelle synoptique (périodes 3-5 jours ou 6-9 jours ; longueurs d'onde 2000-5000 km)(Diedhiou et al., 1999). Ils prennent naissance le plus souvent en avril/mai et se maintiennent jusqu'en octo-

bre/novembre. Les OEA ont pour origine un fort gradient de température et d'humidité et leur propagation se fait d'est en ouest sur le continent ouest-africain dans la troposphère pendant la période de mousson (Leroux, 2009).

D'autres théories sur le mécanisme de formation des OEA ont aussi été proposées comme Burpee (1972) qui a démontré que les OEA ont pour origine une instabilité du courant jet d'est-africain.

1.3 Contexte et Définition des événements extrêmes

Qu'entendons-nous par événement climatique extrême ? Quels liens faisons-nous entre événements climatiques extrêmes et changement climatique ?

Nous pouvons trouver la réponse dans le quatrième rapport annuel du GIEC (2007) ou un événement extrême est défini comme suit : "événement météorologique qui est rare en un lieu et à une époque de l'année. Les définitions de « rare » varient, mais un événement météorologique extrême est normalement aussi rare ou plus rare que le 10ème ou 90ème centile de la fonction de densité de probabilité observée".

Pour notre étude, nous considérerons donc qu'un événement est extrême lorsque des valeurs inhabituelles sont atteintes par un ou plusieurs indices étudiés. Les valeurs annuelles maximales des indices utilisées peuvent également servir d'analyse des extrêmes climatiques .

Trois classes d'indices de précipitations recommandées par l'ETCCDI sont donc utilisées :
✓les indices à seuil utilisant des centiles de précipitations journalières pour calculer la pluviométrie totale résultant d'événement extrêmes.

✓les indices absolus exprimés en nombre de jours par période (CDD, CWD, etc).

✓les indices à intensités qui sont exprimés en mm par période comme l'intensité moyenne sur les jours de pluies (SDII).

Cependant, le problème avec les définitions de seuil des extrêmes pluviométriques est que les seuils seront dépassés à des valeurs différentes d'une région à une autre.

Données et Méthodes

2.1 Données Utilisées

2.1.1 Les Modèles du CMIP5

Le programme mondial de recherche sur le climat (WCRP : World Climate Research Programme) qui a pour objectif l'utilisation des modèles de circulation général (MCG) et de modèles de circulation régional (MCR), a lancé en 2008 le projet mondial d'inter-comparaison des modèles phase 5 (CMIP5) (Taylor et al. 2011) qui est une continuation de la phase 3.

Les conclusions issues du CMIP5 ont constitué des éléments clés dans le développement des projections climatiques pour le rapport du groupe de travail AR5 du Groupe Intergouvernemental pour l'Étude du Climat (GIEC). En effet, différents groupes de recherche à travers le monde se sont coordonnés pour réaliser des simulations dans le but d'avoir une meilleure compréhension de notre système climatique mais également d'évaluer les différences entre les modèles climatiques.

Dans le cadre de ce travail, des modèles (voir tableau 1) du projet CMIP5 ont été utilisés. Ces modèles ont été conçus dans des centres de recherches du monde avec des paramétrisations ou bien des conditions initiales différentes. Parmi les modèles utilisés dans le programme CMIP5, nous en avons extrait les cinq qui suivent :

Tableau 2.1 : Définition et Grille des modèles CMIP5 utilisés

Modèles	Définition	Institution	Grille
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques - Coupled Model 5	CNRM(France)	0.5°x0.5°
CSIRO-Mk3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	CSIRO(Australie)	0.5°x0.5°
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory coupled model 3	GFDL(USA)	0.5°x0.5°
MIROC5	Model for Interdisciplinary Research On Climate 5	CCSR(Japon)	0.5°x0.5°
MPI-ESM-LR	Max Planck Institut-Earth System Model on Low Résolution	MPI-ESM(Allemagne)	0.5°x0.5°

Le CNRM-CM5 : ce modèle est un fruit de la collaboration entre le Centre National de Recherches Météorologiques-Groupe d'Études de l'Atmosphère Météorologique (CNRM-GAME) et le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée (CERFAGS).

Il a la capacité de reproduire le climat actuel et la variabilité climatique à des échelles de temps du mois au siècle (Alias et al., 2010).

Le CSIRO-Mk3-6-0 : ce modèle d'origine australienne a participé à la cinquième phase du projet d'inter-comparaison des modèles couplés grâce au partenariat entre l'organisation de recherche industrielle du Commonwealth et le Centre d'excellence du Queensland sur les changements climatiques (Collier et al., 2007).

Le GFDL-CM3 : C'est un modèle américain et qui a déjà contribué aux rapports antérieurs du GIEC. Cette version 3 du GFDL est établie avec les mêmes composantes océaniques que la précédente (CM2.1) mais avec plus de développement sur l'atmosphère (Griffies et al., 2011).

Le MIROC5 : le MIROC5 est la cinquième version du modèle de circulation générale MIROC, qui a été amélioré par le centre de recherche sur le système climatique basé au Japon (Watanabe et al., 2010).

MPI-ESM-LR : c'est un modèle qui a servi d'expériences de changement climatique pour des forçages de CO₂ dans le CMIP5 (REICK et al., 2013). Il a été développé à l'institut Max-Planck qui est un institut de recherche extra-universitaire sur la météorologie et la climatologie basé à Hambourg (Allemagne).

Les sorties des modèles du CMIP5 sont composées de données historiques couvrant la période 1950 à 2005 et de données de projections climatiques allant jusqu'en 2100. Les indices hydro-climatiques utilisés sont calculés à partir d'un pas de temps journalier. Les projections climatiques de modèles sont conçues en se basant sur des descriptions possibles de l'évolution des changements socio-économiques, des changements technologiques, des GES et des polluants atmosphériques (Moss et al., 2010) futurs appelés scénarios. Ainsi, trois possibles scénarios appelés en anglais RCP ont été utilisés dans ce travail pour décrire le climat futur :

- **RCP 2.6** : Cette voie d'émission vise à limiter l'augmentation de la température moyenne globale à 2°C. Développé par l'équipe de modélisation IMAGE de l'agence d'évaluation environnementale néerlandaise, le rcp 2.6 simule très souvent des émissions négatives de la consommation d'énergie.

- **RCP 4.5** : il a été développé à l'institut de recherche sur les changements globaux du Pacific Northwest National Laboratory (JGCRI) aux États-Unis. C'est un scénario de stabilisation avec un forçage de $4.5w/m^2$ (Clarke et al., 2007).

- **RCP 8.5** : ce scénario est une combinaison d'hypothèses de croissance démographique qui correspond à la voie d'émission de GES la plus élevée avec un forçage radiatif de $8.5w/m^2$ (Riahi et al., 2011). Il a été développé par l'institut international pour l'analyse des systèmes appliqués (IIASA) basé en Autriche.

Par rapport aux scénarios précédents, le rcp 8.5 présente comme autres objectifs :

- ✓ de projeter spatialement la pollution atmosphérique,

- ✓ d'améliorer les projections d'utilisation des terres et de changement de couverture des terres,

La figure 5 suivante montre un exemple d'évolution des émissions suivant les trois scénarios utilisés :

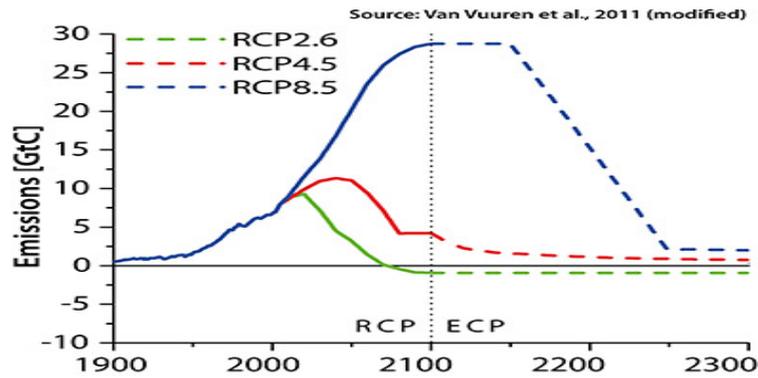


FIGURE 2.1 – Forçage radiatif, concentration en partie par million (ppm) de masse de CO2 par litre d'air et trajectoires associés pour chaque scénarios (<https://www.dkrz.de>)

Le tableau 2.2 présente de manière plus concise les différents caractéristiques des trois scénarios utilisés :

Tableau 2.2 : Forçage radiatif, concentration en partie par million (ppm) de masse de CO2 par litre d'air et trajectoire associés pour chaque scénario.

NOM	Forçage radiatif	Concentration (ppm)	Trajectoire
RCP 2.6	Pic à environ $3w/m^2$ avant 2100 puis déclin	Pic à environ 490 eq-CO2 avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin
RCP 4.5	Environ $4,5w/m^2$ au niveau de stabilisation après 2100	Environ 660 eq-CO2 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 8.5	$> 8,5w/m^2$ en 2100	> 1370 eq-CO2 en 2100	Croissante

2.1.2 Les Données d'Observation :

Dans cette étude, nous avons utilisé des données journalières d'observation avec une résolution horizontale de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ et qui sont obtenues pour la période allant de 1983 à 2016 (soit 34 ans). Il s'agit des données de l'African Rainfall Climatology version 2 appelé ARC2.

L'ARC2 est un nouvel jeu de données d'estimation quotidienne des précipitations pour la zone africaine. C'est un ensemble de données provenant de deux sources principales :

✓des données centrées sur l'Afrique de type infrarouges géostationnaires (IR) à trois heures provenant de l'organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques

(EUMETSAT) ;

✓des observations de stations de mesure du système mondial de télécommunication (en anglais Global Telecommunication System ou GTS) contrôlées par la qualité rapportant des accumulations de précipitations de 24 heures sur l’Afrique ;

Par rapport à la version précédente, l’ARC2 présente des améliorations avec l’usage de données infrarouges géostationnaires (IR) et est compatible avec divers sources de données tels que le GPCP (Global Précipitation Climatology Project) et le CPC (Climate Prediction Center) (Novella et al., 2011).

2.2 Méthode de traitement des Données

2.2.1 Les Indices Hydro-climatiques

Les indices sont conçus pour caractériser, diagnostiquer ou quantifier les effets des variations climatiques sur notre environnement.

Dans notre étude, nous avons utilisées les indices de précipitations présentés dans le tableau 3 comme définis par Zhang et al., (2011) :

Tableau 2.3 Liste des Indices de Précipitations et leurs unités

Indices	Définition	Unité
R90p	Nombre de jours annuel avec une pluviométrie \geq 90e centile	jour
R95p	Nombre de jours annuel avec une pluviométrie \geq 95e centile	jour
R90ptot	Pourcentage du total des précipitations en raison du 90e centile	%
R95ptot	Pourcentage du total des précipitations en raison du 95e centile	%
RX5DAY	maximum de précipitations sur cinq jours consécutifs	mm/5jour
R20mm	nombre de jours par période de temps RR \geq ou égal à 20mm	jour
CDD	nombre de jours secs consécutifs (précipitation $<$ 1 mm)	jour
CWD	nombre de jours humides consécutifs (précipitation $<$ 1 mm)	jour
SDII	moyenne des précipitations sur les jours de pluie	mm

Il faut signaler que nous avons utilisé trois types d’indices extrêmes :

- ✓Les indices absolus : qui sont exprimés en nombre de jours.
- ✓Les indices à seuil : utilisant des centiles de précipitations journalières.
- ✓Les indices à intensités : qui permettent de traduire les intensités de pluies.

2.2.2 Les Méthodes statistiques et Outils Utilisés

Pour mener à bien cette étude, nous avons fait usage de différents outils qui nous ont servi de calcul et de représentation des différents indices :

La Moyenne (M) : cet outil statistique permet d'obtenir la valeur moyenne de toutes les données. Sa formule est donnée comme suit :

$$M = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^n x(i)$$

où $\mathbf{x(i)}$ représente la pluviométrie de l'année \mathbf{i} et \mathbf{N} le nombre d'années.

Le Biais (BI) : le biais est une méthode qui permet d'engendrer des erreurs dans les résultats d'une étude. Il est défini comme étant la différence entre la valeur mesurée (modèle CMIP5) et la valeur observée (ARC par exemple). Sa formule est exprimée comme suit :

$$BI = (Modèle - Observation)$$

Le Pourcentage de Changement (PC) : Il permet d'évaluer le taux de changement d'un indices entre deux périodes en se basant sur une période référence. Sa formule est donnée par :

$$PC = \frac{[(Projection - Historical)100]}{Historical}$$

Nous avons utilisé également des logiciels de traitement des données tels que le Climate Data Operator ou (CDO). Le CDO est un ensemble d'opérateurs de ligne de commande pour le traitement standard des données climatiques. Pour plus d'information consulter : (<https://en.wikipedia.org/wiki/ClimateDataOperators>).

Le logiciel NCL a été aussi utilisé, c'est un simple langage de programmation gratuit conçu spécifiquement pour le traitement et la visualisation des données scientifiques (<https://www.ncl.ucar.edu/overview.shtml>).

Analyse des Résultats et Discussion

Cette partie traite les différents résultats obtenus à partir des calculs avec les séries de données. Tout d'abord, des résultats sur la climatologie moyenne produits avec les données du CMIP5 et de l'observation ARC (1983-2005), sont présentés et analysés. Il en va de même que la performance des modèles à représenter la précipitation en Afrique de l'Ouest. Par la suite, la distribution moyenne des indices hydro-climatiques extrêmes obtenus à partir des simulations du CMIP5 sont présentées et analysées. Et enfin dans la dernière partie, nous présentons les taux de changement de ces indices extrêmes dans le futur, en tenant en compte des scénarios de changement du climat (RCP26, RCP48, RCP85).

3.1 Distribution Spatiale des précipitations et des indices extrêmes moyens observés et simulés par les modèles de CMIP5

Cette partie présente la distribution de la climatologie moyenne de la précipitation et des indices hydro-climatiques extrêmes pendant la saison de mousson ouest-africaine. Nous avons posé l'hypothèse qu'un jour est considéré pluvieux si l'intensité de la précipitation (RR) est au moins égale à 1 mm, c'est à dire $RR \geq 1mm$.

La figure 3.2 présente la distribution spatiale moyenne de la pluie en été (JJAS) sur la période 1983-2005 obtenue avec pour les données d'observation (ARC) et les différents modèles ainsi que leur moyenne d'ensemble. L'observation ARC présente une structure zonale de la pluie qui diminue du sud vers le nord avec de fort taux de précipitations localisées sur les régions orographiques : les montagnes du Fouta Djallon ($10^{\circ}N$; $13^{\circ}W$), les plateaux du Joss ($10^{\circ}N$; $7.5^{\circ}E$) au Nigéria et le Mont Cameroun ($6^{\circ}N$; $12^{\circ}E$). Les différents modèles ainsi que leur moyenne d'ensemble reproduisent bien cette structure zonale de la pluie ainsi que les maxima. Les modèles CNRM-CM5 et MPI-ESM-LR simulent une forte extension de la bande de pluie vers le sud comparés à l'observation ARC et aux autres modèles. Ces fortes précipitations simulées autour des zones orographiques sont en accord avec les travaux de Camara et al., (2013). La zone sahélienne est caractérisée par de faibles précipitations comprises entre 3 et 7 mm/jour.

Les figures 3.3 et 3.4 montrent respectivement les pourcentages moyens de nombres de jours humides ($R90p$) et de jours très humides ($R95p$) en été (JJAS) sur la période 1983-2005, obtenus avec l'observation ARC et les différents modèles ainsi que leur moyenne

d'ensemble. L'observation ARC situe les maxima pourcentages de jours humides et de jours très humides sur le Golfe de Guinée et au nord du Sahel. Elle montre de grandes valeurs de pourcentage de jours humides et très humides (jusqu'à 50 %) au niveau du Golfe de Guinée comparées à la moyenne d'ensemble, dont le pourcentage est de 30 % sur la même zone. Les modèles pris individuellement présentent les mêmes variations du 90ème centile que la moyenne d'ensemble à l'exception du modèle MPI-ESM-LR. Le 95ème centile est bien représenté par le CSIRO-Mk3-6-0 et le MIROC5, ce qui n'est pas le cas pour le reste des modèles.

La figure 3.5 présente le nombre de jours consécutifs secs (CDD). L'observation ARC présente une symétrie zonale avec des maxima obtenus le long du golfe de Guinée et sur le nord du Sahel. À l'exception du modèle CNRM-CM5, tous les autres modèles ainsi que la moyenne d'ensemble reproduisent bien cette distribution mais avec des nombres de jours consécutifs secs moins importants sur le Golfe de Guinée (15 jours) et sur le nord du Sahel. Les minima sont observés sur le sahel avec 10 jours consécutifs. La distribution spatiale du nombre de jours consécutifs humides présente une structure opposée à celle des CWD (figure 3.6). L'observation ARC montre des maxima (environ 10 jours) sur le sahel. Ce qui bien reproduit par les modèles ainsi que leur moyenne d'ensemble avec cette fois-ci des maxima de 18 jours consécutifs.

La distribution spatiale du RX5DAY est illustrée sur la figure 3.7 où l'observation montre des maxima au niveau du Fouta Djallon et du Mont Cameroun avec environ 100 mm. Les modèles ainsi que leur moyenne d'ensemble présente des structures différentes à celle de l'observation. Le modèle GFDL-CM3 présente de faibles intensités (environ 30 mm). La moyenne d'ensemble et le reste des modèles présentent les maxima sur l'Océan Atlantique, la région Guinéenne et le sud du sahel.

Concernant l'intensité du nombre de jours pluvieux (figure 3.8), l'observation ARC montre une distribution presque constante (environ 10 mm/jour) sur toute la zone ouest-africaine. Cette distribution est assez bien reproduite par le modèle GFDL-CM3, ce qui n'est pas le cas pour le reste des modèles et la moyenne d'ensemble. Les maxima sont obtenus sur le Golfe de Guinée et sur l'Océan Atlantique avec des intensités beaucoup plus importantes pour les modèles et leur moyenne d'ensemble (environ 30 mm) que pour l'observation (environ 17 mm).

3.1. Distribution Spatiale des précipitations et des indices extrêmes moyens observés et simulés par les modèles de CMIP5

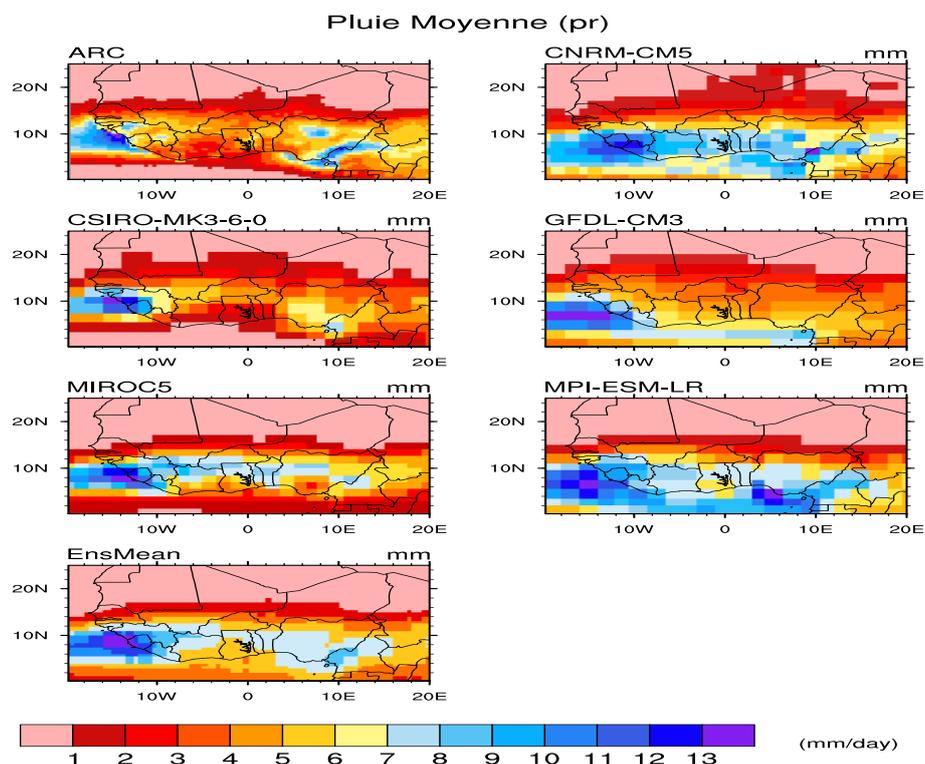


FIGURE 3.1 – Pluie (mm/jour) en été (JJAS) sur la période 1983-2005 pour l’observation ARC, les modèles du CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean).

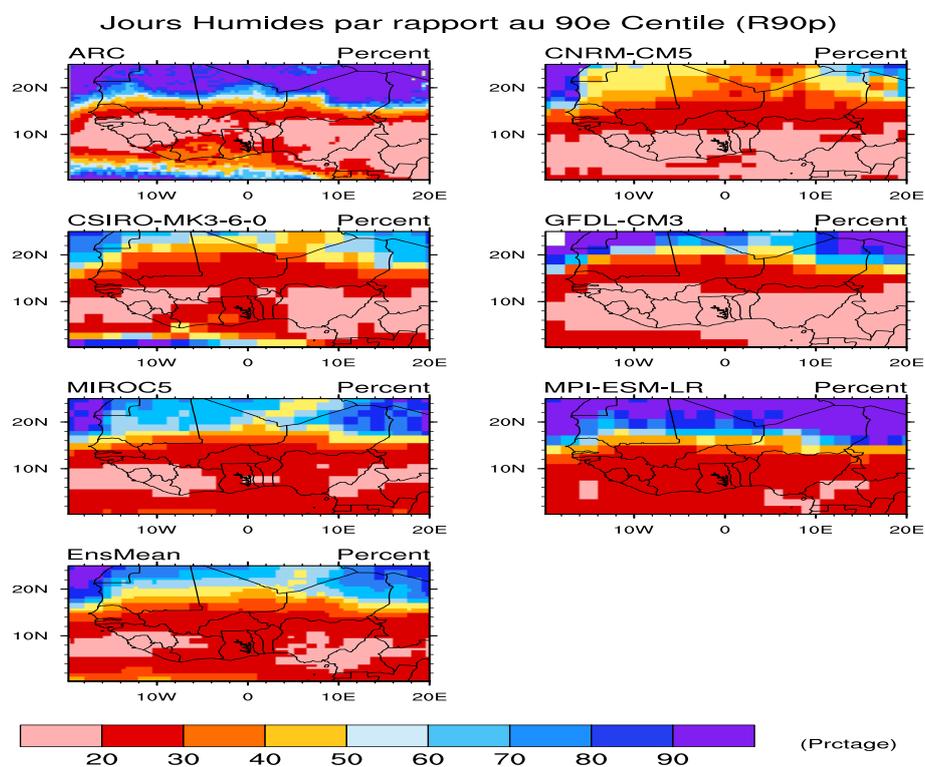


FIGURE 3.2 – Distribution spatiale moyenne du R90p (jours humides) en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour l’observation ARC, les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean)

3.1. Distribution Spatiale des précipitations et des indices extrêmes moyens observés et simulés par les modèles de CMIP5

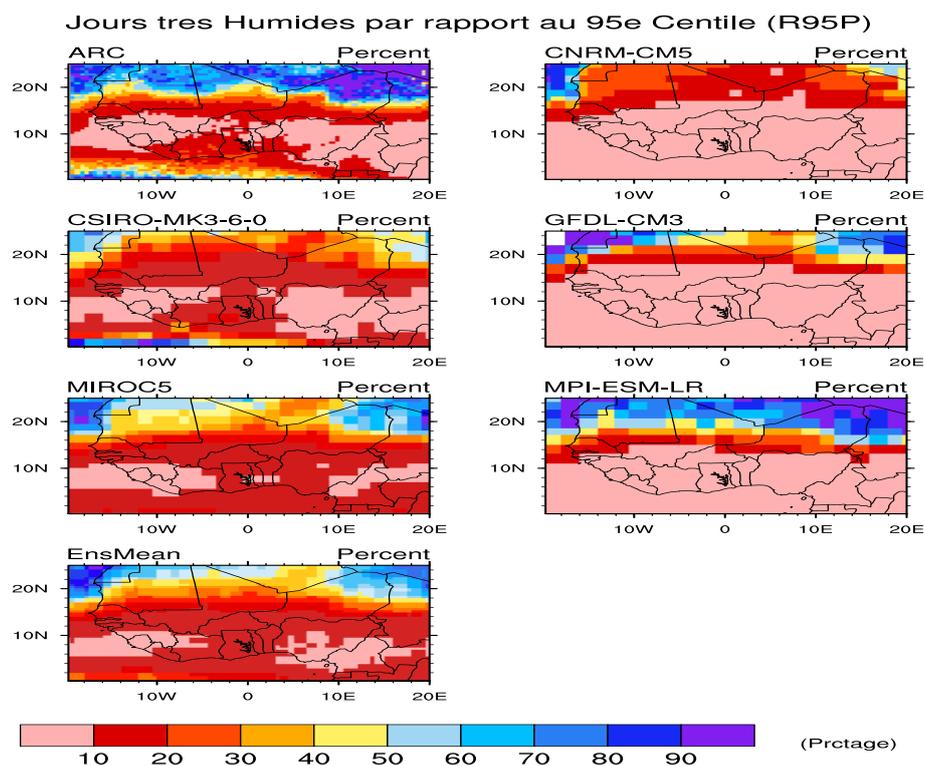


FIGURE 3.3 – Distribution spatiale moyenne du R95p (jours très humides) en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour l’observation ARC, les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean)

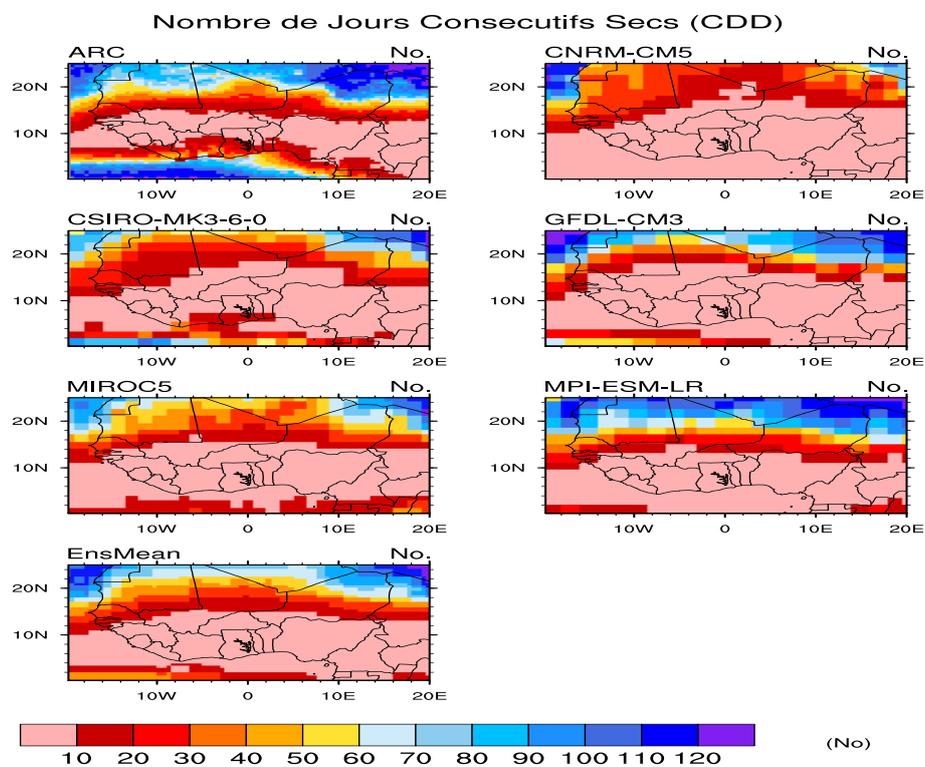


FIGURE 3.4 – Distribution spatiale moyenne du CDD en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour l’observation ARC, les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean).

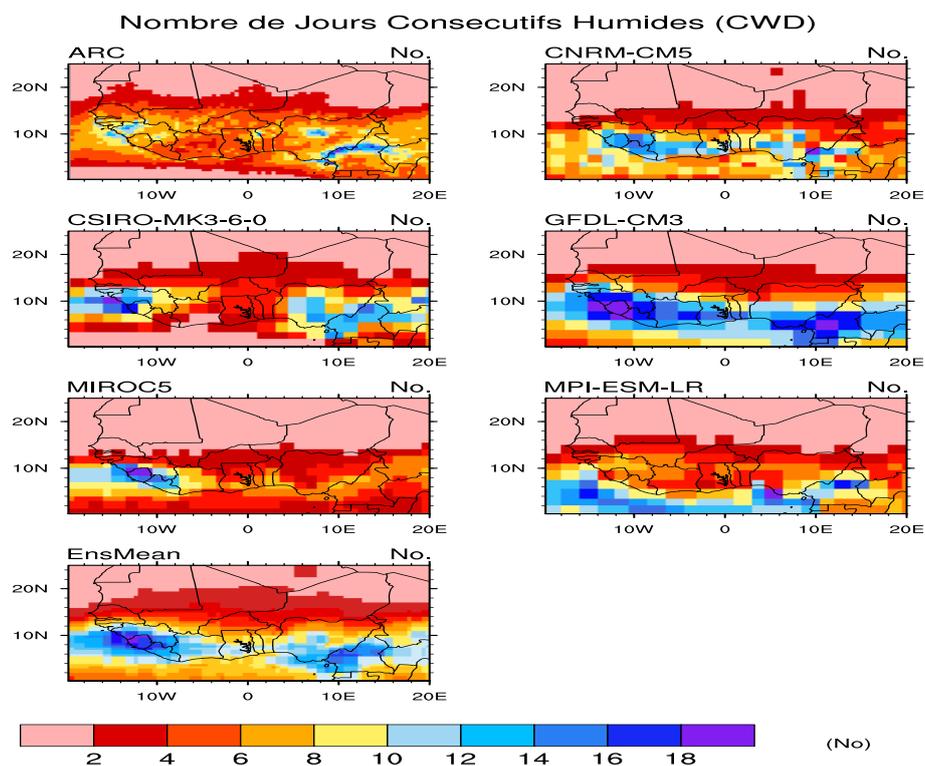


FIGURE 3.5 – Distribution spatiale moyenne du CWD en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour l’observation ARC, les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean).

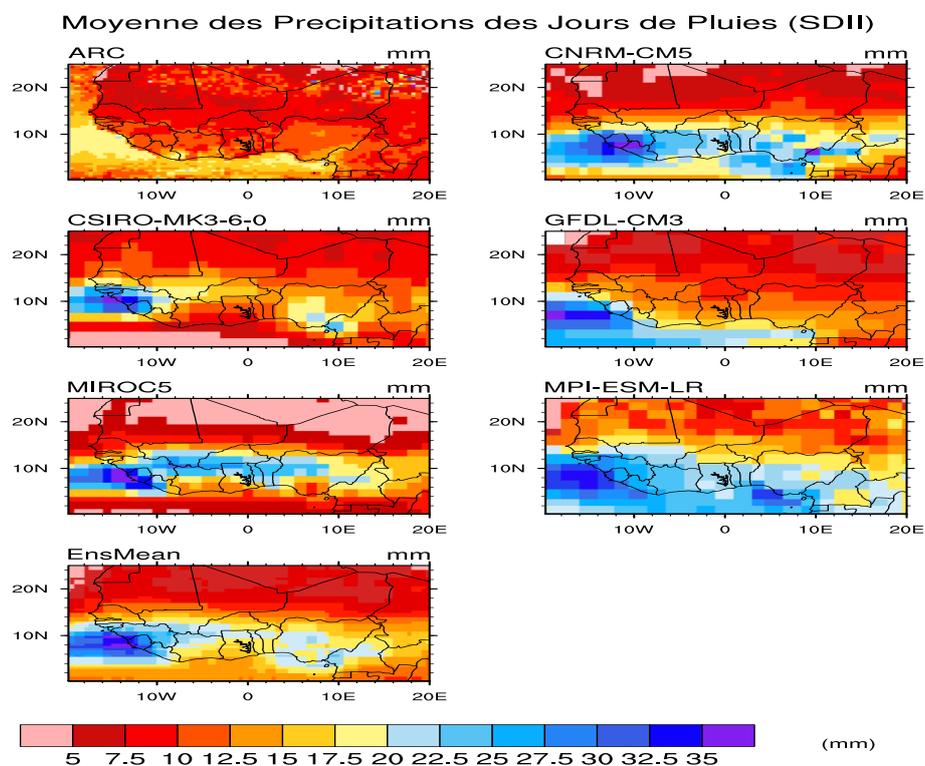


FIGURE 3.6 – Distribution spatiale moyenne du SDII en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour l’observation ARC, les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean).

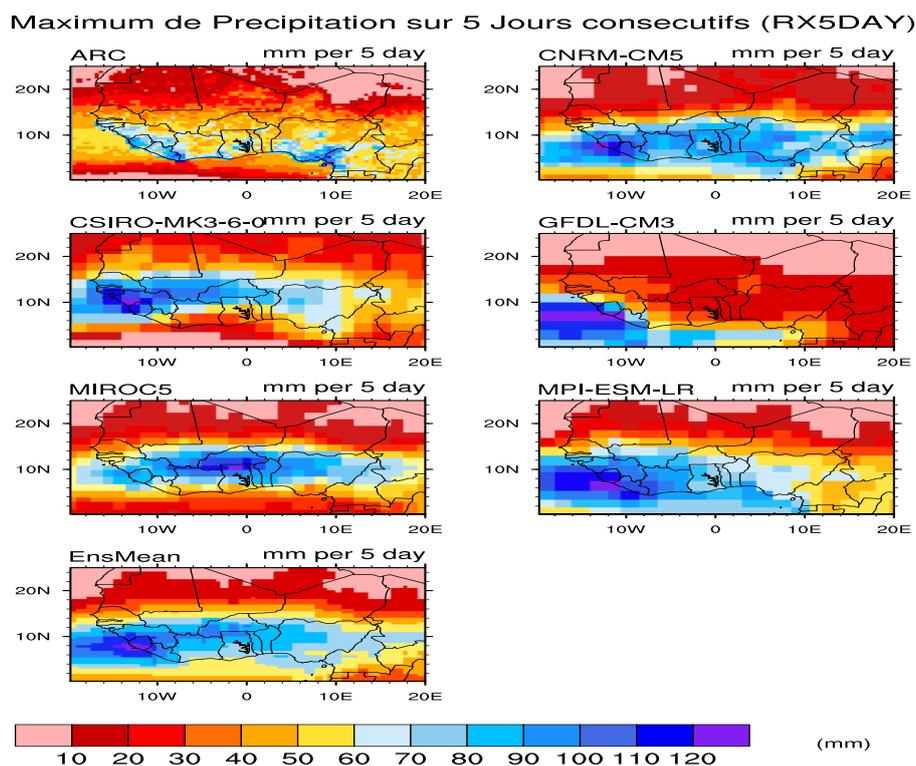


FIGURE 3.7 – Distribution spatiale moyenne du RX5DAY en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour l’observation ARC, les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean)

En somme, les distributions spatiales de précipitation et d’indices extrêmes hydro-climatiques simulées traduisent en quelque sorte la climatologie moyenne de l’Afrique avec quelques localités où les modèles surestiment ou sous-estiment les observations. Elles nous montrent également qu’en cette période de mousson, les précipitations sont plus importantes dans les zones orographiques (Fouta Djalon, Plateaux de JOS) et au niveau de l’océan.

3.2 Évaluation des Biases

Dans cette partie, nous évaluons la performance des modèles du CMIP5 en utilisant le biais c’est à dire la différence entre l’observation ARC et les simulations. Cette méthode d’évaluation a été utilisée dans de nombreuses études (Nikulin et al., 2012; Camara et al., 2013; Diallo et al., 2012).

Sur la région guinéenne où le maximum de précipitation est généralement observé, on observe des biais humides sur les modèles et leur moyenne d’ensemble à l’exception du modèle CSIRO-Mk3-6-0 qui montre des biais secs (figure 3.9). Au niveau du domaine sahélien, les modèles et la moyenne d’ensemble montrent des biais secs qui sont plus importants sur le Nord du Sénégal. Au niveau de l’Océan et sur le Golfe de Guinée, on observe que des biais humides très importants.

Les figures 3.10 et 3.11 illustrent respectivement les biais des centiles R90p et R95p. Pour le R90p, nous observons pour tous les modèles et leur moyenne d'ensemble, une sous-estimation sur toute la zone guinéenne et sur le Sahel-est et le Sahel-centre à l'exception du modèle MPI-ESM-LR qui présente un biais positif sur le Sahel. Sur le Sahel ouest, on observe des biais positifs en particulier sur le Nord du Sénégal. Le R95p présente une distribution similaire à celle du R90p mais différent de par les valeurs. En plus, on observe des surestimations sur le Sénégal qui sont plus importantes au nord avec le modèle CNRM-CM5.

Ces résultats de biais de précipitations et des centiles R90p et R95p sont en accord avec ceux de SARR et al., 2015 et SYLLA et al., 2016, qui ont utilisé quand à eux des modèles climatiques régionaux.

La distribution moyenne des biais de SDII est présentée sur la figure 3.12. La plus forte surestimation observée sur les modèles et leur moyenne d'ensemble, est en générale notée sur le domaine du Fouta Djallon. Pour le reste du domaine d'étude, les modèles présentent plutôt une sous-estimation qui est plus important sur le sahel-est.

Au niveau du golfe de Guinée et sur l'Océan Atlantique, on observe une sous-estimation pour tous les modèles ainsi que leur moyenne d'ensemble.

Pour le nombre de jours de pluies très intenses (R20mm), une surestimation est observée sur le Golfe de Guinée et les régions guinéennes avec la moyenne d'ensemble et les modèles CNRM-CM5, MIROC5, MPI-ESM-LR contrairement au CSIRO-Mk3-6-0 qui présente cette surestimation sur la région Sahélienne (figure 3.13). Le modèle GFDL-CM3 sous-estime le R20mm sur toute l'étendue de la zone.

La distribution des biais du nombre de jours consécutifs secs (CDD) et du nombre de jours consécutifs humides (CWD) sont illustrées respectivement par les figures 3.14 et 3.15. Sur le golfe de Guinée et sur l'océan Atlantique, on observe une forte sous-estimation du CDD présentée par les modèles pris individuellement. La moyenne d'ensemble et les modèles présentent des sous-estimations sur la région guinéenne et sur le sahel même si une surestimation est présentée sur le Sahel-ouest par les modèles CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0.

Pour le CWD, une surestimation est présenté par les modèles et la moyenne d'ensemble sur toute la zone ouest-africaine et qui est plus importante sur le domaine du Fouta djallon.

Ces différences remarquées entre les modèles et l'observation peuvent être dues d'une part à la différence de résolution entre les modèles du CMIP5 (qui sont des modèles climatiques globaux) et l'observation (Sylla et al., 2013) et d'autres part à une insuffisance de mesure et aux problèmes de mesures satellitaire associée aux processus de précipitations.

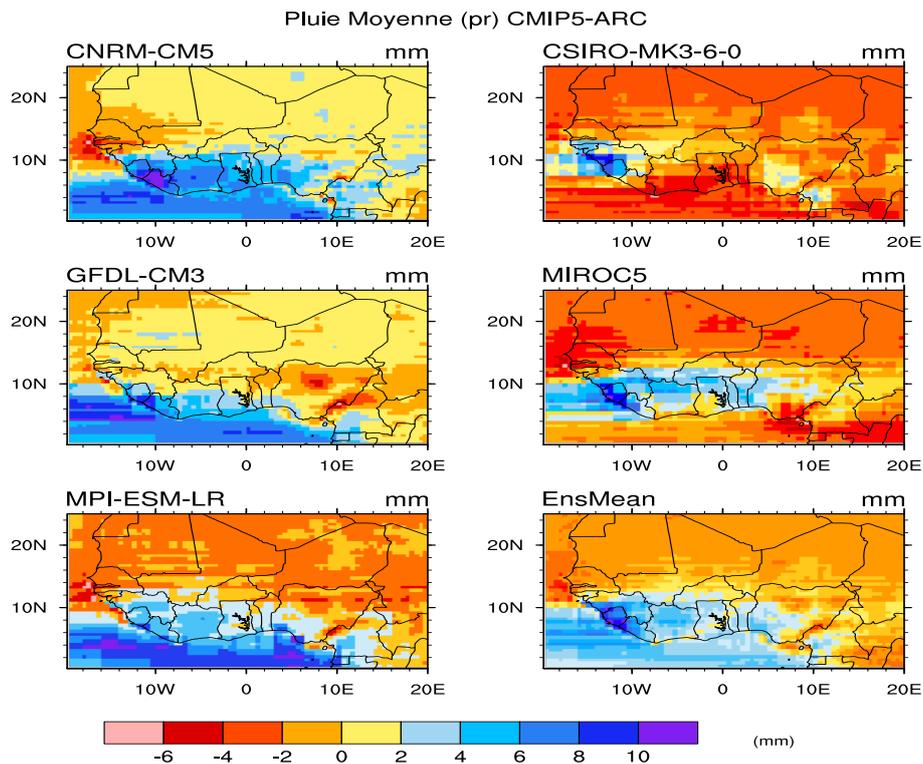


FIGURE 3.8 – Biais moyen des précipitations en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour les modèles CMIP5 et leur moyenne d'ensemble (Ensmean).

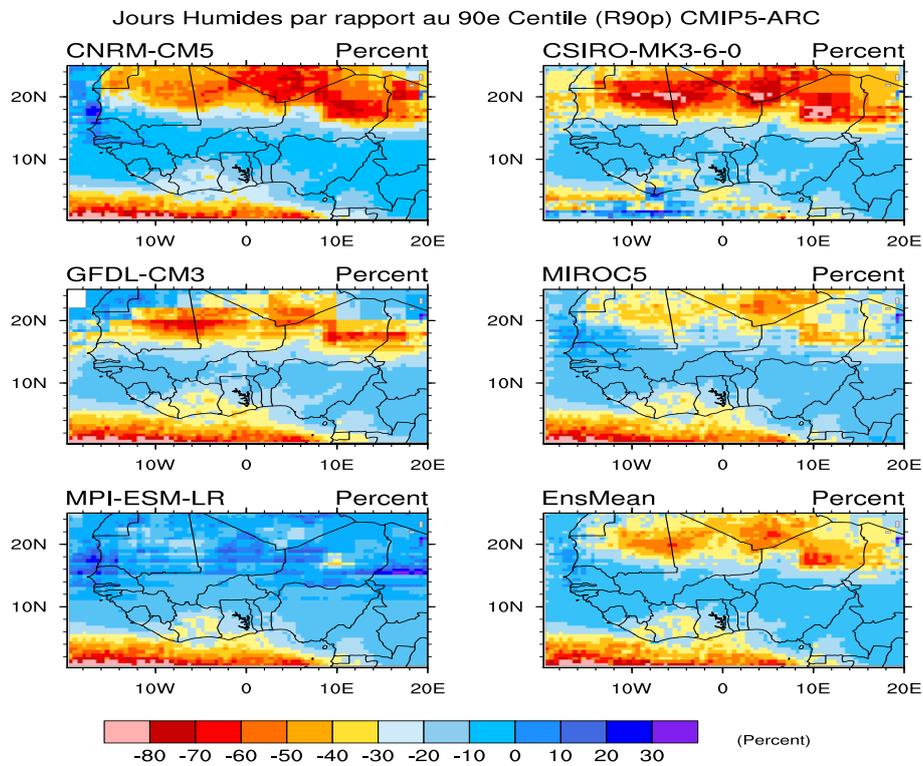


FIGURE 3.9 – Biais moyen du R90p en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour les modèles CMIP5 et leur moyenne d'ensemble (Ensmean).

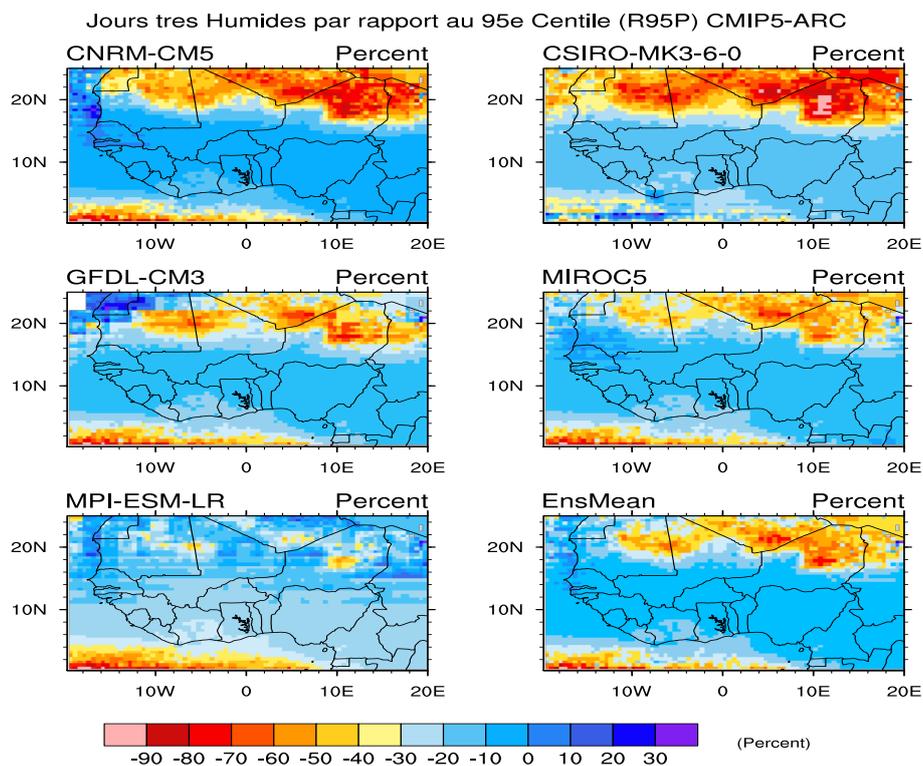


FIGURE 3.10 – Biais moyen du R95p en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour les modèles CMIP5 et leur moyenne d'ensemble (Ensmean).

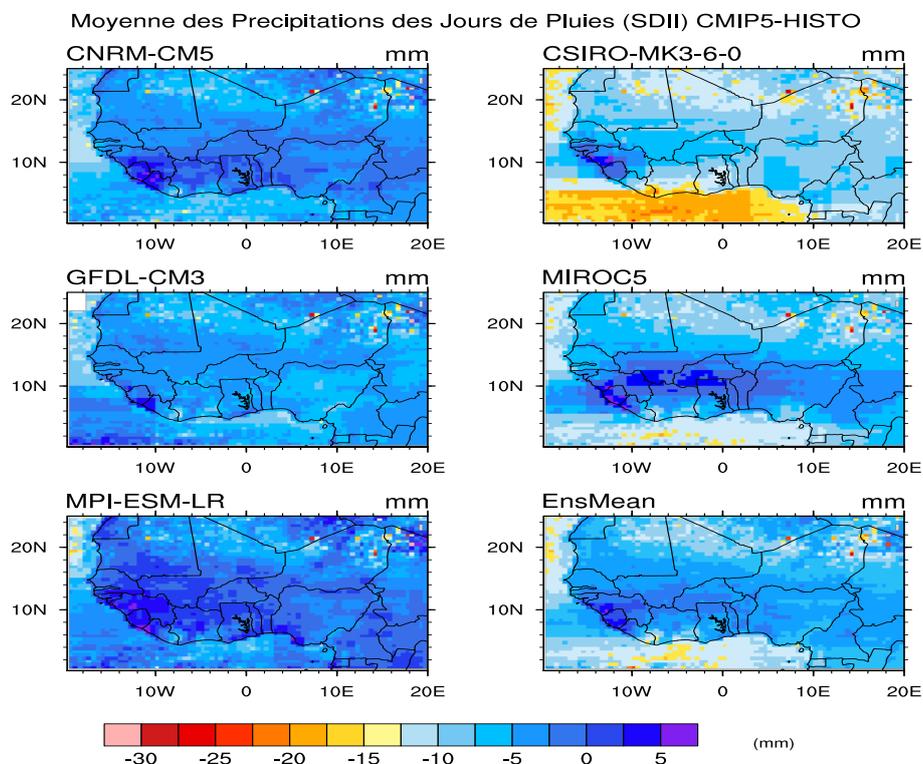


FIGURE 3.11 – Biais moyen du SDII en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour les modèles CMIP5 et leur moyenne d'ensemble (Ensmean).

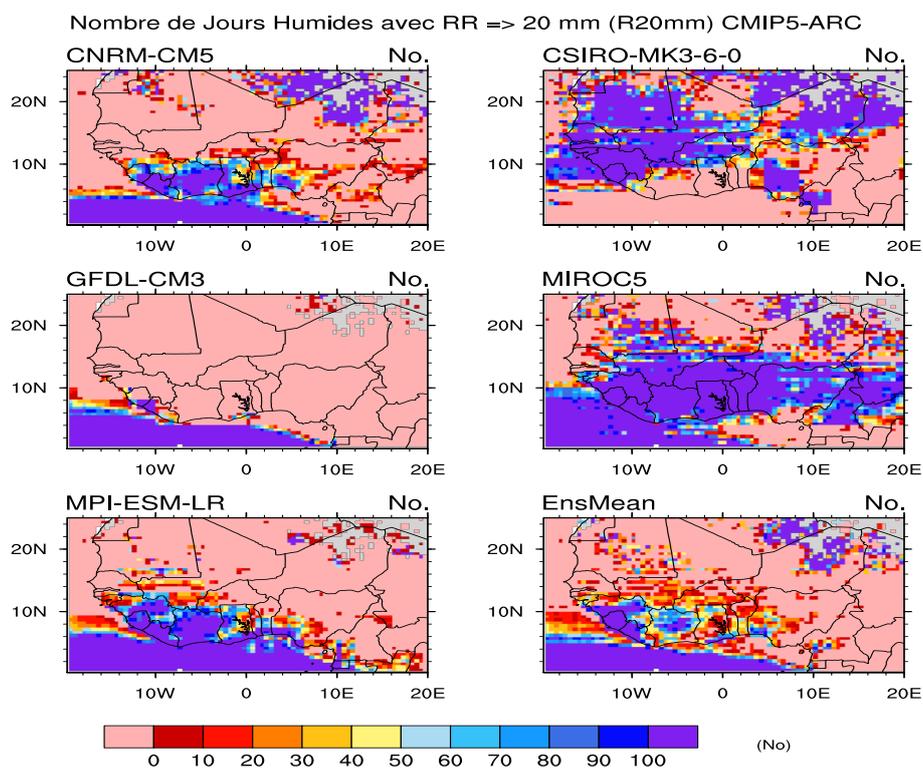


FIGURE 3.12 – Biais moyen du R20mm en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour les modèles CMIP5 et leur moyenne d'ensemble (Ensmean).

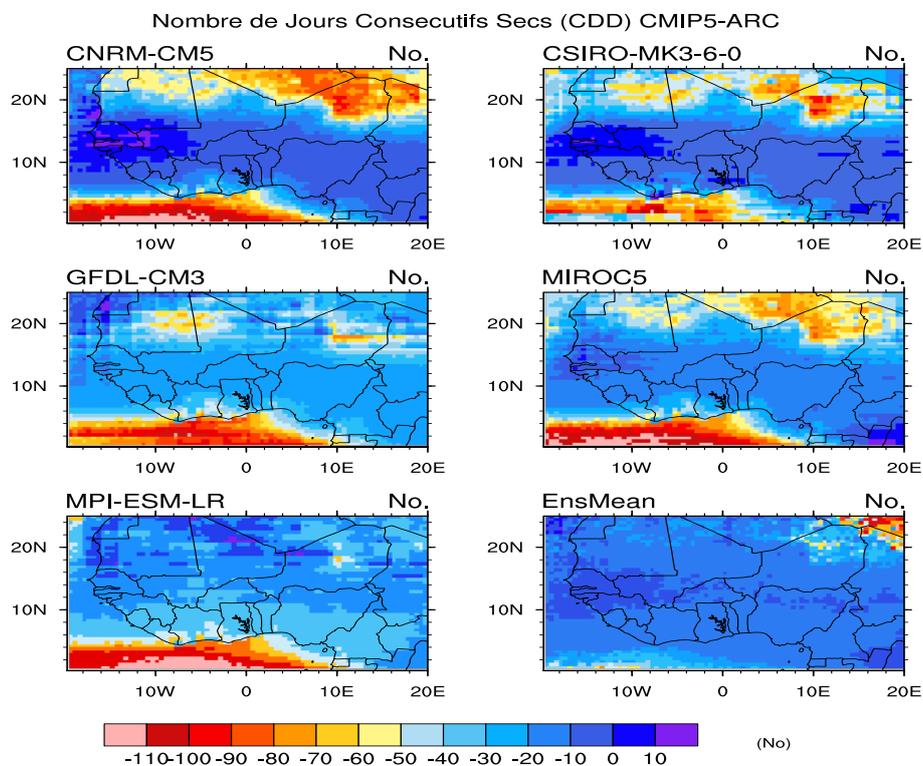


FIGURE 3.13 – Biais moyen du CDD en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour les modèles CMIP5 et leur moyenne d'ensemble (Ensmean).

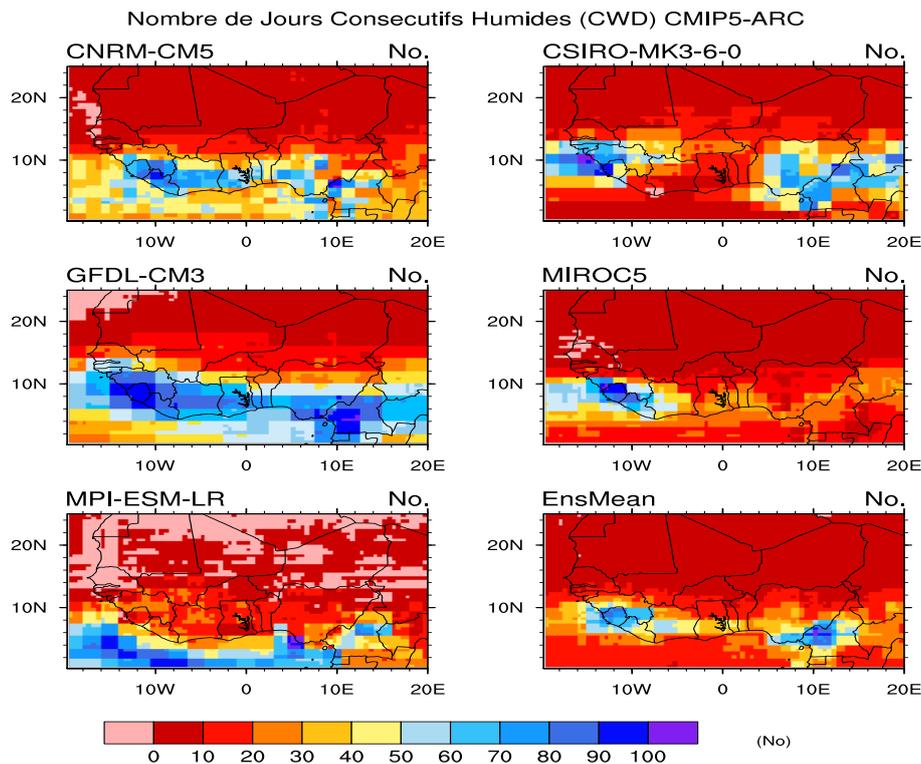


FIGURE 3.14 – Biais moyen du CWD en été (JJAS) de 1983 à 2005 pour les modèles CMIP5 et leur moyenne d’ensemble (Ensmean).

3.3 Projections Climatiques

Il s’agit dans cette partie d’évaluer les tendances des extrêmes climatiques (indices extrêmes et précipitations) à partir des simulations pour corriger efficacement les séries des modèles en vue d’une analyse des extrêmes. Les taux de changement sont évalués également pour chacun des indices extrêmes hydro-climatiques étudiés.

3.3.1 Évolution future des indices extrêmes hydro-climatiques au Sahel

Dans cette partie, nous présentons l’évolution interannuelle future sur le Sahel (0.25°N , 25°S ; -19.75°W , 29°E) de la précipitation, du SDII, du CDD, du CWD, et du RX5DAY. La période choisie concerne le futur lointain allant de 2077 à 2099 suivant les 3 scénarios (RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5)

L’évolution des précipitations moyennes au sahel est illustrée par la figure 3.15. La moyenne d’ensemble des modèles montre des intensités variant entre 9 et 11 mm/jour. Les scénarios prévoient une diminution des précipitations dans le futur lointain avec des maximums de 4 mm/jour observés à partir de la moyenne d’ensemble des modèles pour le scénario RCP 8.5. Les moyennes d’ensemble des scénarios 2.6 et 4.5 projettent des intensités annuelles moins faibles (8 à 12 mm).

Les maximas d'intensités sont présentés par le modèle CSIRO-Mk3-6-0 pour les scénarios RCP 2.6 et 4.5.

Des études antérieures menées sur l'Afrique ont également montré des diminutions annuelles des précipitations (Alexander et al., 2006; Collins 2011; Hulme et al., 2001).

L'évolution du SDII représentée sur la figure 3.16 montre une variation semblable à celle de la précipitation.

Les moyennes d'ensemble des scénarios RCP 2.6 et 4.5 projettent une variation similaire comprise entre 12 et 16 mm. Le RCP 8.5 projette une variation entre 4 et 9 mm, ce qui fait comprendre qu'il y a un risque énorme de déficits pluviométriques.

Les scénarios RCP 2.6 et 4.5 projettent une évolution qui n'est pas aussi importante du RX5DAY (figure 3.17) et qui varie entre 50 et 90 mm en considérant la moyenne d'ensemble. Contrairement aux deux autres scénarios, le RCP 8.5 projette une forte diminution du RX5DAY pour la moyenne d'ensemble jusqu'à 20 mm et une intensité presque nulle pour le modèle CSIRO-Mk3-6-0.

La figure 3.18 montre l'évolution future lointaine des CDD. La moyenne d'ensemble projetée est plus importante pour le scénario RCP 8.5 avec 50 jours consécutifs, les scénarios RCP 2.6 et 4.5 projettent des CDD variant entre 12 et 20 jours.

La moyenne d'ensemble projetée est plus importante pour le scénario RCP 8.5 avec 60 jours consécutifs, les scénarios RCP 2.6 et 4.5 projette des CDD variant entre 10 et 20 jours consécutifs.

Concernant le CWD, le scénario RCP 8.5 qui est le plus pessimiste donne des nombres de jours consécutifs humides moins importants [10-25 jours] par rapport aux deux autres, ceci est sans doute due au fait que le forçage radiatif est plus important. Le CWD projeté par les moyennes d'ensemble varie entre 35 et 70 jours pour les scénarios RCP 2.6 et 4.5.

L'étude de l'évolution de tous ces indices a permis de conclure que l'évolution des moyennes annuelles des scénarios 2.6 et 4.5 sont très faibles par rapport au présent.

On remarque également que les variations annuelles des moyennes d'ensemble des indices présentent des pics pour les mêmes années avec la plupart des modèles. Ce qui indique une faible dispersion des modèles du CMIP5 comme ça été démontré par Sillmann et al., 2013. On peut donc accorder une confiance à la moyenne d'ensemble des modèles.

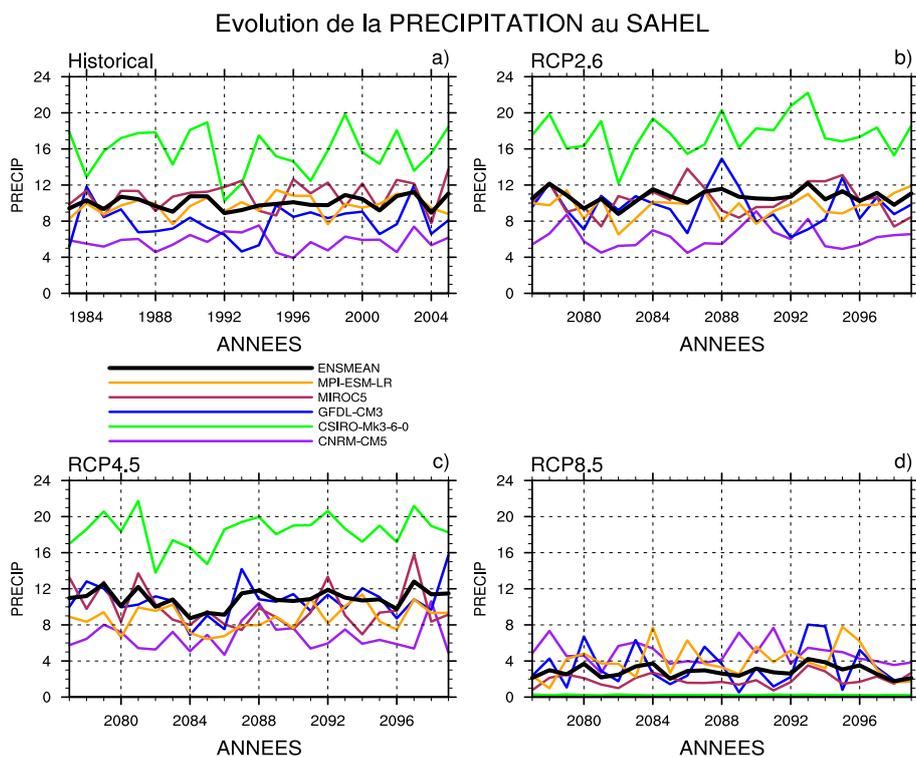


FIGURE 3.15 – Évolution de la pluie moyenne dans le présent et le futur lointain(JJAS)

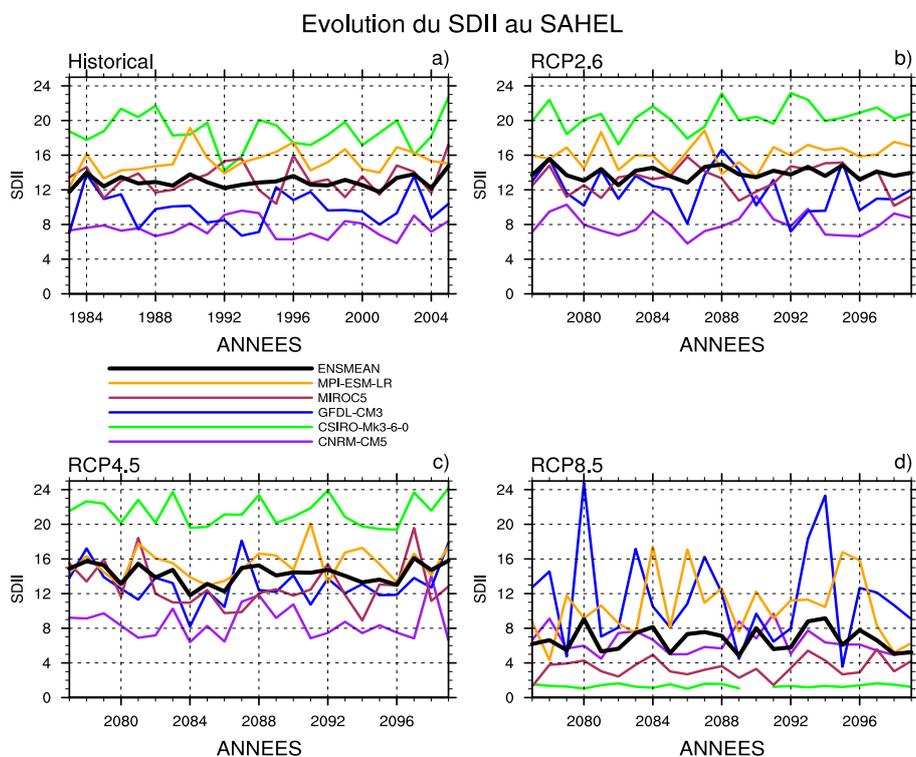


FIGURE 3.16 – Évolution du SDII dans le présent et le futur lointain(JJAS)

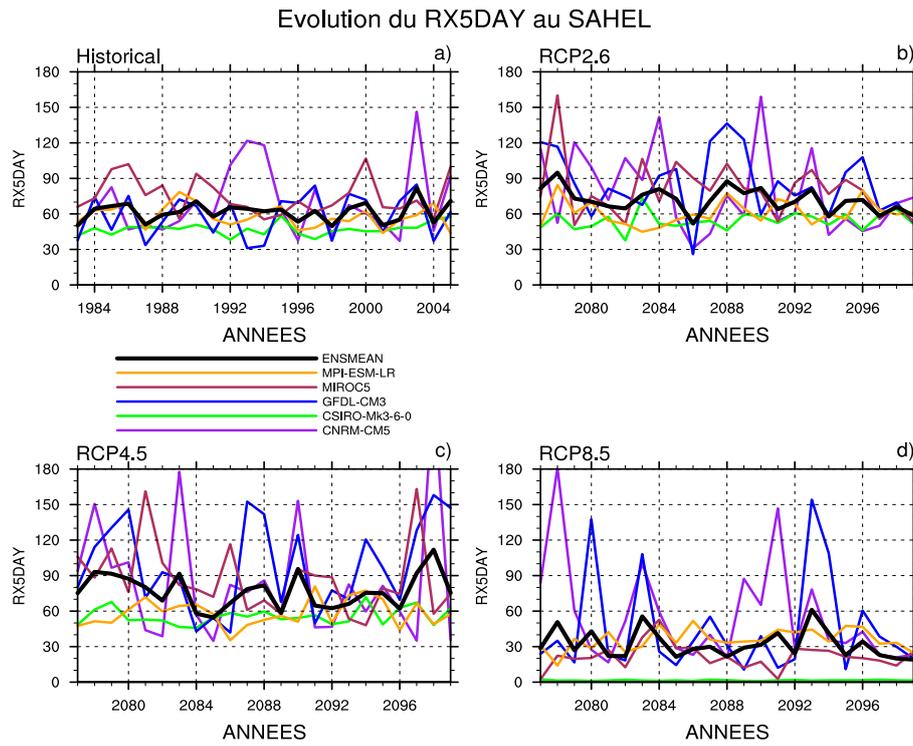


FIGURE 3.17 – Évolution du RX5DAY dans le présent et le futur lointain(JJAS)

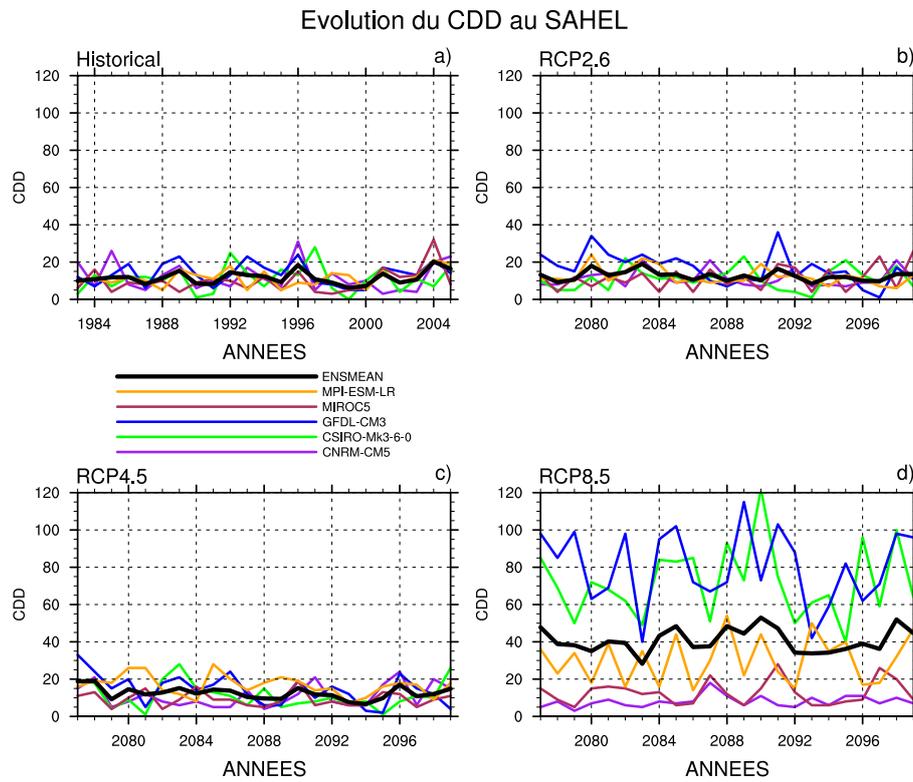


FIGURE 3.18 – Évolution du CDD dans le présent et le futur lointain(JJAS)

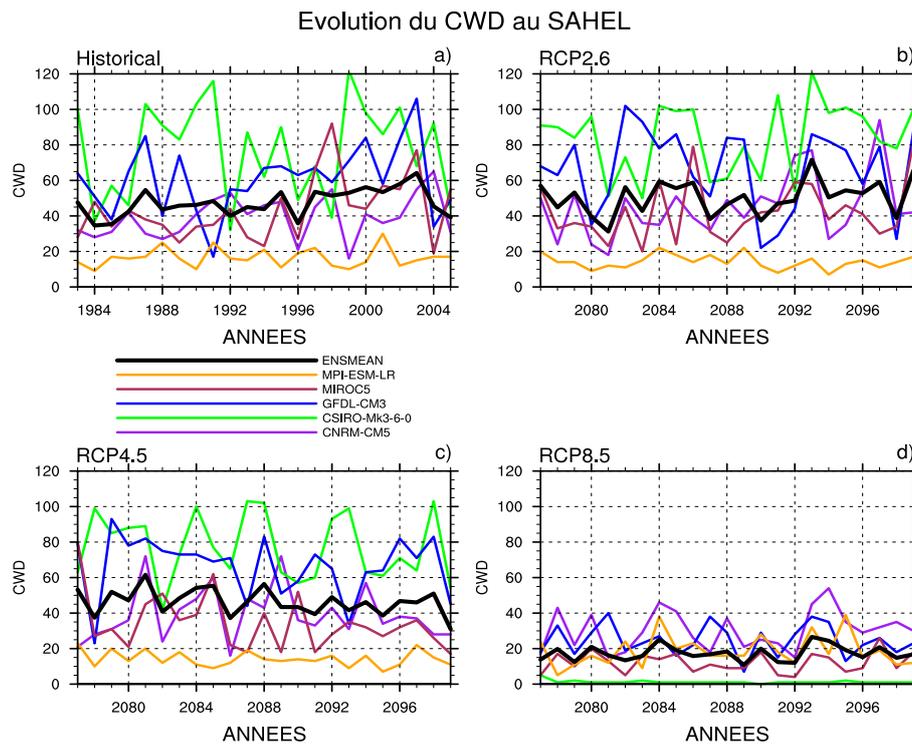


FIGURE 3.19 – Évolution du CWD dans le présent et le futur lointain(JJAS)

3.3.2 Changement dans le Futur

Dans ce paragraphe, nous abordons la distribution spatiale des changements entre le passé et le futur lointain. Il s'agit pour nous d'identifier la variation temporelle attendue des indices extrêmes en Afrique de l'Ouest. L'analyse de la figure 3.21 montre les variations de précipitations sur la région Ouest-Africaine. On constate une structure générale caractérisée par une réduction des moyennes de précipitations qui s'étend dans la plupart des régions ouest-africaines. Sur le Sahel-ouest, on remarque une augmentation d'environ 30 % des précipitations pour la plupart des modèles à l'exception du modèle MPI-ESM-LR qui montre une réduction des précipitations sur le Sahel-ouest, en particulier sur le Sénégal (Sylla et al., 2015 ; SARR et al., 2015 ; Janicot 2012).

Dans la zone guinéenne, des réductions de -20 % sont prévus par la moyenne d'ensemble du scénario RCP 8.5 bien que certains modèles prévoient plutôt une augmentation.

Le taux de changement du SDII est illustré sur la figure 3.22 et présente d'après la moyenne d'ensemble une augmentation sur toute la zone ouest-africaine avec un maximum sur le sahel-est (Sarr et Camara., 2017). Une légère diminution de -10 % est projetée à travers le golfe de guinée.

Les figures 3.23 et 3.24 suivantes représentent respectivement la répartition spatiale du changement des centiles R90p et R95p dans la représentation des événements de précipitation à fortes intensités. On remarque que la distribution suit pratiquement celle des précipitations. Pour la moyenne d'ensemble, le changement projetés pour le R90p montre

une augmentation presque sur toute la zone d'études mais qui est plus importante au niveau du sahel-ouest jusqu'à +15 %.

Le R90ptot présenté sur la figure 3.25 projette également une augmentation très remarquable sur l'Afrique de l'ouest même si au nord du Sénégal, on note une légère diminution de -10 %. Le R95p présente dans la période de mousson une légère augmentation sur le sahel-ouest (+8 %) et une légère diminution au niveau sahel-centre et de la région guinéenne. Par contre pour le R95ptot (figure 3.26), une augmentation remarquable est notée sur toute la zone d'étude mais qui est plus important au-dessus du sahel (+28 %) (SYLLA et al., 2015).

Concernant les CDD, la figure 3.27 montre une tendance à la diminution de ces jours consécutifs secs qui est plus important au niveau du Sahel et du Golfe de Guinée selon la moyenne d'ensemble à environ -25 %. Ceci contredit l'hypothèse posée plus haut qui argumente une augmentation des CDD sur le sahel. Une augmentation sur le Sahel-ouest est toutefois projetée avec les modèles MPI-ESM-LR et MIROC5 à environ +15 %.

Le nombre de jours consécutifs humides (CWD) présenté sur la figure 3.28 montre un changement également favorable à la diminution sur l'ensemble de la zone ouest-africaine d'après la moyenne d'ensemble mais qui est plus important sur la région guinéenne. Ce qui est évident, puisqu'en cette période de MOA, la ZCIT est au-dessus de la région sahéenne.

Des études ont montré qu'une augmentation des CDD et une diminution des CWD sont prévues pour le futur lointain (Sarr et Cammara ., 2017).

L'ensemble de ces résultats de changements dans le futur laisse apparaître des disparités. Par exemple, l'augmentation de l'intensité moyenne des précipitations sur les jours pluvieux et la diminution de la moyenne des précipitations laisse présager une augmentation des jours sans pluies, donc des jours secs consécutifs. Ce qui n'est pas le cas puisque le CDD simule une diminution de -25 % en particulier sur le sahel où se situe la ZCIT en cette période de MOA.

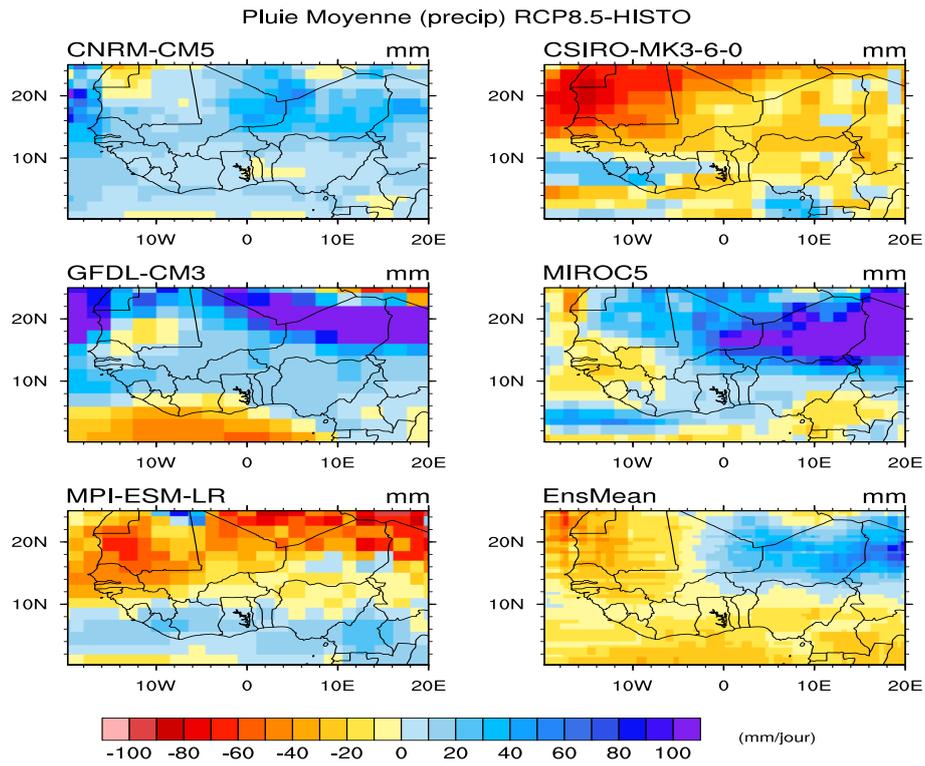


FIGURE 3.20 – Changement moyen dans le futur de la pluie moyenne en pourcentage (JJAS)

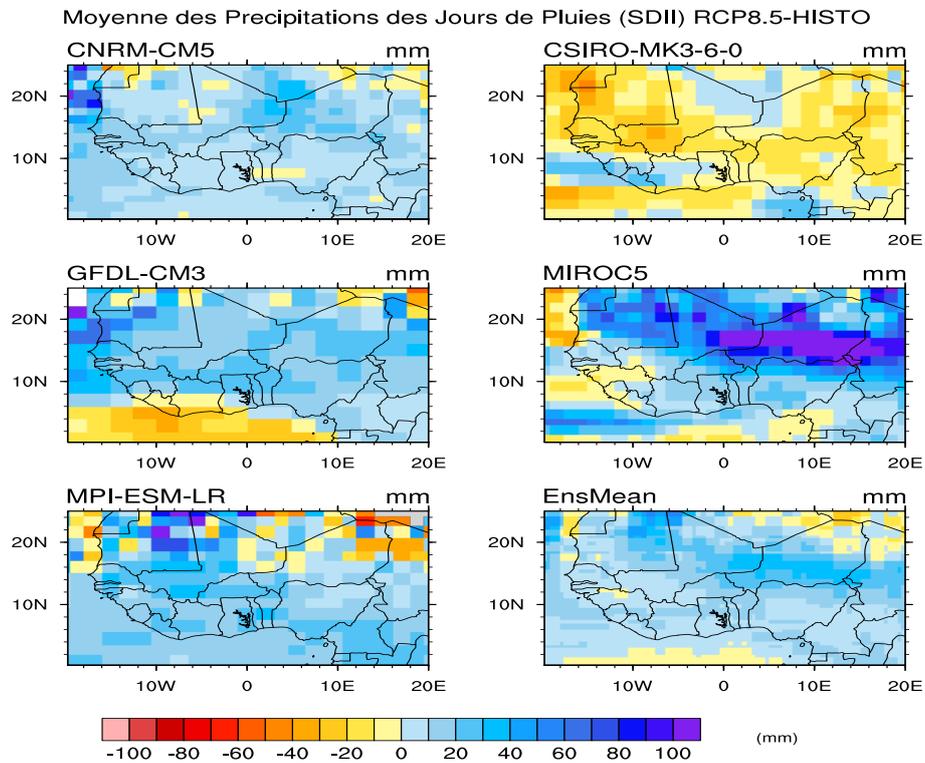


FIGURE 3.21 – Changement moyen dans le futur du SDII moyenne en pourcentage (JJAS)

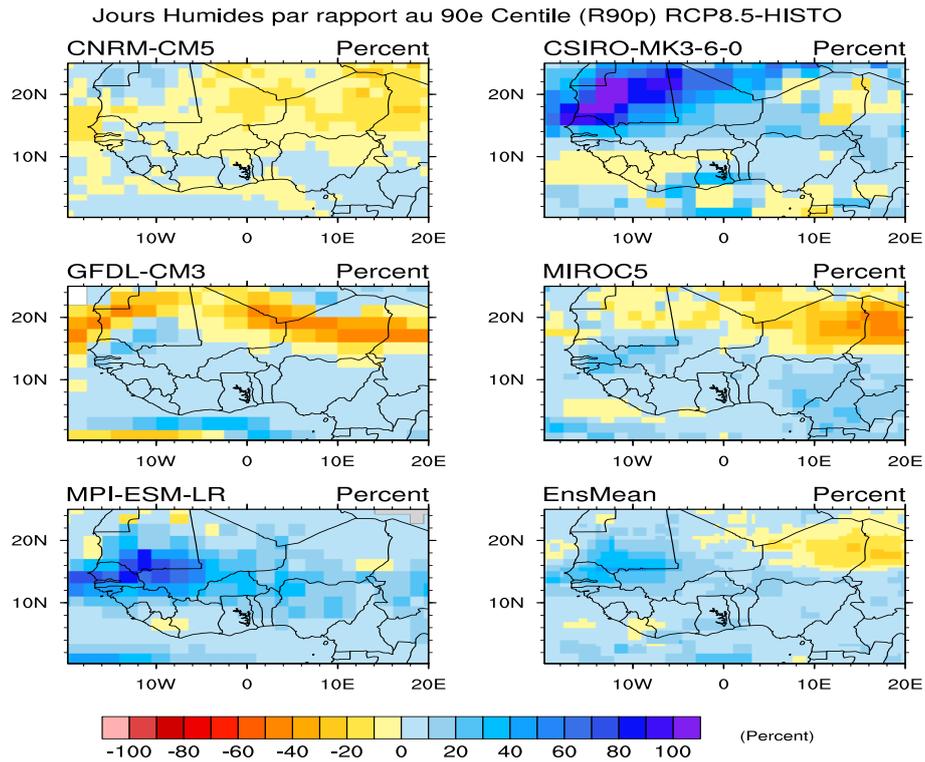


FIGURE 3.22 – Changement moyen dans le futur du R90p moyenne en pourcentage (JJAS)

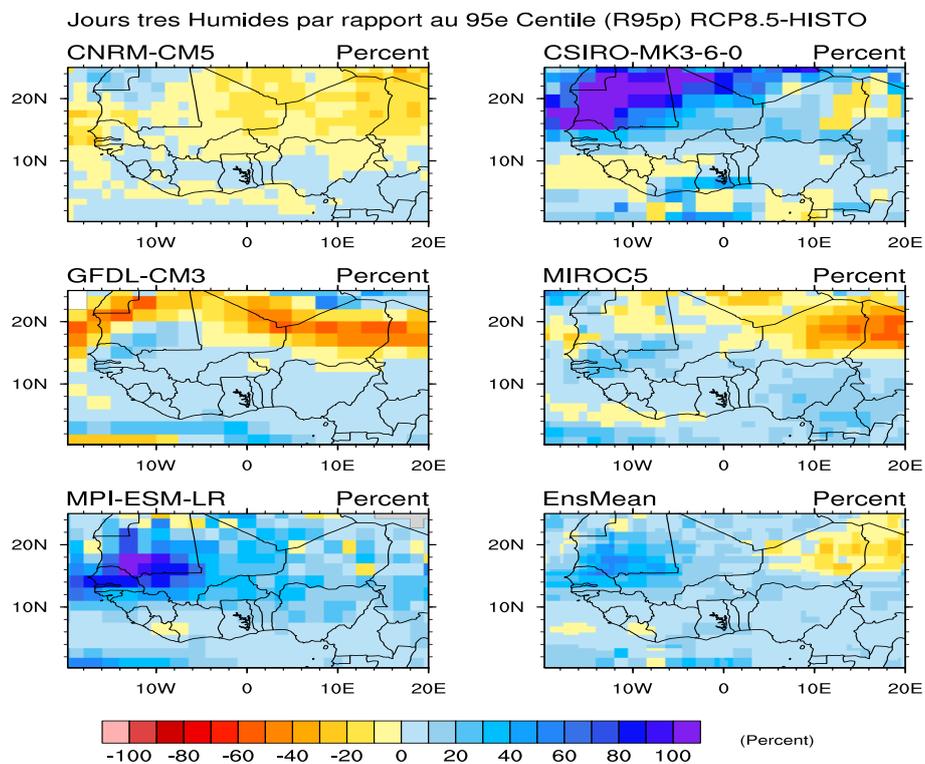


FIGURE 3.23 – Changement moyen dans le futur du R95p moyenne en pourcentage (JJAS)

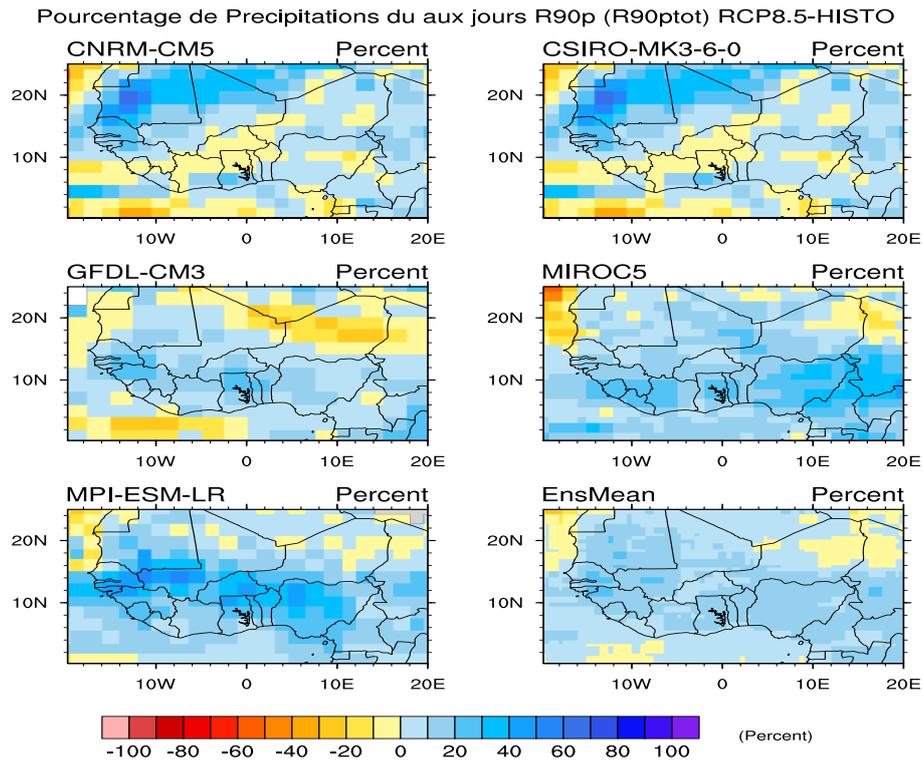


FIGURE 3.24 – Changement moyen dans le futur du R90ptot moyenne en pourcentage (JJAS)

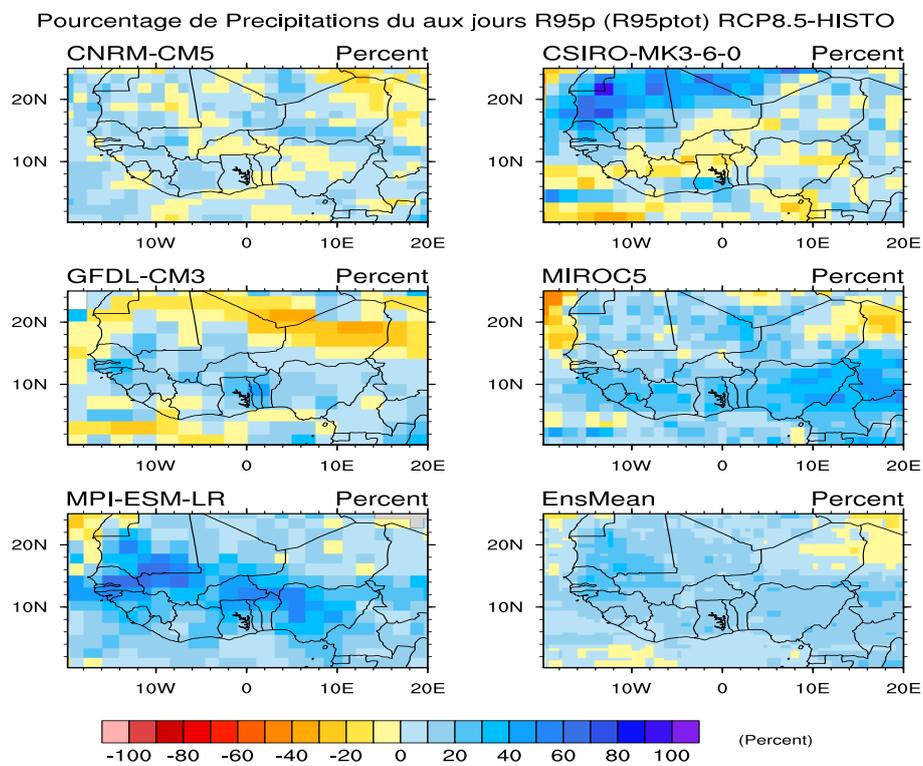


FIGURE 3.25 – Changement moyen dans le futur du R95ptot moyenne en pourcentage (JJAS)

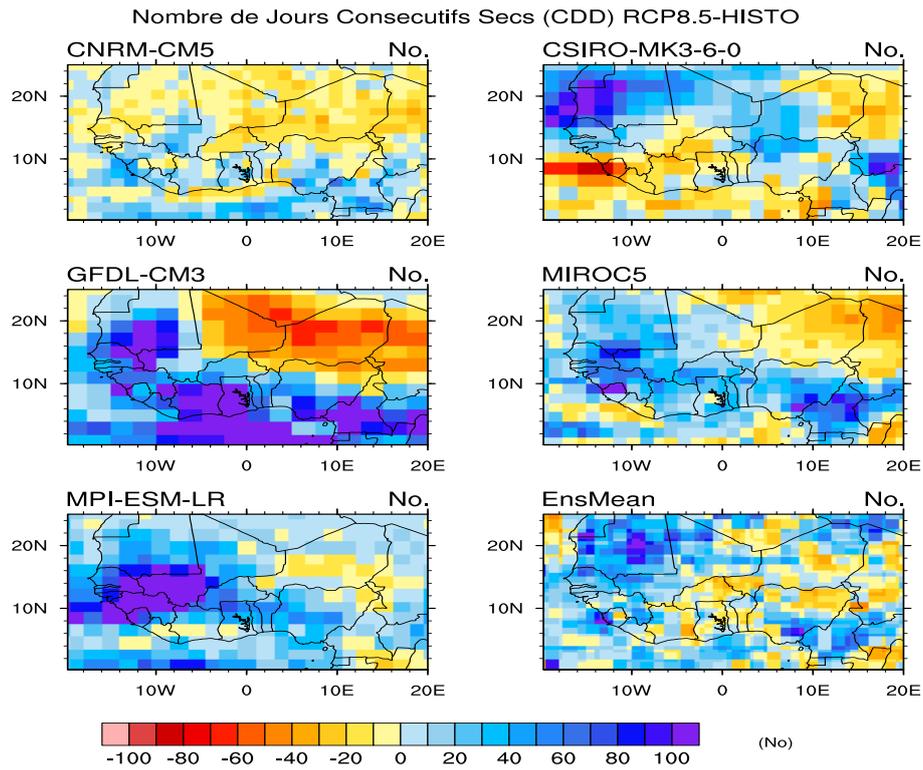


FIGURE 3.26 – Changement moyen dans le futur du CDD moyenne en pourcentage (JJAS)

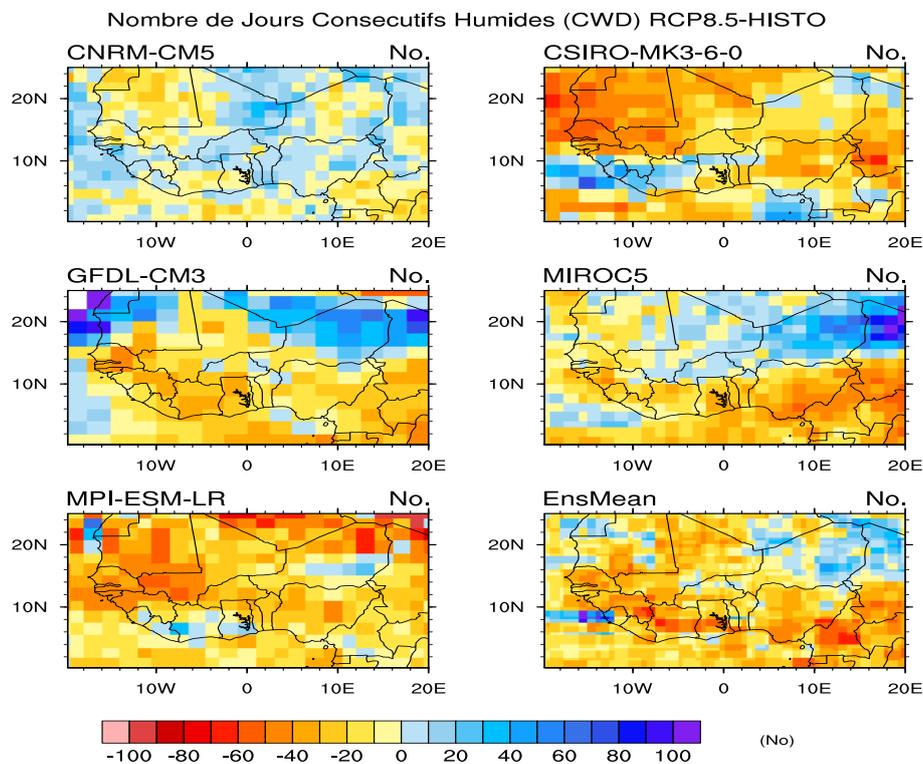


FIGURE 3.27 – Changement moyen dans le futur du CWD moyenne en pourcentage (JJAS)

Conclusion et Perspective

Cette étude donne un aperçu sur la performance des modèles du programme CMIP5. On remarque une faible dispersion des modèles et ceci surtout avec l'analyse des évolutions annuelles des indices. En effet, la moyenne d'ensemble produit généralement de bons résultats comme ça été démontré dans plusieurs études antérieures.

Les distributions spatiales des indices pour l'observation ARC, les modèles du CMIP5 et leur moyenne d'ensemble montrent que les pluies moyennes sont plus importantes au niveau des zones orographiques (Fouta Djallon, Plateaux du Joss, Mont Cameroun) et de l'océan (Camara et al., 2013).

La plupart des modèles et la moyenne d'ensemble reproduisent bien la distribution spatiale des différents indices étudiés.

Les études antérieures menées sur l'Afrique de l'ouest n'ont pas accordé beaucoup d'importance sur l'évolution annuelle des paramètres météorologiques dans le futur. Ils se sont plutôt focalisé sur les distributions spatiales des indices ou sur les évolutions mensuelles des indices. À cela s'ajoute le fait que ces études n'utilisent pas assez d'indices (seulement les centiles) pour caractériser ces événements extrêmes.

Ainsi, en plus des évolutions dans le présent, nous nous sommes préoccupés du cycle annuel des indices dans le futur sur le Sahel (0.25°N , 25°S ; -19.75°W , 29°E) qui pourraient en quelques sortes être très intéressants pour la prise de décisions dans les politiques d'adaptation face aux événements extrêmes. Les résultats montrent une diminution des moyennes annuelles de précipitations et des jours consécutifs humides et une augmentation des jours consécutifs secs.

Nous nous sommes également intéressés au changement dans le futur des indices de précipitations en utilisant le scénario le plus pessimiste (RCP 8.5). Les résultats montrent une projection favorable à la diminution des précipitations accompagnées d'une augmentation des intensités sur les jours de pluies (SDII).

La plupart des modèles ainsi que la moyenne d'ensemble projette une diminution des jours consécutifs secs par rapport au présent qui est plus important sur le sahel, ce qui est en contradiction avec d'autres études qui ont plutôt prévues une augmentation (Sarr et Camara 2016).

Ceci étant, l'obligation de prendre certaines mesures de préventions s'impose pour protéger l'agriculture qui est la principale source de subsistance du peuple ouest-africain.

Cependant, il serait très important d'utiliser des jeux de données CMIP5 d'humidité et de température pour étudier la relation entre ces deux paramètres. Il serait également important d'utiliser un jeu de données de modèles climatiques régionaux (MCR) pour les

études d'impacts qui demandent des données de hautes résolutions.

Bibliographie

- Alias A., Deque M., Valcke S., **2010** :CNRM-CM5 Earth System Model.
- Bazzaz F., Sombroek W., **1996** : Changement du climat et production agricole. Rome :
FAQ; Polytechnica.
- Beltrando G., Camberlin P., **1995** :Les sécheresses en Ethiopie et dans l'Est de l'Afrique.
Sécheresse, 1995, 6 : 87-94.
- Beucher F **2010** : Manuel de météorologie tropicale : des alizés au cyclone tropical. Météo-
France.
- Brazel S W., Balling., R C **1986** : Temporal analysis of long-term atmospheric moisture
levels in Phoenix, Arizona. Journal of Climate and Applied Meteorology, 25(2), 112-117.
- Burpee R W **1972** : The origin and structure of easterly waves in the lower troposphere
of North Africa. Journal of the Atmospheric Sciences, 29(1), 77-90.
- Burpee R W **1974** : Characteristics of North African easterly waves during the summers
of 1968 and 1969. Journal of the Atmospheric Sciences, 31(6), 1556-1570.
- Camara M **2006** : Cyclogenèse dans l'Atlantique Nord en relation avec le système de
mousson en Afrique de l'Ouest (Doctoral dissertation, Grenoble INPG).
- Camara, M et al., **2013** : Analyse de la pluie simulée par les modèles climatiques régionaux
de CORDEX en Afrique de l'Ouest. Science et changements planétaires/Sécheresse, 24(1),
14-28.
- Charney J G **1975** : Dynamics of deserts and drought in the Sahel. Quarterly Journal of
Royal Meteorological Society 101 : 193-202
- Clarke L E., **2007** : Scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations.
US Department of Energy Publications, 6.
- Collier M A et al., **2011** : The CSIRO-Mk3. 6.0 Atmosphere-Ocean GCM : participation
in CMIP5 and data publication. In International Congress on Modelling and Simulation ?
MODSIM.
- Diallo I et al., **2012** : Multi-model GCM-RCM ensemble based projections of temperature
and precipitation over West Africa for the early 21st century. Inter- national Journal of
Geophysics 972896 : 19 pages. Doi : 10.1155/2012/972896.
- Diedhiou A., et al., **1999** : Easterly wave regimes and associated convection over West
Africa and tropical Atlantic : Results from the NCEP/NCAR and ECMWF reanalyses.
Climate Dynamics, 15(11), 795-822.
- Folland C K, Palmer T N et Parker D E **1986** : Sahel rainfall and worldwide sea temper-

ature 1901-1985. *Nature* 320 : 602-7.

Giorgi F et al., **2014** : Changes in extremes and hydroclimatic regimes in the CREMA ensemble projections. *Climatic change*, 125(1), 39-51.

Griffies et al., **2011** : characteristics of the ocean and sea ice simulations. *Journal of Climate*, 24(13), 3520-3544.

Grist J P., Nicholson S E., Barcilon A I., **2002** : Easterly waves over Africa. Part II : observed and modeled contrasts between wet and dry years. *Monthly Weather Review*, 130(2), 212-225.

Hsieh J S et Cook K H **2008** : On the instability of the African easterly jet and the generation of African waves : Reversals of the potential vorticity gradient. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65(7), 2130-2151.

IPCC **2007** : Mitigation of climate change. Summary for Policymakers, vol. 10, no 5.4.

Janicot S., **2002** : Dynamique de la Mousson Africaine. Laboratoire de Météorologie Dynamique, Paris.

Janicot S., Redelsperger J L., Lebel T., **2012** : La mousson ouest-africaine : introduction à quelques contributions du programme d'étude multidisciplinaire AMMA.

Kouame F et al., **2013** : Étude de l'impact des variabilités climatiques sur les ressources hydriques d'un milieu tropical humide : Cas du département de Bongouanou (Est de la Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 26(3), 247-261.

Lamb P J **1978** : Cases studies of tropical Atlantic surface circulation patterns during recent Sub-Saharan weather anomalies : 1967 and 1968. *Monthly Weather Review*, 106(4), 482-491.

Leroux S **2009** : Dynamique des ondes d'est africaines : origine, propagation et interaction avec leur environnement (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).

Ly et al., **2013** : Evolution of some observed climate extremes in the West African Sahel. *Weather and climate extremes*, 1, 19-25.

Moss R et al., **2010** : The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747.

Nicholson S E., **1981** : Rainfall and atmospheric circulation during drought periods and wetter years in West Africa. *Monthly Weather Review*, 109, 2191-2208.

Nikulin G et al., **2012** : Precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-Africa regional climate simulations. *Journal of climate*. doi 10.1174/JCLI-D-11-00375.1.

Novella N S., Thiaw W.M **2013** : African rainfall climatology version 2 for famine early warning systems. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(3), 588-606.

Pytharoulis I et Thorncroft C : The low-level structure of African easterly waves in 1995.

Monthly Weather Review, 127(10), 2266-2280.

Raddatz et al., **2007** : Will the tropical land biosphere dominate the climate? carbon cycle feedback during the twenty-first century?. *Climate Dynamics*, 29(6), 565-574.

Reick C H et al., **2013** : Representation of natural and anthropogenic land cover change in MPI-ESM. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(3), 459-482.

Riahi K., **2007** : Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(7), 887-935.

Rotstayn L et al., **2010** : Improved simulation of Australian climate and ENSO? related rainfall variability in a global climate model with an interactive aerosol treatment. *International Journal of Climatology*, 30(7), 1067-1088.

Salack S et al., **2013** : Évolution des risques agroclimatiques associés aux tendances récentes du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 24(4), 282-293.

Sarr A B, Camara, M, et Diba I **2015** : Spatial distribution of Cordex regional climate models biases over West Africa. *International Journal of Geosciences*, 6(9), 1018.

Sillmann J et al., **2013** : Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble : Part 2. Future climate projections. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 118(6), 2473-2493.

Solomon S **2007** : Climate change 2007-the physical science basis : Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC (Vol. 4). Cambridge university press.

Solomon S **2009** : State-led migration, democratic legitimacy, and deterritorialization : the Philippines' labour export model. *European Journal of East Asian Studies*, 8(2), 275-300.

Sylla M B et al., **2015** : Projected changes in the annual cycle of high-intensity precipitation events over West Africa for the late twenty-first century. *Journal of Climate*, 28(16), 6475-6488.

Taylor K E., et al., **2011** : A summary of the CMIP5 experiment design. *PCDMI Rep.*

Peyrille P **2006** : Etude idéalisée de la mousson ouest-africain à partir d'un modèle numérique bi-dimensionnel (Doctoral dissertation, Toulouse 3).

Zhang et al., **2011** : Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change*, 2(6), 851-870.

Watanabe et al., **2010** : Improved climate simulation by MIROC5 : Mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Climate*, 23, 6312-6335.

Webographie

<https://www.dkrz.de>

https://en.wikipedia.org/wiki/Climate_Data_Operators

<https://www.ncl.ucar.edu/overview.shtml>