

Caractérisation des extrêmes composés de précipitation et de température au Sénégal : climat présent et futur

**Ibrahima DIBA^{1*}, Moctar CAMARA¹, Alioune Badara SARR¹, Jules BASSE¹,
Hamady Ngansou SABALY¹ et Arona DIEDHIOU^{2,3}**

¹ *Université Assane SECK de Ziguinchor, UFR Sciences et Technologies, Laboratoire d'Océanographie des Sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC), BP 523 Ziguinchor, Sénégal*

² *Université Grenoble Alpes, Institut de Recherche pour le Développement (IRD), CNRS, Grenoble INP, Institut des Géosciences et de l'Environnement (IGE), F-38000 Grenoble, France*

³ *Université Félix Houphouët Boigny, UFHB-IRD Joint International Laboratory of Research on NEXUS Climate, Water, Energy and Agriculture and Development of Climate Services, African Centre of Excellence CCBAD (Climate Change, Biodiversity and Sustainable Agriculture), 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

* Correspondance, courriel : ibrahimadiba71@yahoo.fr

Résumé

Le but de cette étude est de caractériser les extrêmes composés de précipitation et de température au Sénégal. Pour ce faire, nous avons analysé les sorties de six (6) modèles climatiques du projet d'inter-comparaison de modèles couplés (CMIP5). Les résultats montrent une baisse de la pluie moyenne et une augmentation de la température de surface sur le Sénégal dans le futur proche (2031-2050) et lointain (2071-2090). L'analyse des extrêmes composés sur la période historique (1986-2005) montre que les modèles ACCESS1-0, CMCC-CM, HadGEM2-ES et MRI-CGCM3 ainsi que leur moyenne d'ensemble simulent une forte occurrence du mode sec/chaud au nord et au nord-est du Sénégal. Les six (6) modèles ainsi que leur moyenne d'ensemble simulent une forte occurrence de l'extrême composé humide/chaud au centre-ouest et au sud du Sénégal. La moyenne d'ensemble des modèles montre une augmentation du mode sec/chaud au nord-ouest, centre-ouest et sud-ouest du Sénégal dans le futur. Le mode humide/chaud diminuera au nord-ouest, au centre et au sud du Sénégal dans le futur proche et sur l'ensemble du pays durant le futur lointain. Cette étude montre que les zones centre et nord du pays auront besoin d'une irrigation comme stratégie d'adaptation pour la protection du secteur agricole. En définitive, ce travail peut être considéré comme un support aux décideurs politiques sénégalais pour la mise en œuvre de meilleurs outils de planification pour lutter contre les potentiels effets néfastes liés aux extrêmes climatiques.

Mots-clés : *modèles CMIP5, extrêmes composés, précipitation, température, Sénégal.*

Abstract

Characterization of compound rainfall and temperature extreme in Senegal : present and future climate

The aim of this study is to characterize the compound rainfall and temperature extreme over Senegal. In order to do this, we analyzed the outputs of six (6) climate models from the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5). The results show a decrease of the mean rainfall and an increase of the surface temperature over

Senegal during the near (2031-2050) and far (2071-2090) future. The analysis of the compound extremes during the historical period (1986-2005) shows that the ACCESS1-0, CMCC-CM, HadGEM2-ES and MRI-CGCM3 models and their ensemble mean simulate a high occurrence of the dry/warm mode over the northern and north-eastern parts of Senegal. The individual models and their ensemble mean simulate a strong occurrence of the wet/warm compound extreme over the central-west and southern parts of Senegal. The ensemble mean of the models shows an increase of the dry/warm mode in the north-west, central-west and south-western parts of Senegal during the future. When considering, the wet/warm mode, it will decrease in the north-west, central and southern Senegal during the near future and over the whole country during the far future. This study shows that the central and northern parts of the country will need irrigation as an adaptation strategy for the protection of the agricultural sector. Ultimately, this work could be considered as a support for the Senegalese policymakers for the implementation of better planning tools to combat the potential adverse effects associated to climate extremes.

Keywords : *CMIP5 models, compound extremes, rainfall, temperature, Senegal.*

1. Introduction

Selon le rapport spécial du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat [1] la température moyenne mondiale a augmenté de $0,05^{\circ}\text{C}$ de 1998 à 2012. Ce réchauffement global s'accompagne d'une augmentation de l'occurrence des événements climatiques extrêmes. En Afrique de l'Ouest, des études récentes ont caractérisé l'évolution de ces événements extrêmes sur la région à l'aide de modèles ou de produits dérivés d'images satellites [2, 3] mais la disponibilité des données météorologiques quotidiennes et leur accès restent encore un frein majeur à la compréhension de leur occurrence et de leur variabilité aux échelles nationale et locale [4]. Une augmentation de la fréquence des événements météorologiques extrêmes peut avoir de nombreux effets négatifs sur la société dans cette région où la population est largement dépendante de l'agriculture pluviale [5]. Les extrêmes composés de pluie et de température, également appelés extrêmes simultanés ou coïncidents, peuvent avoir des effets négatifs plus importants sur la santé humaine et l'environnement que les extrêmes individuels de pluie ou de température [6, 7]. Ces extrêmes climatiques composés ont attiré une grande attention des décideurs, en particulier en Europe, en Russie, en Californie et en Chine en raison de leurs grands impacts sur les êtres humains et les écosystèmes [7 - 9]. Plusieurs travaux de recherche ont étudié les extrêmes composés tels que l'occurrence de la sécheresse et des vagues de chaleur ou les faibles précipitations et les fortes températures dans ces régions [9, 10 - 13]. En outre, les modes d'extrêmes composés chaud/sec et chaud/humide ont augmenté en Europe au 20^{ème} siècle et continueront d'augmenter d'ici 2100 [14]. Une augmentation de la fréquence des modes sec/chaud et humide/chaud est observé en Espagne de 1970 à 2007 [15]. Par exemple, les résultats issus des travaux de [16] ont montré que l'important déficit de précipitation dans le centre des États-Unis en 2012, qui a provoqué une grave sécheresse entre les mois de Mai et Août, s'est accompagné de fortes températures qui ont eu des impacts négatifs sur le rendement des cultures. En général, en Afrique de l'Ouest et au Sénégal en particulier, les études sur les extrêmes climatiques se sont principalement focalisées sur les extrêmes basés sur une seule variable, comme par exemple les fortes/faibles précipitations ou les températures maximales/minimales [3, 17, 18]. L'estimation et la compréhension de la variabilité de ces événements extrêmes pour le climat actuel et futur sont importantes pour la formulation de stratégies d'adaptation, d'atténuation et de planification des ressources et de l'urbanisme. Il convient donc de mettre un accent particulier sur les extrêmes composés (extrêmes coïncidents) étant donné les nombreux dommages qu'ils ont causés au centre des États-Unis en 2012 (sécheresses, pertes agricoles, [16]) et qu'ils sont susceptibles de provoquer dans des régions connues pour être très vulnérables au changement climatique que celles d'Afrique. Cette étude a donc pour objectif de caractériser les extrêmes composés de précipitation et de température au Sénégal pendant la saison estivale (juillet à septembre) pour le climat présent et futur.

2. Méthodologie

2-1. Description des modèles

Les données journalières de pluie et de température issues de six (6) modèles impliqués dans le projet d'inter-comparaison de modèles couplés CMIP5 ont été utilisées. Ces modèles sont présentés dans le **Tableau 1**. Les CMIP5 sont des modèles couplés de circulation générale atmosphérique [19]. Les sorties de ces modèles sont disponibles sur la période historique et trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5) à différentes résolutions spatiales (**Tableau 1**). Le but des expériences du projet CMIP5 est d'améliorer la compréhension du climat, de répondre aux questions scientifiques en suspens soulevées dans le rapport du GIEC et de fournir des estimations des changements climatiques futurs qui seront utiles à ceux qui envisagent ses conséquences possibles [20]. Les informations plus détaillées sur les configurations des modèles CMIP5 sont à retrouver dans les travaux de [20]. Cette étude est focalisée sur trois périodes : la période historique (1986-2005) et le futur proche (2031-2050) et lointain (2071-2090).

Tableau 1 : Modèles utilisés

	Modèle	Résolution (Lat *Lon)	Institution
1	ACCESS1-0	1.25° x 1.875°	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)-Bureau of Meteorology (BOM); Australia
2	CMCC-CM	0.75° x 0.75°	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici (CMCC) ; Italy
3	CNRM-CM5	1.4° x 1.4°	Centre National de Recherches Meteorologiques -Centre Europeen de Recherche et de Formation Avancee en Calcul Scientifique (CNRM-CERFACS) ; France
4	HadGEM2-ES	1.25° x 1.875°	Met Office Hadley Centre (MOHC); United Kingdom
5	MIROC5	1.4° x 1.4°	Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC) ; Japan
6	MRI-CGCM3	1.125° x 1.125°	Meteorological Research Institute (MRI) ; Japan

2-2. Données

La pluie mensuelle du CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations) version 2.0 [21] et la température de surface du Climate Prediction Center (CPC) du National Centers for Environmental Prediction (NCEP) [22] ont été utilisées pour évaluer la capacité des modèles CMIP5 utilisés dans la présente étude à simuler les précipitations estivales et la température de surface au Sénégal. Les données du CHIRPS sont une combinaison de mesures in situ et d'estimations de satellite avec une résolution spatiale de 0,05° x 0,05°. C'est un ensemble de données pluviométriques quasi-mondiales et disponibles de 1981 à nos jours. Les données CHIRPS ont été validées à l'aide de diverses données d'observations de précipitations. Les résultats indiquent de bonnes performances [23] et c'est la raison pour laquelle nous l'avons choisi comme donnée d'observation pluviométrique de référence. Les données de température de surface du CPC/NCEP sont une combinaison de deux grands ensembles de données d'observations de stations collectées à partir de la version 2 du Global Historical Climatology Network (GHCN) et du Climate Anomaly Monitoring System (CAMS). Ces données ont une résolution horizontale de 0,5° x 0,5° sur la période allant de 1948 à nos jours. Les résultats issus des travaux de [22] ont montré que ces données sont de bonne qualité et peuvent reproduire les caractéristiques du climat à l'échelle régionale et globale. Dans ce travail, le Sénégal est divisé en trois

zones (Nord, Centre et Sud). Ces zones sont caractérisées par des conditions climatiques et écologiques différentes. Pour cette raison, nous avons analysé les changements de la pluie et des températures (moyenne, minimale et maximale) dans les trois sous-domaines du pays considérés à la **Figure 1**. Le pays est caractérisé par une seule saison des pluies démarrant en début Juin et se terminant en Septembre - Octobre avec un maximum de pluie localisé dans la période Juillet-Août-Septembre.

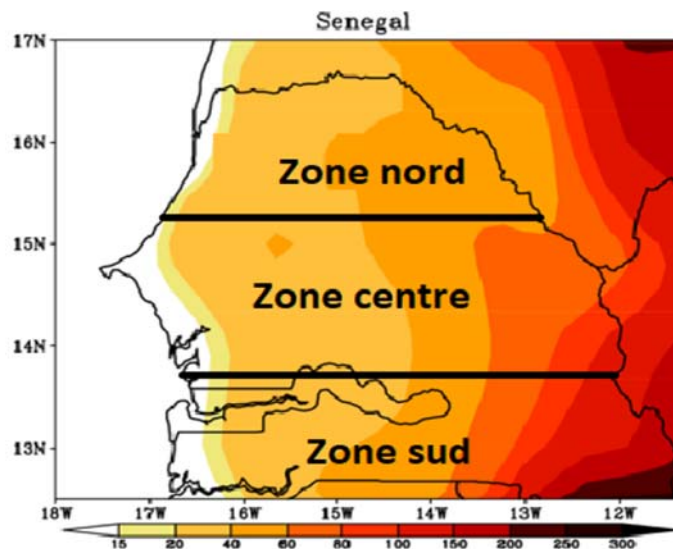


Figure 1 : Topographie du domaine d'étude (le Sénégal) et des sous-domaines considérés (Nord, Centre et Sud du pays)

2-3. Extrêmes composés

Selon le rapport spécial du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) sur la gestion des risques d'événements extrêmes et de catastrophes pour faire progresser l'adaptation au changement climatique [24], un événement extrême composé peut être défini comme deux événements extrêmes ou plus se produisant simultanément ou successivement, ou les combinaisons d'événements qui ne sont pas eux-mêmes des extrêmes mais conduisent à un événement ou à un impact extrême lorsqu'ils sont combinés. Cette définition montre que la coïncidence de plusieurs facteurs, dont chacun peut ne pas nécessairement être extrême, peut conduire à des impacts négatifs et extrêmes [7, 25]. Selon [6] un événement composé est un extrême qui dépend de plusieurs variables ou événements dépendants statistiquement. Les précipitations (et les températures) extrêmes pour une période donnée peuvent être définies comme sèches/humides (et froides/chaudes) lorsque les précipitations (et les températures) sont inférieures/supérieures à certains seuils (par exemple, 25^{ème}/75^{ème} et 10^{ème}/90^{ème} centiles). Cette définition des extrêmes composés a été utilisée par [7, 13] dans leur étude. Quatre extrêmes composés associés (sec/chaud, sec/froid, humide/chaud, humide/froid) peuvent alors être définis lorsque les deux extrêmes se produisent simultanément [7, 13 - 15]. Dans cette étude, nous avons utilisé les données journalières de précipitation et de température fournies par six (6) modèles du projet CMIP5 pour illustrer cette approche. En se basant sur la définition ci-dessus et des seuils 10^{ème}/90^{ème} centiles, nous avons calculé le nombre total d'extrêmes composés de pluie et de température des combinaisons sec/chaud et humide/chaud **Tableau 2** pendant la période estivale (juillet à septembre) sur le Sénégal pour le climat présent et futur. Par souci de cohérence, toutes les données des modèles CMIP5 sont interpolées sur une grille de 1,25° de latitude × 1,875° de longitude (celle du modèle HadGEM2-ES).

Tableau 2 : Définitions des extrêmes composés utilisés dans cette étude

Extrêmes composés	Définitions
Sec/chaud	Nombre total de jours avec des précipitations quotidiennes inférieures au 10 ^{ème} centile des précipitations moyennes quotidiennes et des jours avec une température quotidienne supérieure au 90 ^{ème} centile de la température maximale quotidienne
Humide/chaud	Nombre total de jours avec des précipitations quotidiennes au-dessus du 90 ^{ème} centile des précipitations moyennes quotidiennes et des jours avec une température quotidienne supérieure au 90 ^{ème} centile de la température maximale quotidienne

3. Résultats et discussion

3-1. Validation

Nous avons d'abord validé les simulations des modèles CMIP5 avant de caractériser les extrêmes composés sur le Sénégal. Pour cette étape, la pluie et la température moyenne de surface simulées par tous les modèles CMIP5 sont respectivement comparées aux données d'observation du CHIRPS et à la climatologie de la température de surface du NCEP/GHCN + CAMS (National Centers for Environmental Prediction/Global Historical Climatology Network + Climate Anomaly Monitoring System). La **Figure 2** montre la pluie moyennée de juillet à septembre sur la période historique 1986-2005 pour les observations du CHIRPS et les biais (de pluie) des modèles CMIP5 par rapport aux données CHIRPS. La climatologie du CHIRPS présente un gradient de pluie nord-sud avec des maxima localisés au sud et au centre du pays. Les minima de précipitation sont situés au nord du Sénégal (**Figure 2a**). Tous les modèles CMIP5 simulent un biais sec (valeurs négatives) sur tout le Sénégal (**Figure 2b-g**). On observe une faible sous-estimation des précipitations sur l'ensemble du Sénégal par les modèles CNRM-CM5 et MIROC5 (**Figure 2d, f**). De forts biais secs (jusqu'à 50 %) sont simulés par les modèles ACCESS1-0, CMCC-CM, HadGEM2-ES et MRI-CGCM3 au nord et au centre du pays (**Figure 2b, c, e, g**). La moyenne d'ensemble des modèles simule de faibles biais au centre et au sud du Sénégal (**Figure 2h**). La **Figure 3** montre la température de surface moyennée de juillet à septembre sur la période historique 1986-2005 pour les données du NCEP/GHCN + CAMS et les biais (de température) des modèles CMIP5 par rapport aux données du NCEP/GHCN + CAMS.

Les données du NCEP présentent une distribution zonale de la température de surface avec les températures les plus froides (inférieures à 28°C) situées au sud et au nord-ouest du pays et les valeurs les plus élevées sur la partie nord-est du pays (au-dessus de 30°C) (**Figure 3a**). MRI-CGCM3 surestime la température de surface sur tout le Sénégal (**Figure 3g**). Les cinq autres modèles simulent des biais chauds au nord-est, centre-est et sud du pays (**Figure 2b, c, d, e, f**). De faibles biais froids sont simulés au nord-ouest du pays plus particulièrement près de la côte (**Figure 2b, c, d, e, f**). La moyenne d'ensemble des modèles simule bien la distribution spatiale des biais (chauds et froids) (**Figure 3h**). La distribution spatiale de la pluie et de la température ainsi que les biais simulés par les modèles CMIP5 sont en accord avec les résultats de [26]. En outre, [26, 27] ont montré que les biais des modèles climatiques ne dépendent pas uniquement des données de forçage car la variabilité interne des modèles peut également jouer un rôle important. En général, les résultats montrent que la distribution spatiale de la pluie et de la température moyenne de surface au Sénégal est bien reproduite par les modèles CMIP5 malgré la présence de quelques biais. L'étape suivante consiste à étudier les changements sur la pluie et les températures (moyenne, minimale et maximale) au Sénégal pendant les futurs proche et lointain.

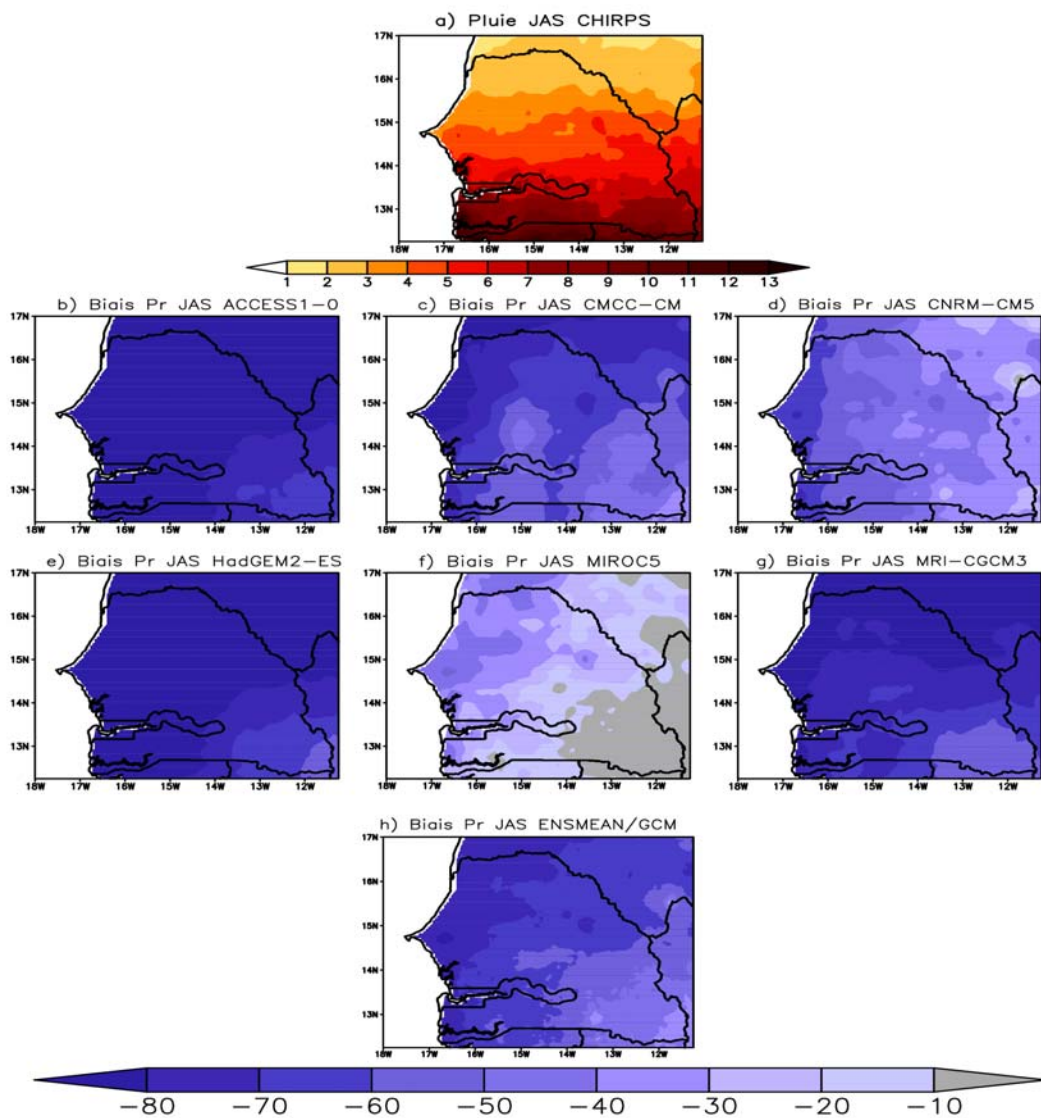


Figure 2 : (a) Pluie (mm/jour) moyennée pendant la saison estivale (juillet à septembre) au Sénégal sur la période 1986-2005 pour la climatologie CHIRPS; (b-h) biais des précipitations (en %) des six (6) modèles CMIP5 utilisés ainsi que leur moyenne d'ensemble

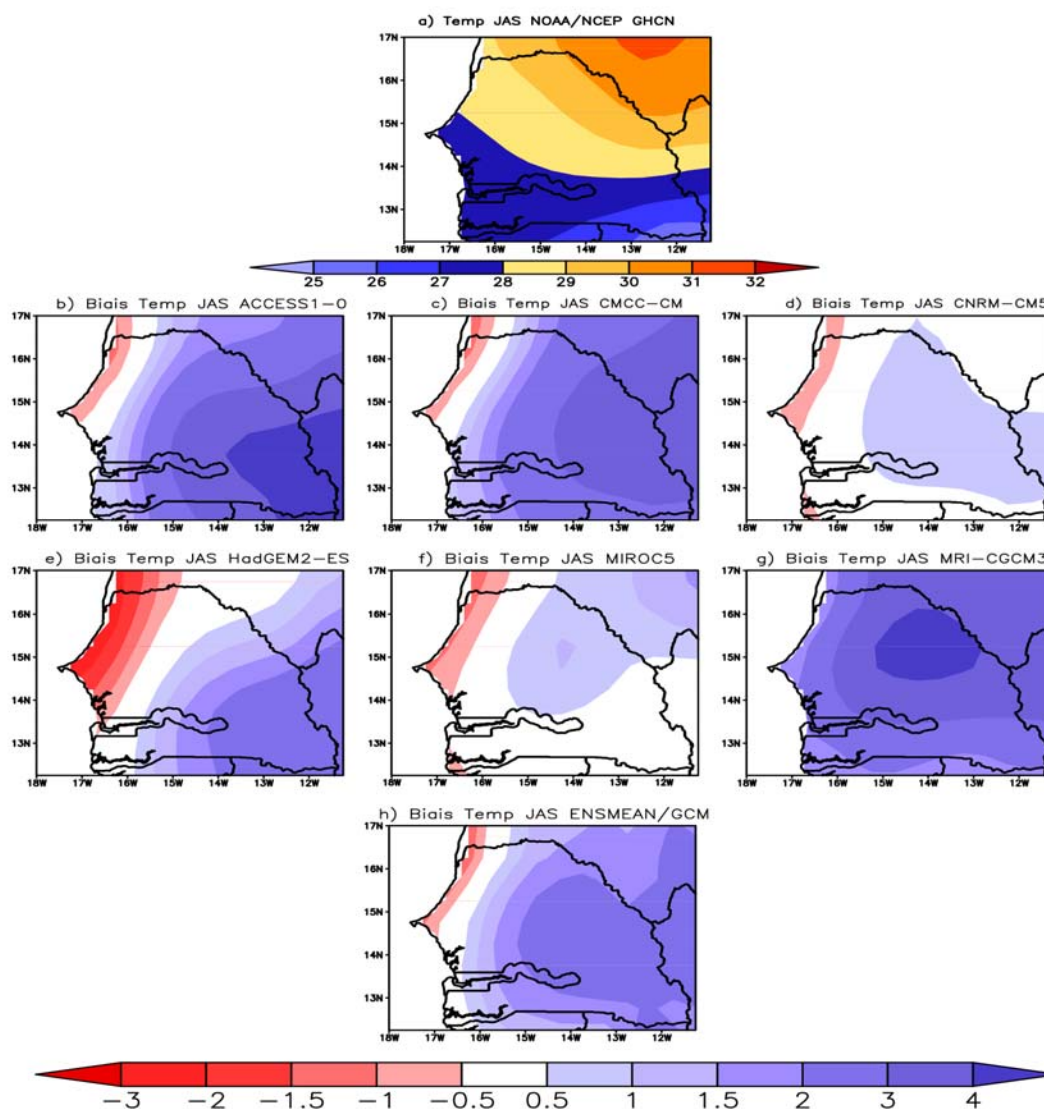


Figure 3 : (a) Température de surface ($^{\circ}\text{C}$) moyennée pendant la saison estivale (juillet à septembre) au Sénégal sur la période 1986-2005 pour la climatologie NOAA/NCEP GHCN + CAMS; (b-h) biais de température (en $^{\circ}\text{C}$) des six (6) modèles CMIP5 utilisés ainsi que leur moyenne d'ensemble

3-2. Changements de la pluie et de la température

Le changement climatique affecte de nombreuses variables climatiques dont les précipitations et la température. Dans cette section, nous analysons les changements de la pluie moyenne et des températures (moyenne, minimale et maximale) dans les trois zones considérées au Sénégal pour le climat futur. La **Figure 4** montre la pluie moyennée sur la période estivale (Juillet-Septembre, JAS) pour la période historique 1986-2005 (HIST, en bleu), le futur proche 2031-2050 (FP, en vert) et le futur lointain 2071-2090 (FL, en rouge) au nord du Sénégal (NS), centre du Sénégal (CS) et Sud du Sénégal (SS) pour la moyenne d'ensemble (ENSMEAN) des modèles CMIP5. Les résultats montrent que les précipitations diminueront dans les futurs proche et lointain dans les trois zones du pays (**Figure 4**). Ces baisses auront des conséquences négatives sur l'agriculture dans le pays qui est la principale source de revenu de près de 60 % de la population. La température (moyenne, minimale et maximale) moyennée sur la période estivale (Juillet-Septembre, JAS) est présentée sur la **Figure 5** pour les trois périodes (historique, futurs proche et lointain). L'analyse des données montre que le nord et le centre du pays

sont plus chauds que le sud pendant la saison des pluies (*Figure 5a, b, c*). Les températures (moyenne, minimale et maximale) augmenteront durant les futurs proche et lointain dans les trois zones du pays (*Figure 5a, b, c*). Ces augmentations seront plus importantes dans le futur lointain (*Figure 5, Tableau 3*). La hausse de température durant les futurs proche et lointain pourrait être néfaste pour les populations locales en ce sens qu'elles pourraient entraîner une augmentation de la consommation d'énergie pour la conservation des denrées et des aliments en milieu rurale et pour le refroidissement et la climatisation en milieu urbain. Le *Tableau 3* synthétise les amplitudes de variations moyennes par rapport à la période historique de la pluie et des températures sur les 3 sous-domaines du Sénégal durant les futurs proche et lointain. Ce *Tableau 3* montre que les plus forts déficits de pluie seront observés sur la partie Sud, communément appelé « grenier du Sénégal » du fait de l'importance de l'agriculture dans cette région. La région centre du Sénégal connaîtra les plus forts taux de réchauffement. Plus particulièrement, au nord et au centre du pays, les températures minimales vont augmenter plus vite que les températures maximales alors qu'au Sud, le phénomène inverse est observé. Cette variation de l'amplitude thermique aura des effets sur la biodiversité et les services écosystémiques, sur l'agriculture et sur la demande en énergie. Les résultats montrent également que la variation de la température au Sénégal pendant la saison des pluies est fortement liée au cycle hydrologique. Plusieurs études [28 - 30] ont montré la relation entre la température et les précipitations. Par exemple, les résultats issus des travaux de [28] ont montré une forte anticorrélation entre les précipitations et la température maximale sur de courtes périodes pendant la saison chaude. Ils ont conclu que cette anticorrélation est causée principalement par la réduction du chauffage solaire par les nuages et l'augmentation du dégagement de la chaleur latente de surface renforcée par l'humidité de surface suite aux précipitations. Cependant, sur de grandes échelles de temps et d'espace, les tendances de la température montrent une forte dépendance avec la quantité de précipitation à l'échelle mondiale [31].

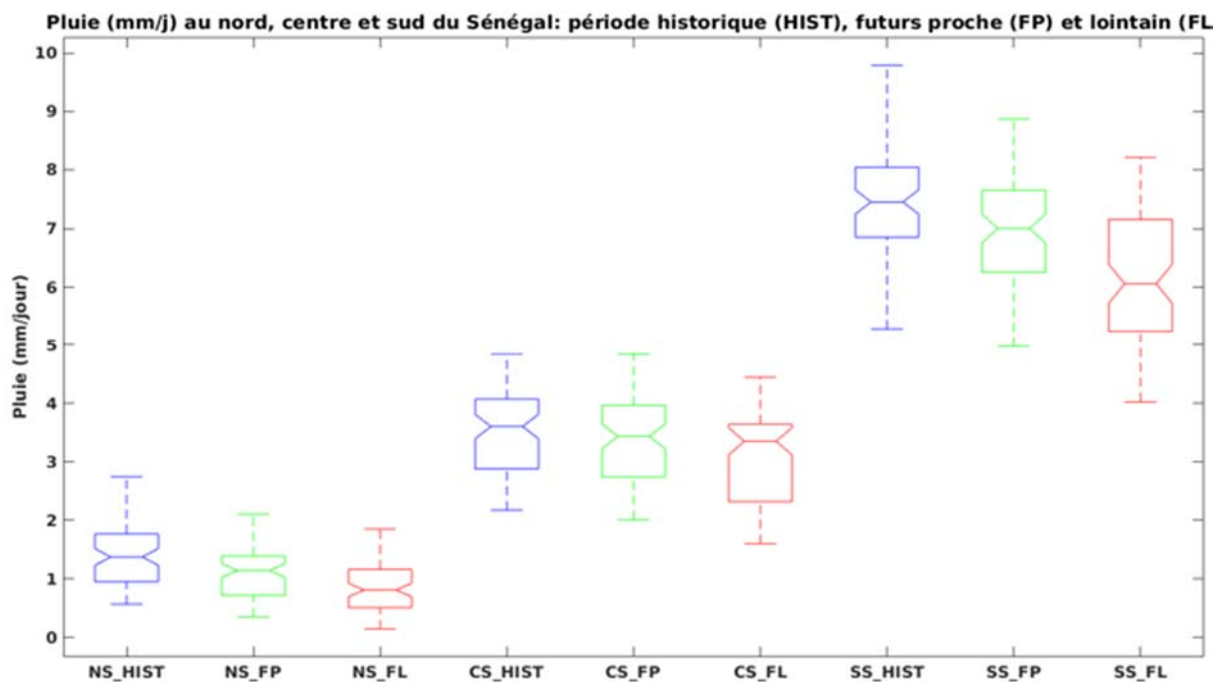


Figure 4 : *Boxplot de la pluie moyennée (mm/jour) pendant la saison estivale (juillet à septembre) pour la période historique 1986-2005 (HIST en bleu), le futur proche 2031-2050 (FP en couleur verte) et le futur lointain 2071-2090 (FL en couleur rouge) au nord du Sénégal (NS), au centre du Sénégal (CS) et au sud du Sénégal (SS) pour la moyenne d'ensemble (Ens/GCMs) des modèles CMIP5*

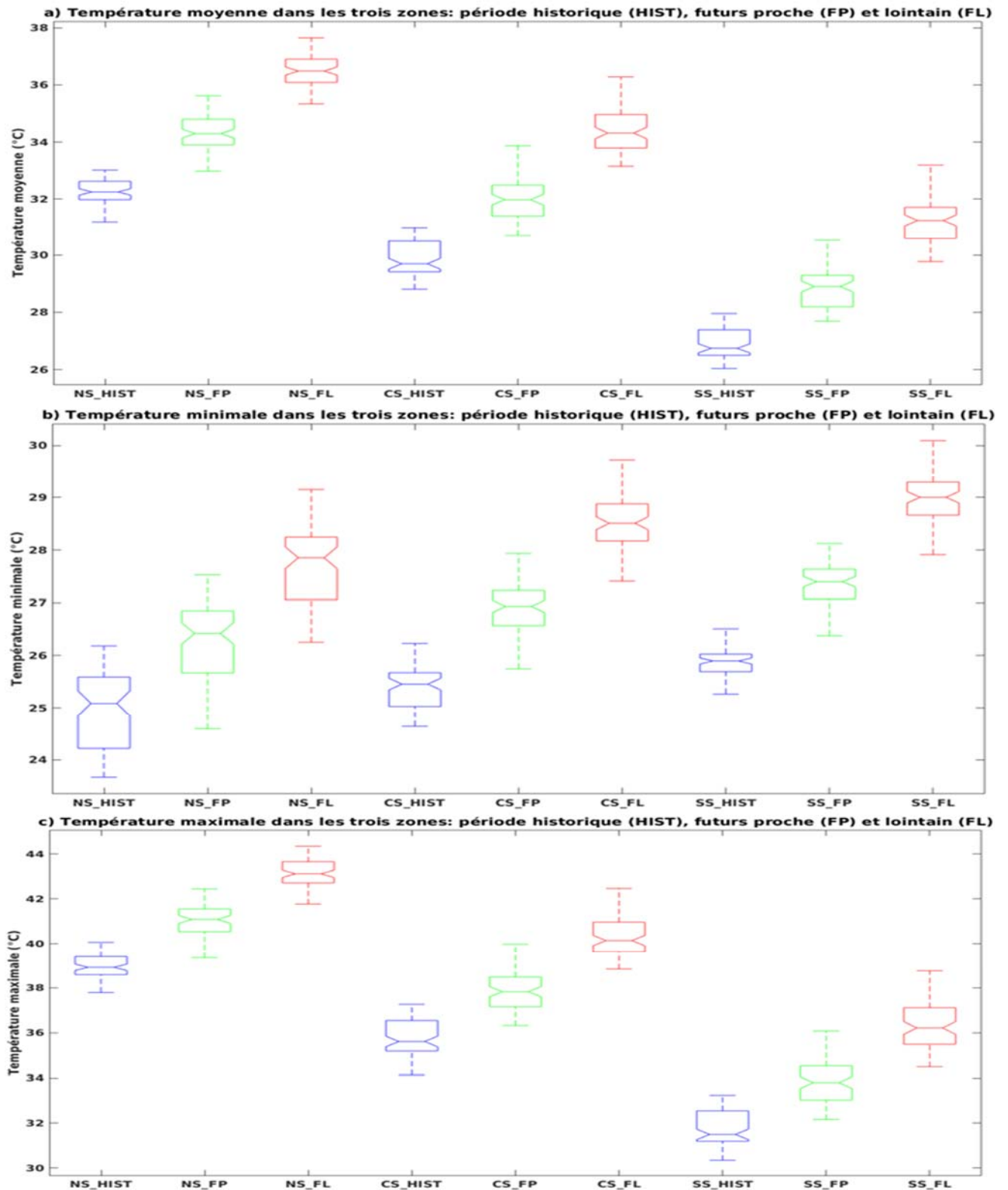


Figure 5 : (a, b, c) Températures moyenne, minimale et maximale ($^{\circ}\text{C}$) pendant la saison estivale (juillet à septembre) pour la période historique 1986-2005 (HIST en bleu), le futur proche 2031-2050 (FP en couleur verte) et le futur lointain 2071-2090 (FL en couleur rouge) au nord du Sénégal (NS), au centre du Sénégal (CS) et au sud du Sénégal (SS) pour la moyenne d'ensemble (Ens/GCMs) des modèles CMIP5

Tableau 3 : Différence de la pluie et de la température entre les futurs (proche et lointain) et la période historique dans les trois sous-domaines du Sénégal (Nord, Centre et Sud). L'unité est en mm/jour pour la pluie (*pr*) et en °C pour les températures (moyenne : *tas* ; minimale : *tasmin* ; maximale : *tasmax*)

	Pr	pr	tas	tas	tasmin	tasmin	tasmax	Tasmax
	FP	FL	FP	FL	FP	FL	FP	FL
NS	-0.19	-0.46	2.12	3.81	1.91	3.89	2.25	3.71
CS	-0.10	-0.33	2.14	4.12	1.90	4.04	2.34	4.11
SS	-0.39	-1.18	1.87	3.99	1.73	3.82	2.03	4.18

3-3. Extrêmes composés de précipitation et de température

3-3-1. Climat présent

En général, au Sénégal, les études sur les extrêmes climatiques se sont principalement focalisées sur les extrêmes d'une seule variable (par exemple les fortes/faibles précipitations ou les extrêmes de température). Dans ce travail, la fréquence des extrêmes composés est définie comme le nombre total de jours avec des extrêmes coïncidents sec, chaud ou humide au cours de la période d'étude. Une bonne compréhension de la variabilité des modes sec/chaud et humide/chaud aidera les pays Ouest africains notamment le Sénégal à mieux identifier les zones nécessitant une irrigation supplémentaire comme stratégie d'adaptation pour la protection du secteur agricole pendant les futurs proche et lointain. Le nombre total d'extrême composé sec/chaud sur la période 1986-2005 est présenté sur la **Figure 6**. L'analyse des données montre que les modèles ACCESS1-0, CMCC-CM, HadGEM2-ES et MRI-CGCM3 ainsi que leur moyenne d'ensemble simulent une forte occurrence de l'extrême composé sec/chaud au nord et au nord-est du Sénégal (**Figure 6a, b, d, f**). Ce résultat est probablement lié aux faibles précipitations enregistrées dans ces zones. Les modèles CNRM-CM5 et MIROC5 prédisent les maxima des composés sec/chaud au nord-est et au sud-est du pays (**Figure 6c, e**). La santé humaine et les rendements des cultures peuvent être affectés négativement par la recrudescence du mode sec/chaud car les fortes températures constituent une menace sérieuse pour l'organisme humain et les plantes. La **Figure 7** présente le nombre total d'extrême composé humide/chaud de juillet à septembre au Sénégal sur la période historique (1986-2005). Tous les modèles ainsi que leur moyenne d'ensemble simulent une forte occurrence du mode humide/chaud en dessous de 16°N notamment au centre-ouest et au sud du Sénégal. Cela pourrait être dû en partie à la forte convection et aux fortes précipitations sur les zones centre et sud du pays pendant la saison estivale. Les valeurs minimales du mode humide/chaud sont simulées au nord-est et au centre-est du pays (**Figure 7**). Les rendements des cultures peuvent être positivement impactés par le mode composé humide/chaud parce que les organismes végétaux ont besoin à la fois des précipitations et de la température pour leur développement et leur croissance.

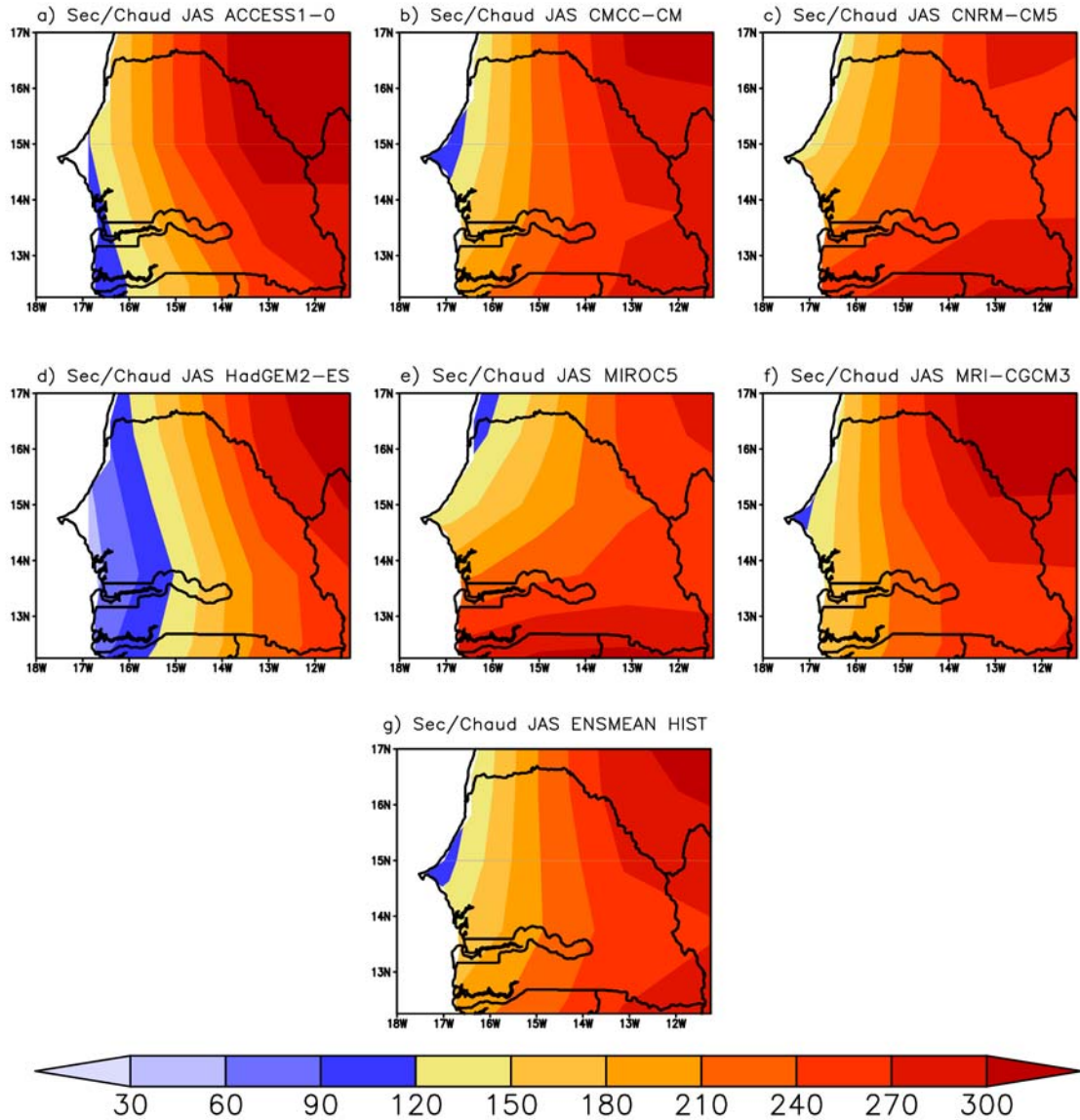


Figure 6 : *Nombre total d'extrêmes composés sec/chaud pendant la saison estivale (juillet à septembre) sur la période historique 1986-2005 pour les six (6) modèles du CMIP5 et leur moyenne d'ensemble*

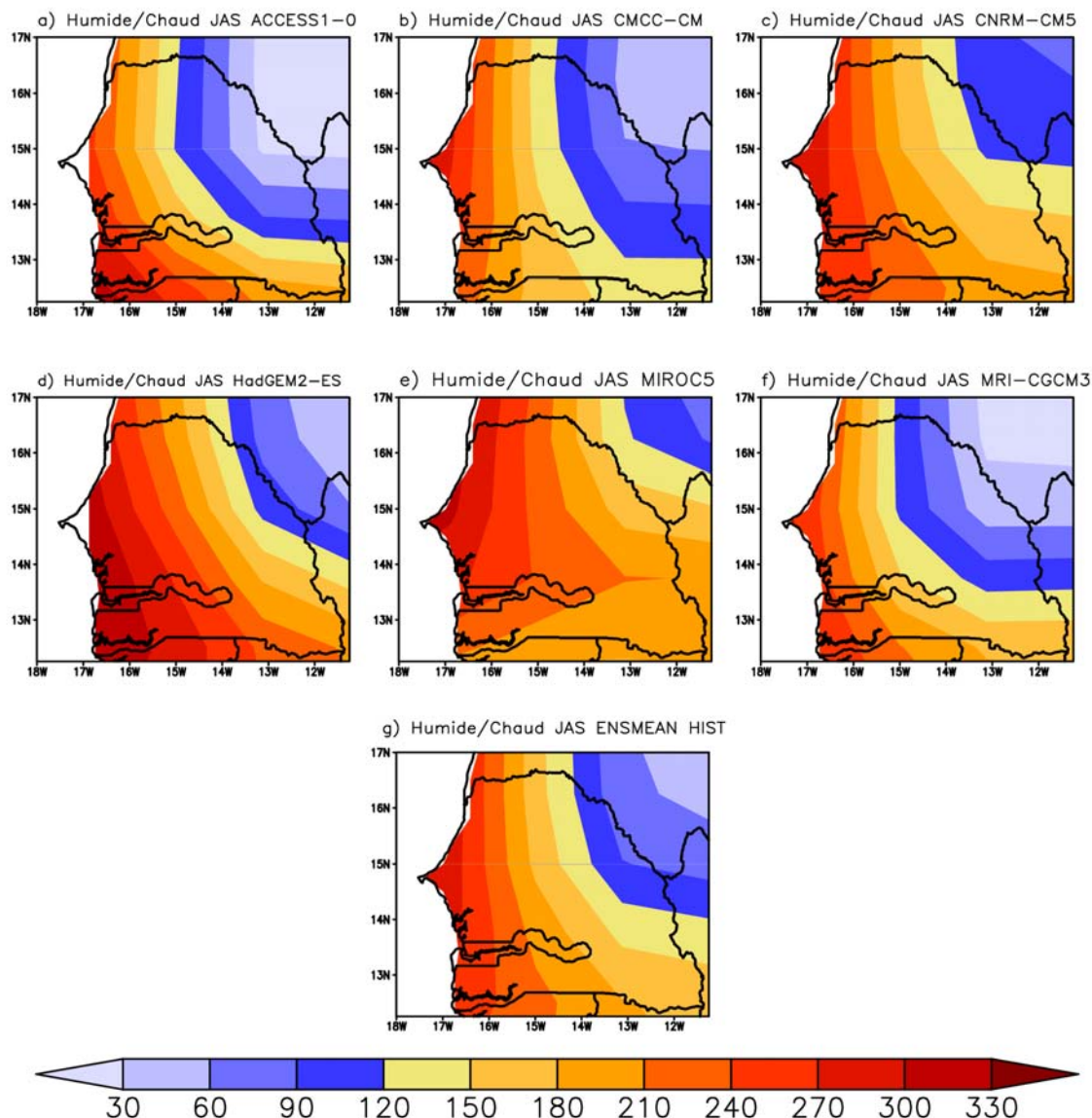


Figure 7 : Nombre total d'extrêmes composés humide/chaud pendant la saison estivale (juillet à septembre) sur la période historique 1986-2005 pour les six (6) modèles du CMIP5 et leur moyenne d'ensemble

3-3-2. Climat futur

Les changements de l'occurrence des extrêmes composés sec/chaud et humide/chaud aux horizons 2050 et 2090 sont présentés dans les **Figures 8, 9, 10, 11**. Les modèles ACCESS1-0 et CNRM-CM5 simulent une baisse de l'extrême composé sec/chaud au nord-est du Sénégal durant les futurs proche et lointain (**Figures 8-9**). Cet extrême augmentera au nord-ouest et sud-ouest du pays dans le futur (**Figure 8-9**). Le modèle HadGEM2-ES simule une baisse de ce mode dans tout le pays durant les futurs proche et lointain. Quant au modèle MIROC5, il simule une baisse de cet indice au sud du pays et une augmentation au centre et au nord du pays (**Figures 8 et 9**). La moyenne d'ensemble des modèles montre une augmentation du mode sec/chaud au nord-ouest, centre-ouest et sud-ouest du Sénégal dans le futur proche (**Figure 8**) et sur presque tout le pays dans le futur lointain (**Figure 9**) sous le scénario d'émission de gaz à effet de serre RCP8.5. Cette hausse sera plus importante durant le futur lointain. Cette augmentation du mode sec/chaud pendant la saison des

pluies aura des effets négatifs sur les cultures agricoles. Les modèles ACCESS1-0, CMCC-CM, CNRM-CM5 et MRI-CGCM3 simulent une baisse du mode humide/chaud au nord-ouest, au centre et au sud du Sénégal dans le futur proche (*Figure 10*). Quant aux modèles HadGEM2-ES et MIROC5, ils simulent une baisse de cet indice dans presque tout le pays dans le futur proche (*Figure 10*). La moyenne d'ensemble des modèles montre une baisse du mode humide/chaud au nord-ouest, au centre et au sud du Sénégal dans le futur proche (*Figure 10*). Dans le futur lointain, tous les modèles ainsi que leur moyenne d'ensemble simulent une baisse du mode humide/chaud sur l'ensemble du Sénégal (*Figure 11*). Cette baisse sera plus importante au centre et au sud du pays avec les modèles HadGEM2-ES, MIROC5 et MRI-CGCM3 (*Figure 11d, e, f*). En outre, une augmentation de la fréquence des épisodes de fortes précipitations a été observée au Sahel malgré la baisse des cumuls annuels de précipitation sur cette région [32]. Après 1993, l'est du Sahel a connu une reprise progressive (retour à des conditions humides) [33]. Cependant, cette tendance est parfois accompagnée d'événements hydro-climatiques extrêmes tels que les inondations et la sécheresse qui ont des impacts socio-économiques dramatiques sur les pays d'Afrique de l'Ouest et du Sénégal en particulier. Certaines études effectuées dans d'autres parties du monde ont également montré une augmentation des extrêmes composés sec/chaud et humide/chaud.

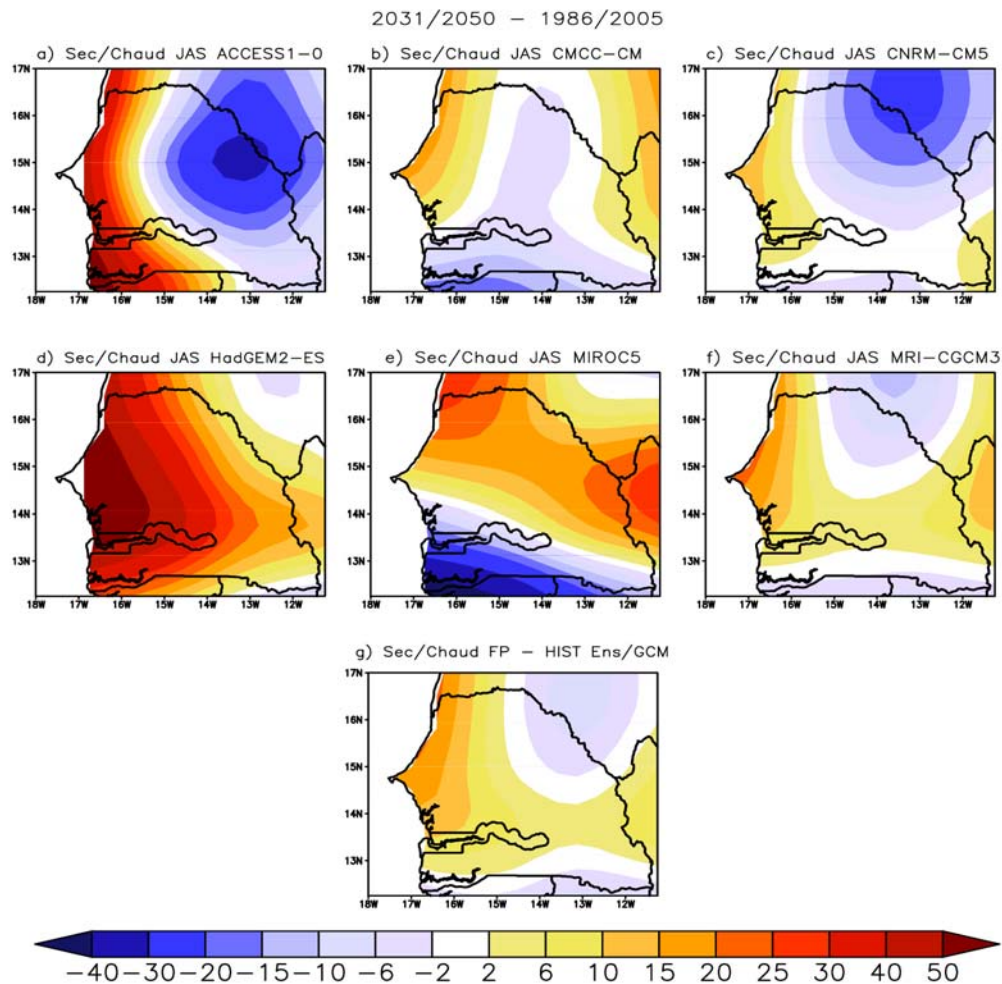


Figure 8 : *Changements dans l'occurrence (jour) de l'extrême composé sec/chaud pendant la saison estivale (juillet à septembre) pour le futur proche 2031-2050 pour les six (6) modèles du CMIP5 et leur moyenne d'ensemble (Ens/GCMs)*

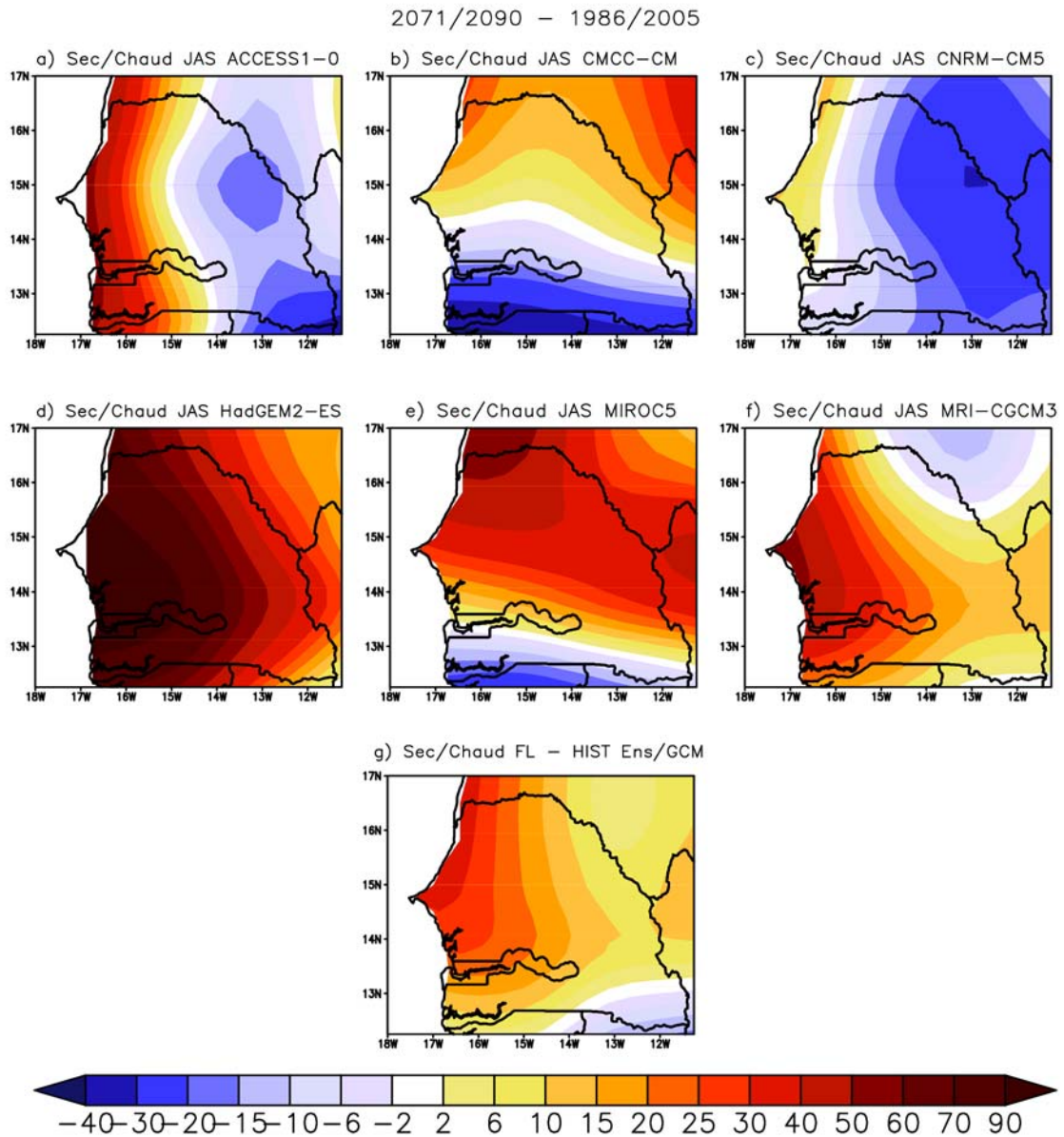


Figure 9 : *Changements dans l'occurrence (jour) de l'extrême composé sec/chaud pendant la saison estivale (juillet à septembre) pour le futur lointain 2071-2090 pour les six (6) modèles du CMIP5 et leur moyenne d'ensemble (Ens/GCMs)*

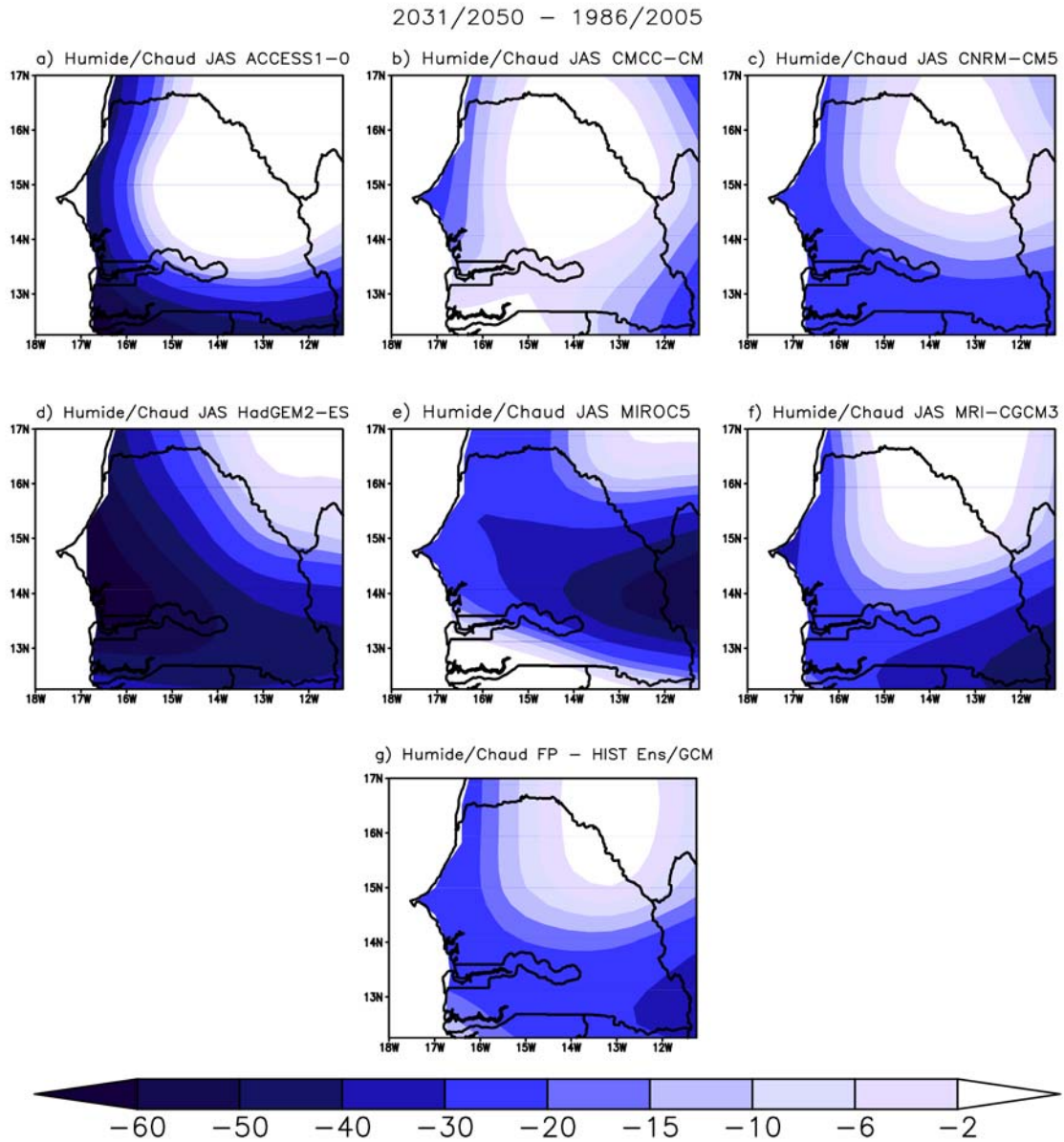


Figure 10 : *Changements dans l'occurrence (jour) de l'extrême composé humide/chaud pendant la saison estivale (juillet à septembre) pour le futur proche 2031-2050 pour les six (6) modèles du CMIP5 et leur moyenne d'ensemble (Ens/GCMs)*

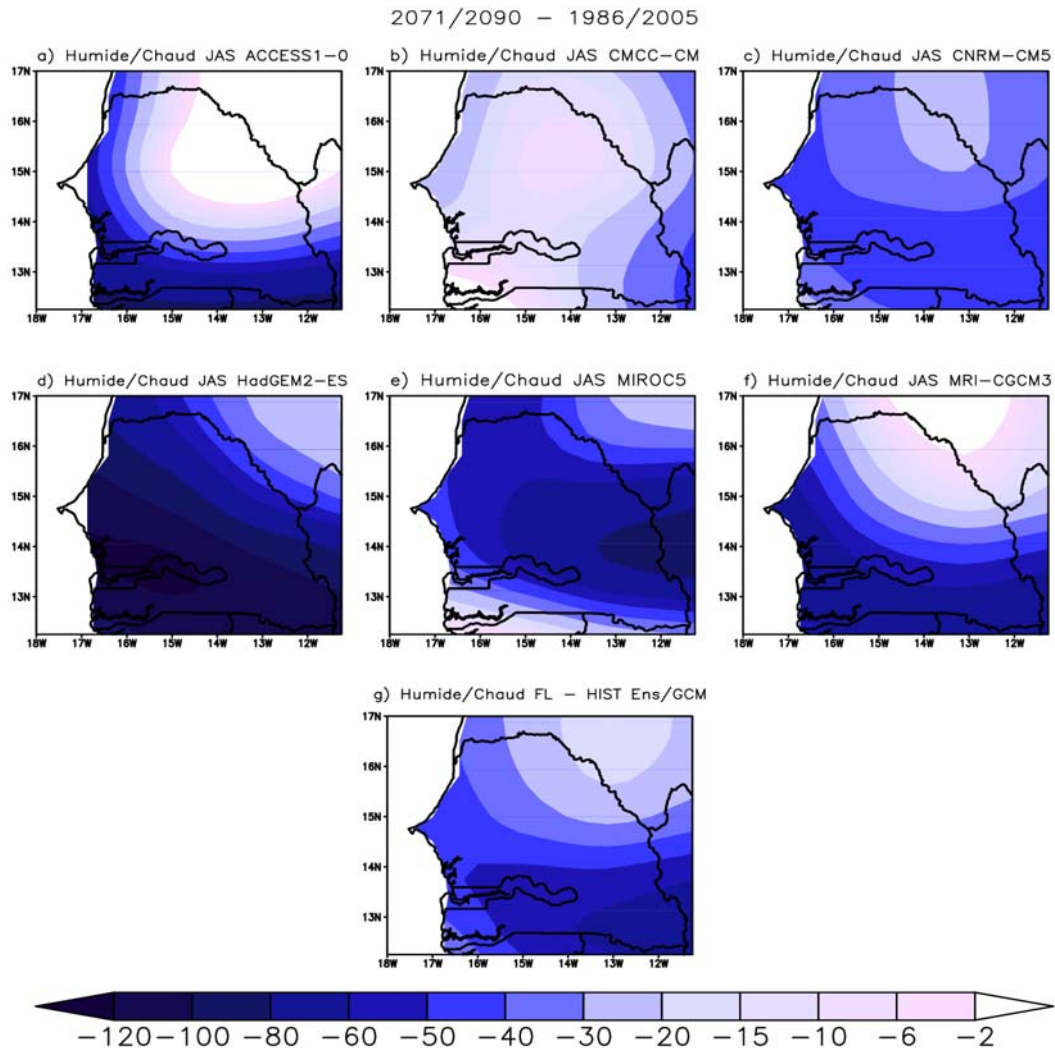


Figure 11 : *Changements dans l'occurrence (jour) de l'extrême composé humide/chaud pendant la saison estivale (juillet à septembre) pour le futur lointain 2071- 2090 pour les six (6) modèles du CMIP5 et leur moyenne d'ensemble (Ens/GCMs)*

4. Conclusion

Cette étude a permis de caractériser les extrêmes composés de pluie et de température au Sénégal. L'analyse des données montre que les précipitations diminueront dans tout le pays durant le futur. Ces baisses auront des conséquences négatives sur l'agriculture sachant que cette activité est la principale source de revenu de près de 60 % de la population. L'analyse de la variabilité des extrêmes composés a mis en exergue une forte occurrence du mode sec/chaud au nord et au nord-est du Sénégal au cours de la période 1986-2005. Tous les modèles ainsi que leur moyenne d'ensemble simulent une forte occurrence de l'extrême composé humide/chaud au centre-ouest et au sud du Sénégal. On note aussi une augmentation du mode sec/chaud au nord-ouest, centre-ouest et sud-ouest du Sénégal dans le futur. Cette augmentation du mode sec/chaud aura des effets négatifs sur l'agriculture. Quant au mode humide/chaud, il diminuera au centre et au sud du Sénégal. Cette étude suggère que les zones centre et nord du pays auront besoin d'une irrigation comme stratégie d'adaptation pour la protection du secteur agricole. En perspective, une étude complémentaire

prenant en compte l'effet de reforestation entreprise dans le cadre du projet de la Grande Muraille Verte, pourrait être entreprise pour caractériser la variabilité spatio-temporelle des extrêmes composés de précipitation et de température en Afrique de l'Ouest et au Sénégal.

Remerciements

Ce travail est soutenu en partie par l'Université Assane SECK de Ziguinchor (Sénégal), le Fond d'Impulsion de la Recherche Scientifique et Technique (FIRST) du MESRI (Sénégal) et le LMI- ECLAIRS2.

Références

- [1] - IPCC, « Summary for Policymakers. Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change », [T.F. STOCKER, D. QIN, G.K. PLATTNER, M. TIGNOR, S.K. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX et P.M. MIDGLEY (eds.)], *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*, (2013)
- [2] - A. BICHET et A. DIEDHIOU, « West African Sahel has become wetter during the last 30 years, but dry spells are shorter and more frequent », *Climate Research*, 75 (2) (2018) 155 - 162
- [3] - N. A. B. KLUTSE, M. B. SYLLA, I. DIALLO, A. SARR, A. DOSIO, A. DIEDHIOU, A. KAMGA, B. LAMPTEY, A. ALI, E. O. GBOBANIYI, K. OWUSU, C. LENNARD, B. HEWITSON, G. NIKULIN, H. PANITZ et M. BUCHNER, « Daily characteristics of West African monsoon rainfall in CORDEX regional climate models », *Theor Appl Climatol*, (2016) Doi: 10.1007/s00704-014-1352-3
- [4] - B. LAMPTEY, « An analytical framework for estimating the urban effect on climate », *International Journal of Climatology*, 30 (2009) 72 - 88
- [5] - T. DINKU, P. CECCATO, E. GROVER-KOPEC, M. LEMMA, S. J. CONNOR et C. F. ROPELEWSKI, « Validation of satellite rainfall products over East Africa's complex topography », *Int. J. Remote Sens*, 8 (7) (2007) 1503 - 1526, doi: 10.1080/01431160600954688
- [6] - M. LEONARD, S. WESTRA, A. PHATAK, M. LAMBERT, B. VANDENHURK, K. MCINNES, J. RISBEY, S. SCHUSTER, D. JAKOB et M. STAFFORD-SMITH, « A compound event framework for understanding extreme impacts », *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang*, 5 (2014) 113 - 128
- [7] - Z. HAO, V. P. SINGH et F. HAO, « Compound Extremes in Hydroclimatology : A Review », *Water*, 10, 718 (2018), doi: 10.3390/w10060718
- [8] - L. E. MCPHILLIPS, H. CHANG, M. V. CHESTER, Y. DEPIETRI, E. FRIEDMAN, N. B. GRIMM, J. S. KOMINOSKI, T. MCPHEARSON, P. MENDEZ-LAZARO, E. J. ROSI et J. S. SHIVA, « Defining extreme events : A cross-disciplinary review », *Earth's Future*, 6 (2018) 441 - 455
- [9] - P. ZHOU et Z. LIU, « Likelihood of concurrent climate extremes and variations over China », *Environ. Res. Lett*, 13 (2018) 094023
- [10] - T. P. ALBRIGHT, A. M. PIDGEON, C. D. RITTENHOUSE, M. K. CLAYTON, B. D. WARDLOW, C. H. FLATHER, P. D. CULBERT et V. C. RADELOFF, « Combined effects of heat waves and droughts on avian communities across the conterminous United States », *Ecosphere*, 1 (2010) 1 - 12
- [11] - Z. HAO, A. A. KOUCHAK et T. J. PHILLIPS, « Changes in concurrent monthly precipitation and temperature extremes », *Environ. Res. Lett*, 8 (2013) 034014
- [12] - K. SEDLMEIER, H. FELDMANN et G. SCHADLER, « Compound summer temperature and precipitation extremes over central Europe », *Theor. Appl. Climatol*, 131 (2018) 1493 - 1501
- [13] - X. WU, Z. HAO, F. HAO et X. ZHANG, « Variations of compound precipitation and temperature extremes in China during 1961 - 2014 », *Science of the Total Environment*, (2019) 663731 - 737

- [14] - M. BENISTON, « Trends in joint quantiles of temperature and precipitation in Europe since 1901 and projected for 2100 », *Geophys. Res. Lett*, 36 (2009) L07707
- [15] - E. MORAN-TEJEDA, S. HERRERA, J. I. LOPEZ-MORENO, J. REVUELTO, A. LEHMANN et M. BENISTON, « Evolution and frequency (1970 - 2007) of combined temperature - precipitation modes in the Spanish mountains and sensitivity of snow cover », *Reg. Environ. Chang*, 13 (2013) 873 - 885
- [16] - B. LIVNEH et M. P. HOERLING, « The physics of drought in the U.S. Central great plains », *J. Clim*, 29 (2016) 6783 - 6804
- [17] - M. CAMARA, A. DIEDHIOU, B. A. SOW, M. D. DIALLO, S. DIATTA, I. MBAYE et I. DIALLO, « Analyse de la pluie simulée par les modèles climatiques régionaux de CORDEX en Afrique de l'Ouest », *Sécheresse*, 24 (2013) 14 - 28. doi: 10.1684/sec.2013.0375
- [18] - I. DIBA, M. CAMARA et A. DIEDHIOU, « Impacts of the Sahel-Sahara Interface Reforestation on West African Climate: Intra-annual Variability and Extreme Temperature Events », *Atmospheric and Climate Sciences*, 9 (2019) 35 - 61. Doi:10.4236/acs.2019.91003
- [19] - G. NIKULIN, C. LENNARD, A. DOSIO, E. KJELLSTROM, Y. CHEN, A. HANSLER, M. KUPIAINEN, R. LAPRISE, L. MARIOTTI, C. F. MAULE, E. V. MEIJGAARD, H. J. PANITZ, J. SCINOCCA et S. SOMOT, « The effects of 1.5 and 2 degrees of global warming on Africa in the CORDEX ensemble », *Environ. Res. Lett*, (2018), <https://doi.org/10.1088/17489326/aab1b1>
- [20] - K. E. TAYLOR, R. J. STOUFFER et G. A. MEEHL, « An overview of CMIP5 and the experiment design », *Bull. Am. Meteorol. Soc*, 93 (2012) 485 - 498
- [21] - C. FUNK, P. PETERSON, M. LANDSFELD, D. PEDREROS, J. VERDIN, S. SHUKLA, G. HUSAK, J. ROWLAND, L. HARRISON, A. HOELL et J. MICHAELSEN, « The climate hazards infrared precipitation with stations-A new environmental record for monitoring extremes », *Sci. Data*, 2 (2015) 150066, doi:10.1038/sdata.2015.66
- [22] - Y. F. VANDEN et H. DOOL, « A global monthly land surface air temperature analysis for 1948-present », *J. Geophys. Res*, (2008) 113, D01103, doi: 10.1029/2007JD008470
- [23] - N. HEROLD, A. BEHRANGI et L. V. ALEXANDER, « Large uncertainties in observed daily precipitation extremes over land », *J Geophys Res Atmos*, 122 (2017) 668 - 681
- [24] - S. I. SENEVIRATNE, N. NICHOLLS, D. EASTERLING, C. M. GOODESS, S. KANAE, J. KOSSIN, Y. LUO, J. MARENGO, K. MCINNES et M. RAHIMI, « Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance climate Change Adaptation; C. B. FIELD, V. BARROS, T. F. STOCKER, D. QIN, D. DOKKEN, K. L. EBI, M. D. MASTRANDREA, K.J. MACH, G. K. PLATTNER, S. K. ALLEN, A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) », *Cambridge University Press : Cambridge, UK*, (2012) 109 - 230 p.
- [25] - E. BEVACQUA, D. MARAUN, I. HOBAEKHAFF, M. WIDMANN et M. VRAC, « Multivariate statistical modeling of compound events via pair-copula constructions: Analysis of floods in Ravenna (Italy) », *Hydrol. Earth Syst Sci*, 21 (2017) 2701 - 2723
- [26] - A. A. AKINSANOLA, V. O. AJAYI, A. T. ADEJARE, O. E. ADEYERI, I. E. GBODE, K. O. OGUNJOBI, G. NIKULIN et A. T. ABOLUDE, « Evaluation of rainfall simulations over West Africa in dynamically downscaled CMIP5 global circulation models », *Theor Appl Climatol*, (2017), DOI 10.1007/s00704-017-2087-8
- [27] - P. M. NIKIEMA, M. B. SYLLA, K. OGUNJOBI, I. KEBE, P. GIBBAA et F. GIORGI, « Multi-model CMIP5 and CORDEX simulations of historical summer temperature and precipitation variabilities over West Africa », *Int. J. Climatol*, (2016), DOI: 10.1002/joc.4856
- [28] - R. A. MADDEN et J. WILLIAMS, « The correlation between temperature and precipitation in the United States and Europe », *Monthly Weather Rev*, 106 (1978) 142 - 147

- [29] - A. DAI, K. E. TRENBERTH et T. R. KARL, « Effects of clouds, soil moisture, precipitation, and water vapor on diurnal temperature range », *J Climate*, 12 (1999) 2451 - 2473
- [30] - K. E. TRENBERTH et D. J. SHEA, « Relationships between precipitation and surface temperature », *Geophys Res Lett*, (2005), 10.1029/2005GL022760
- [31] - L. ZHOU, A. DAI, Y. DAI, R. S. VOSE, C. Z. ZOU, Y. TIAN et H. CHEN, « Spatial dependence of diurnal temperature range trends on precipitation from 1950 to 2004 », *Clim Dyn*, (2008), 10.1007/s00382-008-0387-5
- [32] - L. DESCROIX, N. A. DIONGUE, H. DACOSTA, G. PANTHOU, G. QUANTIN et A. DIEDHIOU, « Evolution des pluies de cumul élevé et recrudescence des crues depuis 1951 dans le bassin du Niger Moyen (Sahel) », *Climatologie*, Vol. 10, (2013)
- [33] - A. ALI, « Climate variability and change in the Sahel. Understanding the current situation by observing Climate change in the Sahel. A challenge for sustainable development », *AGRHYMET Monthly Bulletin (Special Issue)*, (2011) 17 - 20 p.