

UNIVERSITÉ ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



UFR : Sciences et Technologies (**UFR-ST**)

ÉCOLE DOCTORALE : Sciences, Technologies et Ingénierie (**ED-STI**)

Année : 2022

N° d'ordre :

THÈSE DE DOCTORAT

Mention : Océan, Atmosphère et Surfaces Continentales

Spécialité : Sciences de l'Atmosphère et du Climat

Diagnostic et évolution future des caractéristiques des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

Directeur de thèse : Prof. Moctar CAMARA

Présentée par : Jules BASSE

Soutenue publiquement le **25 Février 2023** devant le jury composé de :

M. Salomon SAMBOU	Professeur Titulaire/UASZ	Président
M. Saidou Moustapha SALL	Professeur Titulaire/UCAD	Rapporteur
M. Bamol Ali SOW	Maitre de conférences CAMES/UASZ	Rapporteur
M. Abdoulaye DEME	Maitre de conférences CAMES/UGB	Rapporteur
M. Arona DIEDHIOU	Directeur de recherches/IRD	Examineur
M. Moctar CAMARA	Professeur Titulaire/UASZ	Directeur de Thèse

Dédicaces

À ma famille bien aimée :

Ma femme, Madame **Odette Danoutoua dite Anna MENDY** pour sa compréhension, sa patience et ses mots d'encouragement et ma fille **Martine**.

À mes parents bien aimés :

Papa **Augustin** et maman **Sébia MENDY**, pour m'avoir inculqué le sens du travail, des responsabilités, de la discipline et de l'engagement dès le début de ma vie.

À mes frères et sœur :

Les frères **Ernest** et **Fernando** et ma sœur **Élie**, pour avoir complétés ma quête de connaissance.

Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de thèse, Professeur Moctar CAMARA, à qui je suis très reconnaissant pour le temps qu'il m'a accordé pour mes interrogations et ses conseils qui ont assuré un cadre profond pour mes recherches tout au long de cette thèse. Je le remercie encore pour m'avoir appris à être plus autonome tout au long de ce travail.

J'adresse aussi mes remerciements au Docteur Arona DIEDHIOU, Directeur de Recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) qui a participé à ma formation de chercheur en m'initiant aux chaînes de Markov.

Je remercie tous les enseignants du département de Physique de l'Université Assane de Ziguinchor (UASZ) qui ont participé à ma formation en Physique.

Je remercie également tous les membres du jury en l'occurrence Pr Salomon SAMBOU, Pr Saidou Moustapha SALL, Pr Bamol Ali SOW, Pr Abdoulaye DEME et Dr Arona DIEDHIOU qui ont accepté de juger ce travail scientifique.

J'adresse aussi mes remerciements aux doctorants du Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC) de l'Université Assane de Ziguinchor nommés Hamady Ngansou SABALY, Moustapha SOW, Cheikh Waly DIEDHIOU, Youssouph BADJI, Arame DIEYE, Youssouph COLY, Birane NDOM, Amadou DIOUF, Adama THIANDOUM, Pierre Malang SADIO, Assane NDIAYE et David SAGNA ainsi qu'aux Post-Doctorants Ibrahima DIBA et Alioune Badara SARR ayant su répondre à mes interrogations sur cette thèse.

En fin, je réserve une attention toute particulière à ma famille qui a fait l'effort d'essayer de comprendre ce que je faisais.

Résumé

L'objectif général de l'étude est de diagnostiquer la variabilité spatiale des séquences sèches et pluvieuses, et de déterminer les facteurs qui en sont responsables aux échelles intrasaisonnière et interannuelle en Afrique de l'Ouest pendant la saison estivale. Pour atteindre cet objectif, plusieurs ensemble de données ont été utilisées telles que les données observées de précipitations du Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS), les données de réanalyses Era-Interim et les sorties de modèles climatiques régionaux (MCR) du programme CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling Experiment) sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

Dans la première partie, les caractéristiques des séquences sèches et humides en termes de probabilités d'occurrence à l'aide du processus de chaîne de Markov du premier ordre à l'échelle intrasaisonnière et interannuelle ont été étudiées sur différentes sous-régions d'Afrique de l'Ouest (Sahel Ouest, Sahel Central, zone Soudanienne et Golfe de Guinée). Les résultats montrent que la persistance aux jours secs est notée sur le Sahel Ouest, le Sahel Central et le Golfe de Guinée tandis que la persistance aux jours humides est plus fréquente sur la zone Soudanienne. De plus, le cycle saisonnier des probabilités d'avoir deux jours consécutifs humides (secs) est cohérent à celui des probabilités d'avoir un jour humide (sec). Il a été également montré que le Sahel Ouest connaît une diminution significative des probabilités de jours secs consécutifs à l'échelle interannuelle selon le test de Mann-Kendall à 5%.

L'étude sur la causalité des séquences sèches et humides a été menée dans la seconde partie de ce travail de recherches en comparant la dynamique atmosphérique entre les séquences sèches et humides. Les résultats montrent que le flux de mousson atteint sa valeur maximale à 06:00 dans les basses couches et que le Jet d'Est Tropical (JET) est maximale à 00:00 dans les hautes couches. Ces deux flux sont plus intenses pendant les séquences humides que durant celles qui sont sèches. Dans les couches moyennes, le Jet d'Est Africain (JEA) est plus fort et plus au sud (en-dessous de 15°N) pendant les séquences sèches que durant les phases humides. L'analyse de la vitesse verticale montre deux zones de mouvements ascendants pendant les deux séquences. Néanmoins, l'intensité est plus forte pendant les séquences humides. De plus, une forte activité des ondes d'est africaines (OEA) (maximale à 00:00) et une forte humidité relative sont associées à l'affaiblissement de la hauteur géopotentielle dans les basses couches pendant les séquences humides.

La dernière partie de notre étude est consacrée à l'analyse de l'évolution future des probabilités de jours secs et humides en Afrique de l'Ouest et au Sénégal. Les résultats indiquent qu'une augmentation de probabilités de persistance aux jours secs est prévue au Sahel, avec une augmentation plus prononcée dans le futur lointain ainsi que sous le scénario RCP8.5. Cette augmentation est associée à une diminution de probabilités de persistance aux jours humides. De plus, il est prévu une augmentation substantielle dans le futur lointain et sous le scénario RCP8.5 des probabilités de 10 jours consécutifs secs sur toutes les sous-régions, à l'exception du Golfe de Guinée. Cette augmentation est associée à une diminution de probabilités de jours humides consécutifs dans ces régions. Au Sénégal, une augmentation des séquences sèches et une diminution des séquences humides (i.e, 7 et 10 jours) sont prévues dans les périodes futures sous les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Néanmoins, les changements seront généralement plus forts durant le futur lointain et sous le scénario RCP8.5 dans la majeure partie du pays particulièrement au sud (nord et centre) du pays pour les séquences sèches (humides).

Les informations sur l'évolution future des probabilités des jours secs et humides futures peuvent être utilisées pour prendre des décisions relatives à la gestion des ressources en eau pour l'agriculture et l'élevage; ce qui permet de réduire les impacts futurs néfastes des changements climatiques sur les populations locales.

Mots clés : Afrique de l'Ouest, Sénégal, Chaîne de Markov, Séquences humides, Séquences sèches, Scénarios climatiques, Futur proche, Futur lointain

Abstract

This study aims at diagnosing the spatial variability of dry and wet spells, and at determining the factors responsible for the occurrences of these rainfall sequences at intra-seasonal and interannual timescales in West African summer season during the present time and the future. To accomplish this objective, several data sets were used such as observed precipitation data from the Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS), the Era-Interim reanalysis data and regional climate model (RCM) outputs from the CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling Experiment) program under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios.

In the first part, the characteristics of dry and wet spells in terms of probabilities of occurrence using first-order Markov chain processes at the intraseasonal and interannual scales were studied in different sub-regions of West Africa (Western Sahel, Central Sahel, Sudan Zone and Guinea Coast). The results show the persistence of dry days over the Western Sahel, Central Sahel and Guinea Coast while the persistence of wet days is more frequent over the Sudanian Zone. Furthermore, the seasonal cycle of the probability of having two consecutive wet (dry) days is consistent with the seasonal cycle of the probability of having one wet (dry) day. It was also shown that the Western Sahel affected by a significant decrease in consecutive dry days probability according to the Mann-Kendall 5% test on an interannual scale.

The second part of this study analyses the dynamic and thermodynamic conditions associated with these two contrasting sequences. The results show that the monsoon flow reaches its maximum value at 06:00 in the lower layers and the Tropical Easterly Jet (TEJ) is maximum at 00:00 in the upper layers. Both flows are stronger during wet spells than during dry spells. In the middle layers, the African Easterly Jet (AEJ) is stronger and further south (below 15°N) during the dry spells than during the wet spells. The vertical velocity analysis shows two areas of upward motion during the two spells. However, the intensity is higher during wet spells. In addition, strong African Easterly Waves (AEW) activity (maximum at 00:00) and high relative humidity are associated with the weakening of the geopotential height in the lower layers during the wet spells.

Finally, the study focused on the analysis of the future evolution of dry and wet day probabilities in West Africa and Senegal. The results indicate that an increase in the probability of persistence on dry days is projected over the Sahel, with a stronger strengthening in the far future and under the RCP8.5 scenario. This increase is associated with a decrease in the probability of the persistence of wet days. Furthermore, a substantial increase in the probability of 10 consecutive dry days is projected in the far future under the RCP8.5 scenario over all sub-

regions except the Guinea Coast. This increase is associated with a decrease in the probability of consecutive wet days in these regions. In Senegal, an increase in dry spells and a decrease in wet spells (i.e. 7 and 10 days) are projected in the future periods under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. Nevertheless, changes will generally be stronger in the far future and under the RCP8.5 scenario in most parts of the country especially in the south (center and north) for dry (wet) sequences.

Information on future changes in the probability of future dry and wet days can be used to make water management decisions for agriculture and pastoralism, thereby reducing future adverse impacts of climate change on local populations.

Keywords. West Africa, Senegal, Markov chain, Wet spells, Dry spells, Climate scenarios, Near future, Far future

Liste des publications

Articles publiés et issus de la thèse

1. **J Basse**, M Camara, I Diba, A Diedhiou (2021) Probability of dry and wet spells over West Africa during the summer monsoon season - *Scientific Research and Essays*. 16(3): 20-35. Doi: [10.5897/SRE2021.6718](https://doi.org/10.5897/SRE2021.6718)
2. **J Basse**, HN Sabaly, I Diba, AB Sarr, M Camara, A Diedhiou (2021) Synoptic variability associated with wet and dry spells in the Western Sahel - *Theoretical and Applied Climatology*, 146: 1019-1029. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03774-y>

Contribution dans d'autres articles

1. AB Sarr, I Diba, **J Basse**, HN Sabaly, M Camara (2019) Future evolution of surface temperature extremes and the potential impacts on the human health in Senegal - *African Journal of Environmental Science and Technology*, 13(12): 481-509. Doi: [10.5897/AJEST2019.2757](https://doi.org/10.5897/AJEST2019.2757)
2. HN Sabaly, **J Basse**, I Diba, AB Sarr, M Camara (2021) Analysis of wind distribution and potential wind energy in Senegal with a focus on Basse Casamance - *International Journal of Physical Sciences*, 16(2):52-67. Doi: [10.5897/IJPS2020.4918](https://doi.org/10.5897/IJPS2020.4918)
3. I Diba, **J Basse**, M Ndiaye, HN Sabaly, A Diedhiou, M Camara (2021) Potential Dust Induced Changes on the Seasonal Variability of Temperature Extremes Over the Sahel: A Regional Climate Modeling Study - *Front. Earth Sci.* 8:591150. Doi: [10.3389/feart.2020.591150](https://doi.org/10.3389/feart.2020.591150)
4. I Diba, M Camara, AB Sarr, **J Basse**, HN Sabaly, A Diedhiou (2021) Caractérisation des extrêmes composés de précipitation et de température au Sénégal: climat présent et futur - *Afrique Science*, 18(1): 12-30. ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.net>

Liste des publications

5. I Diba, ML Mbaye, HN Sabaly, **J Basse**, M Camara (2021) Projections climatiques dans des régions orographiques d'Afrique sous les scénarios d'un réchauffement de 1.5°C et 2°C - ***International Journal of Innovation and Applied Studies***, 34(3): 455-468. ISSN 2028-9324

6. I Diba, M Camara, **J Basse**, HN Sabaly, A Diedhiou (2021) Variabilité interannuelle des extrêmes pluviométriques au Sénégal: climat présent - ***Climat et Développement***, n°30

Liste des acronymes

AEJ	African Easterly Jet
AMJ	Avril Mai Juin
AO	Afrique de l'Ouest
CFSv2	Climate Forecast System, version 2
CHIRPS	Climate Hazards group Infra-Red Precipitation with Stations
CHPClim	Climate Hazards center's Precipitation Climatology
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
ER	Écart Relatif
CPC	Climate Prediction Center
DTS	Dépression Thermique Sahélienne
ECMWF	European Centre for Medium Range Weather Forecast
FD	Fouta Djallon
FIT	Fond Inter Tropical
FMI	Fond Monétaire International
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
HIST	Historique
IR	Infra-Red
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
ITCZ	InterTropical Convergence Zone
JAS	Juillet Août Septembre
JEA	Jet Est Africain
JET	Jet d'Est Tropical
JFM	Janvier Février Mars
LEF	Langue d'Eau Froide
LOSEC	Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat
MAO	Mousson d'Afrique de l'Ouest
MC	Mont Cameroun
MCG	Modèle Climatique Global
MCG	Modèle de Circulation Globale
MCR	Modèle Climatique Régionale
MK	Mann-Kendall

Liste des acronymes

NASA	National Aeronautic and Space Administration
NCDC	National Climate Data Center
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OEA	Onde d'Est Africain
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
OND	Octobre Novembre Décembre
PP	Période de Projection
RCP	Representative Concentration Pathway
SDII	Simple Daily Intensity Index
TEJ	Tropical Easterly Jet
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
TSM	Température de Surface de la Mer
UASZ	Université Assane SECK de Ziguinchor
ZCIT	Zone de Convergence Intertropicale

Liste des figures

Figure 1.1: Schéma des principales caractéristiques du système de mousson ouest-africain pendant l'été boréal : circulations méridionales et moyennes zonales (adapté de Peyrillé, 2006).

Figure 1.2: Conditions atmosphériques (vents et précipitations) et océaniques (SST, en couleur) dans le Golfe de Guinée en été boréal, avec la présence de la langue d'eau froide et de l'ITCZ. Source: www.amma-international.org (28 janvier 2022)

Figure 1.3: Cycle saisonnier moyen des précipitations (mm/jr) sur la période 1981-2020 (données CHIRPS) pour les zones: a°) Sahel Ouest, b°) Sahel Central, c°) Zone Soudanienne et d°) Golfe de Guinée.

Figure 1.4: Cycle saisonnier moyen des précipitations (mm/jr) sur la période 1981-2020 (données CHIRPS), a°) janvier à mars, b°) avril à juin, c°) juillet à septembre et d°) octobre à décembre.

Figure 1.5: Topographie et réseau hydrographique en Afrique de l'Ouest. Source: <https://www.oecd.org/fr/csao/cartes/> (28 janvier 2022).

Figure 1.6: Anomalies standardisées de précipitations annuelles: a°) au Sahel Ouest, b°) Sahel Central, c°) Zone Soudanienne et d°) Golfe de Guinée pour la période 1981-2020 (Données CHIRPS). Une moyenne glissante sur cinq (05) ans (courbe noire) est superposée pour montrer la transition d'une période sèche à une période humide.

Figure 1.7: Variabilité interannuelle des anomalies pluviométriques (données CHIRPS) et des anomalies de TSM de la saison AMJ dans la région Niño 3.4 (ersstv5) sur la période 1981-2010. La valeur de la corrélation (corr.) entre les précipitations et Niño 3.4 est indiquée pour chaque zone.

Figure 2.1: Schéma de la première phase de l'expérience CORDEX (Giorgi et al., 2009).

Figure 2.2: Domaines régionaux étudiés dans le cadre de l'expérience CORDEX (Giorgi et al., 2009).

Figure 2.3: Précipitations estivale (Juillet-Septembre) moyennes sur le Sahel occidental sur la période 1988 à 2010.

Figure 2.4: Cycle saisonnier des précipitations sur le Sahel Ouest au cours d'une année particulière (1996): les barres cyan représentent les précipitations moyennes quotidiennes, tandis que les barres hachurées magenta et noires représentent les séquences sèches et humides, respectivement. La ligne continue noire fait référence à la variation de la pluviométrie moyenne

climatologique (*clim*) sur la période 1988-2010, tandis que la ligne continue bleue (rouge) représente $clim + \sigma$ ($clim - \sigma$), respectivement. σ est l'écart-type.

Figure 2.5: Précipitations moyennes estivales (JAS en mm) observées avec les données CHIRPS sur le domaine d'étude (Afrique de l'Ouest) durant la période 1981-2020. Les rectangles colorés indiquent les sous-régions considérées: Sahel Ouest (magenta), Sahel Central (rouge), Zone Soudanienne (noir) et Golfe de Guinée (bleu). Les zones montagneuses sont également représentées: Montagnes du Fouta Djallon (FJ), Plateau de Jos (Jos) et montagnes du Cameroun (CM).

Figure 2.6: Zones climatiques du Sénégal: Sud du Sénégal (noire), Est du Sénégal (bleue), Centre du Sénégal (rouge) et Nord du Sénégal (verte).

Figure 5.1: Variabilité des précipitations pour la période historique (a), et changement dans le futur proche (b et c) et dans le futur lointain (d et e) pour les scénarios RCP4.5 et du RCP8.5 par rapport à la période historique.

Figure 5.2: Probabilités de jours secs (en haut) et de jours humides (en bas) pour la période historique (a, d), pour le scénario RCP4.5 moins la période historique (b, e) et pour le scénario RCP8.5 moins la période historique (c, f) pendant le futur proche (2021-2050). Les changements sont estimés en pourcentage.

Figure 5.3: Identique à la figure 5.2, mais pendant le futur lointain (2071-2100).

Figure 5.4: Identique à la figure 5.2, mais pour les probabilités de jour sec à sec (en haut) et de jour sec à humide (en bas) pendant le futur proche (2021-2050).

Figure 5.5: Identique à la figure 5.2, mais pour les probabilités de jour sec à sec (en haut) et les probabilités de jour sec à humide (en bas) pendant le futur lointain (2071-2100).

Figure 5.6: Identique à la figure 5.2, mais pour les probabilités de jour humide à humide (en haut) et les probabilités de jour humide à sec (en bas) pendant le futur proche (2021-2050).

Figure 5.7: Identique à la figure 5.2, mais pour les probabilités de jour humide à humide (en haut) et les probabilités de jour humide à sec (en bas) pendant le futur lointain (2071-2100).

Figure 5.8: Identique à la figure 5.2, mais pour les probabilités de 7 jours secs consécutifs (en haut) et pour les probabilités de 10 jours secs consécutifs (en bas) pendant le futur proche (2021-2050).

Figure 5.9: Identique à la figure 5.2, mais pour les probabilités de 7 jours secs consécutifs (en haut) et pour les probabilités de 10 jours secs consécutifs (en bas) pendant le futur lointain (2071-2100).

Figure 5.10: Identique à la figure 5.2, mais pour les probabilités de 7 jours humides consécutifs (en haut) et pour les probabilités de 10 jours humides consécutifs (en bas) pendant le futur proche (2021-2050).

Figure 5.11: Identique à la figure 5.2, mais pour les probabilités de 7 jours humides consécutifs (en haut) et pour les probabilités de 10 jours humides consécutifs (en bas) pendant le futur lointain (2071-2100).

Figure 5.12: Évolution temporelle et tendances des anomalies de précipitations: a°) Sahel Ouest, b°) Sahel Central, c°) Zone Soudanienne et d°) Golfe de Guinée au cours de la saison des pluies (JAS) selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

Figure 5.13: Identique à la figure 5.12, mais pour les probabilités d'avoir un jour sec.

Figure 5.14: Identique à la figure 5.12, mais pour les probabilités d'avoir un jour sec précédé d'un jour sec.

Figure 5.15: Identique à la figure 5.12, mais pour les probabilités d'avoir un jour sec précédé d'un jour humide.

Figure 5.16: Identique à la figure 5.12, mais pour les probabilités d'avoir 7 jours secs consécutifs.

Figure 5.17: Identique à la figure 5.12, mais pour les probabilités d'avoir 10 jours secs consécutifs.

Figure 5.18: Boîtes à moustaches des changements projetés sur les probabilités des séquences sèches pendant le futur proche: (a) Sahel Ouest, (b) Sahel Central, (c) Zone Soudanienne et (d) Golfe de Guinée.

Figure 5.19: Identique à la figure 5.18, mais pendant le futur lointain

Figure 5.20 : Boîtes à moustaches des changements projetés sur les probabilités des séquences humides pendant le futur proche: (a) Sahel Ouest, (b) Sahel Central, (c) Zone Soudanienne et (d) Golfe de Guinée

Figure 5.21: Identique à la figure 5.20, mais pendant le futur lointain

Figure 5.22 : Changement moyen des précipitations pour les scénarios RCP4.5 (a, d), RCP8.5 (b, e) et la différence entre les deux scénarios (c, f) à partir de la moyenne d'ensemble des quatre modèles de l'expérience CORDEX-Africa durant le futur proche (2021-2050) (en haut) et le futur lointain (2071-2100) (en bas) au Sénégal.

Figure 5.23: Changement moyen pour les scénarios RCP4.5 (a, d) et RCP8.5 (b, e) par rapport à la période de référence et la différence entre les deux scénarios (c, f) pour les probabilités de périodes de sécheresse de 7 jours (en haut) et 10 jours (en bas) à partir de la moyenne d'ensemble des quatre modèles de l'expérience CORDEX-Africa durant le futur proche (2021-2050) au Sénégal

Figure 5.24: Identique à la figure 5.23, mais pendant le futur lointain (2071-2100)

Figure 5.25: Changement moyen pour les scénarios RCP4.5 (a, d) et RCP8.5 (b, e) par rapport à la référence et la différence entre les deux scénarios (c, f) pour les probabilités de périodes pluvieuses de 7 jours (en haut) et de 10 jours (en bas) à partir de la moyenne d'ensemble des quatre modèles de l'expérience CORDEX-Africa durant le futur proche (2021-2050) au Sénégal

Figure 5.26: Identique à la figure 5.25, mais pendant le futur lointain (2071-2100)

Figure 5.27: Evolution temporelle des précipitations moyennées sur la période estivale (juillet à septembre) par rapport à la période de référence (1976-2005) au Sénégal: a°) Sud du Sénégal, b°) Est du Sénégal, c°) Centre du Sénégal et d°) Nord du Sénégal. Les moyennes glissantes sur 10 ans sont superposées sur chaque histogramme

Figure 5.28: Evolution temporelle des probabilités des séquences sèches de 7 jours moyennées sur la période estivale (juillet à septembre) par rapport à la période de référence (1976-2005) au Sénégal: a°) Sud du Sénégal, b°) Est du Sénégal, c°) Centre du Sénégal et d°) Nord du Sénégal. Les moyennes glissantes sur 10 ans sont superposées sur chaque histogramme

Figure 5.29: Identique à la figure 5.28, mais pour les probabilités des séquences sèches de 10 jours

Figure 5.30: Evolution temporelle des probabilités des séquences humides de 7 jours moyennées sur la période estivale (juillet à septembre) par rapport à la période de référence (1976-2005) au Sénégal: a°) Sud du Sénégal, b°) Est du Sénégal, c°) Centre du Sénégal et d°) Nord du Sénégal. Les moyennes glissantes sur 10 ans sont superposées sur chaque histogramme

Figure 5.31: Identique à la figure 5.30, mais pour les probabilités des séquences humides de 10 jours

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Les caractéristiques des scénarios (source : Moss et al., 2010)

Tableau 2.2 : Informations sur les Modèles Climatiques Régionaux (MCR) utilisés ainsi que leurs instituts d'appartenance, les Modèles Climatiques Globaux (MCG) forceurs et les périodes de simulation

Tableau 5.1 : Changements futurs (en %) par rapport à la période de référence (1976-2005) dans les différentes sous-régions de l'Afrique de l'Ouest.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	v
Liste des publications	vii
Liste des acronymes	ix
Liste des figures	xi
Liste des tableaux	xvi
Introduction générale	1
CHAPITRE 1 : Généralités sur la mousson de l’Afrique de l’Ouest	5
1.1 Eléments majeurs du système de MAO.....	6
1.1.1 Basses couches.....	7
1.1.2 Moyennes et hautes couches.....	9
1.1.3 Zones de convection humides et sèches.....	11
1.2 Variabilité des précipitations.....	13
1.2.1 Cycle saisonnier.....	13
1.2.2 Variabilité interannuelle.....	16
CHAPITRE 2 : Données et méthodes	19
2.1 Données.....	20
2.1.1 Observations.....	20
2.1.2 Expérience CORDEX.....	20
2.1.3 Réanalyses.....	24

2.2	Méthodes et Domaine d'étude.....	24
2.2.1	Détections des séquences sèches et humides.....	24
2.2.2	Chaine de Markov.....	27
2.2.3	Analyses statistiques.....	30
2.2.4	Domaine d'étude.....	31
CHAPITRE 3 : Probabilités des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest pendant la mousson d'été.....		35
3.1	Résumé étendu de l'article Basse et al. (2021a).....	36
3.2	Article de Basse et al. (2021a).....	38
CHAPITRE 4 : Variabilité synoptique associée aux séquences sèches et humides au Sahel Ouest.....		56
4.1	Résumé étendu de l'article Basse et al. (2021b)	57
4.2	Article de Basse et al. (2021b).....	60
CHAPITRE 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal.....		73
5.1	Variabilité spatiale des précipitations en été boréal.....	74
5.2	Variabilité spatiale des probabilités initiales, de transition et des séquences sèches et humides en été boréal.....	75
5.3	Changements régionaux moyens des précipitations et des probabilités des séquences sèches et humides.....	84
5.4	Variabilité interannuelle des probabilités initiales, de transition et des séquences sèches et humides en été boréal	86
5.5	Incertitudes sur les probabilités des séquences sèches et humides.....	91

Table des matières

5.6	Variabilité spatiale des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides au Sénégal.....	97
5.7	Evolution temporelle des précipitations et des probabilités des séquences sèches et humides au Sénégal.....	104
	Conclusion générale et perspectives.....	112
	Bibliographie.....	116

Introduction générale

La majeure partie de l'Afrique de l'Ouest a un climat aride et semi-aride avec une grande variabilité spatio-temporelle des précipitations. Les sécheresses sont très courantes dans cette région, et persistent souvent pendant plusieurs années, précédées ou suivies d'inondations extrêmes. La plupart des moyens de subsistance et des activités socio-économiques restent cependant tributaires de la pluie, ce qui entraîne des impacts négatifs graves pendant les périodes d'occurrence des extrêmes climatiques. Une succession d'événement extrême était capable d'inverser la croissance économique nationale réalisée sur une période de plusieurs années. Ainsi, aucun développement durable ne peut être atteint en Afrique de l'Ouest sans une intégration efficace des informations climatiques dans les politiques, plans et programmes de développement. Selon Janicot et al. (2009), l'Afrique de l'Ouest reçoit entre 70 et 85 % des précipitations annuelles totales pendant la saison de la mousson d'été, qui selon l'organisation météorologique mondiale (OMM) s'étend de juin à septembre. Ces précipitations ont un impact significatif sur l'agriculture car la majorité de la population dépend du secteur agricole. Cette dernière constitue le cœur de l'économie de la plupart des pays de la région (Sylla et al., 2013). Selon le Fonds Monétaire International (Cottarelli, 2012), le secteur agricole emploie plus de la moitié de la population active totale et fournit un moyen de subsistance à une multitude de petits producteurs dans les zones rurales. L'importance des précipitations pour les populations et les écosystèmes fait que plusieurs travaux sur l'analyse de la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest portent sur ce paramètre (Bodian, 2012). Il existe cependant une grande variabilité des précipitations dans la région, tant dans leur distribution spatio-temporelle que dans leur ampleur. En témoignent les récentes sécheresses des années 1970 qui ont touché la plupart des pays d'Afrique de l'Ouest. Des inondations localisées ont cependant été enregistrées dans certains endroits durant la saison des pluies. La variabilité spatio-temporelle des précipitations sur l'Afrique de l'Ouest à différentes échelles de temps est due à des caractéristiques topographiques complexes et à la zone de convergence intertropicale (ZCIT) (Froidurot and Diedhiou, 2017). Les précipitations en Afrique de l'Ouest sont donc caractérisées par des périodes de rupture (séquences sèches) et de reprise (séquences humides). L'apparition de ces périodes pendant la mousson d'été en Afrique de l'Ouest détermine la disponibilité en eau pour le secteur agricole. Selon Sylla et al. (2013), les périodes de rupture et de reprise des pluies de mousson constituent l'un des événements intéressants correspondant à des activités agricoles intenses en Afrique de l'Ouest. Pendant les périodes de croissance des cultures, les longues séquences sèches et humides peuvent conduire à un faible rendement agricole en raison du

manque d'eau et de l'inondation des terres agricoles, respectivement (Efon et al., 2016). Ces événements sont généralement caractérisés par une migration vers le Nord des oscillations intrasaisonnières (OIS) et une variabilité trans-équatoriale de la température de surface de la mer (TSM) (Giannini et al., 2003; Biasutti et al., 2009). De ce fait, il est impératif de comprendre les processus et systèmes atmosphériques qui influent sur les séquences sèches et humides à des échelles de temps intrasaisonnières en Afrique de l'Ouest. La connaissance des processus liés aux précipitations permettra l'amélioration de prévision précise des statistiques intrasaisonnières et interannuelles des épisodes secs et humides. Les études précédentes (Grist and Nicholson, 2001; Jenkins et al., 2005; Nicholson, 2008; Sylla et al., 2010; Efon et al., 2016; Okoro et al., 2018; Akinsanola and Zhou, 2020) se sont focalisées sur la variabilité des systèmes atmosphériques pendant les années sèches et humides, et pour caractériser les séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest en termes de nombre d'occurrence (Froidurot and Diedhiou, 2017; Bichet and Diedhiou, 2018a). Peu d'études sur la variabilité intrasaisonnière de la circulation atmosphérique pendant les séquences sèches et humides et la variabilité de ces dernières dans le futur en termes de probabilités existent dans la littérature. Froidurot et Diedhiou (2017) ont montré que la variabilité spatio-temporelle des périodes humides et sèches semble être liée à la variabilité spatio-temporelle de la mousson ouest-africaine. Selon les mêmes auteurs, les longues séquences sèches (plus de quatre jours) présentent une faible occurrence sur la bande sahélienne et une occurrence élevée le long du Golfe de Guinée, principalement de la Côte d'Ivoire au Bénin à l'échelle annuelle.

L'objectif général de l'étude est de diagnostiquer les éléments responsables de l'apparition des séquences pluvieuses et sèches et de déterminer comment ces dernières varient dans le temps et dans l'espace à l'échelle intrasaisonnière et interannuelle dans la région ouest africaine pendant la saison estivale en termes de probabilités d'occurrence.

Les objectifs spécifiques de l'étude sont:

- a) D'étudier les caractéristiques des périodes sèches et humides en termes de probabilités d'occurrence pendant la saison estivale ;
- b) De comprendre la variabilité synoptique associée aux périodes sèches et humides en mettant l'accent sur la circulation du vent pendant la période estivale (juillet à septembre) ;

- c) D'évaluer l'évolution future des périodes sèches et humides en termes de probabilités d'occurrence en analysant les scénarios de changement climatique de l'expérience CORDEX.

Le plan de travail s'établit comme suit :

Le **Chapitre 1** présente les caractéristiques moyennes du climat de l'Afrique de l'Ouest, des changements climatiques et la modélisation de l'évolution du climat.

Le **Chapitre 2** est consacré à la description des données, des méthodes et de la présentation des chaînes de Markov.

Le **Chapitre 3** est consacré aux caractéristiques des séquences sèches et humides en termes de probabilités d'occurrence en Afrique de l'Ouest pendant la saison estivale. Il est présenté sous forme d'un article publié dans la revue scientifique: "**Scientific Reseach and Essays**".

Le **Chapitre 4** analyse les caractéristiques de l'atmosphère en Afrique de l'Ouest pendant les séquences sèches et humides du Sahel Ouest. Ce travail a fait l'objet d'une publication scientifique dans la revue indexée: "**Theoretical and Applied Climatology**".

Le **Chapitre 5** consiste à analyser les changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal.

Chapitre 1

Généralités sur la mousson de l’Afrique de l’Ouest (MAO)

Sommaire

1.1	Eléments majeurs du système de MAO.....	6
1.1.1	Basses couches.....	7
1.1.2	Moyennes et hautes couches.....	9
1.1.3	Zones de convection humides et sèches.....	11
1.2	Variabilité des précipitations.....	13
1.2.1	Cycle saisonnier.....	13
1.2.2	Variabilité interannuelle.....	16

Ce chapitre présente dans sa première partie les éléments clés du système de mousson ouest africaine (MOA). Le système de MOA détermine le climat ouest africain en été boréal et se compose du flux de mousson et du flux d'harmattan dans les basses couches, des jets d'altitude tels que le Jet d'Est Africain (JEA) et le Jet d'Est Tropical (JET), les Ondes d'Est Africaines (OEA) et les zones de convection humides et sèches telles que la Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT) et la Dépression Thermique Saharienne (DTS).

Ensuite, nous décrivons la variabilité des précipitations ouest africaines, à savoir le cycle saisonnier et la variabilité interannuelle pendant la saison estivale.

1.1 Eléments majeurs du système de MAO

La MAO est un système couplé atmosphère-océan-continent, qui a un impact sur les précipitations, entraînant un été humide et un hiver sec sur le continent. La mousson d'Afrique de l'Ouest est caractérisée par plusieurs flux approximativement zonaux clés qui sont établis en association avec des contrastes de chauffage méridionaux et des circulations directes associées (Parker et al., 2005). La MAO s'organise autour d'éléments clés (Figure 1.1) comme le JET dans les hautes couches, le JEA dans les moyennes couches et dans les basses couches on observe le flux de mousson (de sud-ouest) et le flux d'harmattan (de nord-est) de sens opposés. Les principales structures convectives qui interviennent sont : la ZCIT et la DTS associée à un maximum de température de surface.

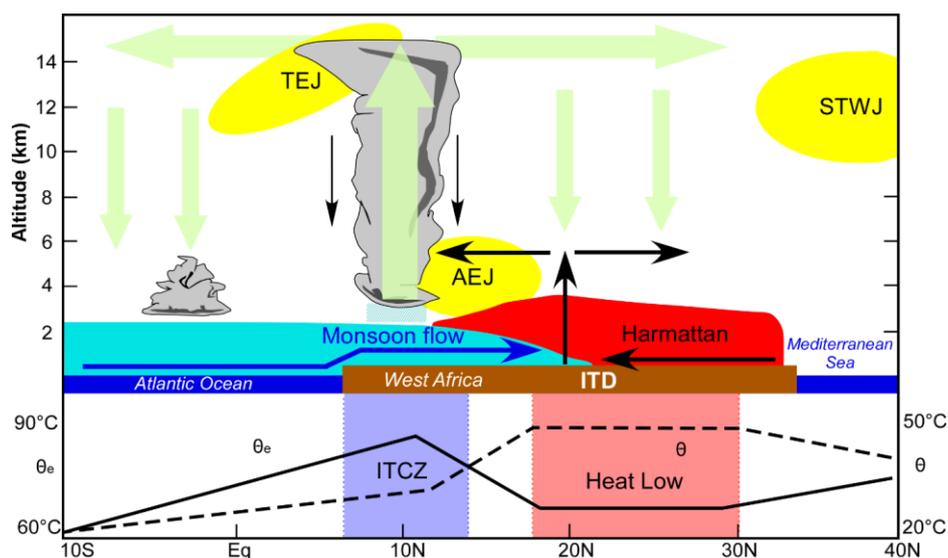


Figure 1.1: Schéma des principales caractéristiques du système de la MOA pendant l'été boréal : circulations méridionales et moyennes zonales (adapté de Peyrillé, 2006).

1.1.1 Basses couches

Dans les basses couches, la circulation de mousson est organisée autour de trois éléments clés qui sont le flux de mousson, le flux d'harmattan et le front inter tropical (Figure 1.1). Les deux flux (mousson et harmattan) varient en fonction des conditions de surface (température de surface de la mer, température au sol, surface végétée...).

● Flux de mousson

Le flux de mousson est un flux de sud-ouest, dirigé de l'océan Atlantique vers le continent (Figure 1.1) qui apporte l'humidité des basses couches nécessaires à la formation de la convection nuageuse. Le flux de mousson s'établit grâce au gradient thermique méridien existant entre l'océan et le continent surchauffé durant les mois de mars, avril et mai (Eltahir and Gong, 1996). Ce gradient thermique renforce les alizés de l'hémisphère sud qui peuvent traverser l'équateur et ainsi être déviés vers l'est grâce à la force de Coriolis (inversion des alizés). Entre mars et mai, la vitesse moyenne du flux de mousson reste faible (3 à 5 m.s⁻¹). Vers fin juin ou début juillet, le flux accélère et peut atteindre une vitesse moyenne de 10 m.s⁻¹ car le gradient thermique océan-continent se renforce avec la mise en place d'une langue d'eau froide (LEF) équatoriale dans le golfe de Guinée sur la période mai-juin (Figure 1.2) qui fait chuter la température de surface de la mer de 26 à 24°C. Cette LEF crée un fort gradient thermique nord-sud renforçant les vents du sud, qui contribue au déplacement rapide des pluies de la côte vers le Sahel appelé "saut de mousson" (Sultan and Janicot, 2000). Ce saut de mousson marque le démarrage de la saison des pluies dans les régions sahéliennes. Le flux de mousson apporte l'humidité nécessaire à la formation de zones de convection profonde. L'intensité du flux de mousson et son contenu énergétique sont alors déterminants par le positionnement des zones de convection.

● Flux d'harmattan

L'harmattan est un vent de secteur nord-est, chaud et sec, en provenance du Sahara (Figure 1.1). Il est présent toute l'année sur l'Afrique du nord, à l'est du méridien de Greenwich. Il est particulièrement intense en hiver entre 5 et 8 m.s⁻¹ en moyenne mensuelle, période à laquelle il est associé à une circulation anticyclonique située sur la Lybie. En été, l'harmattan est associé à une dorsale anticyclonique localisée sur le bassin méditerranéen, et présente alors une intensité beaucoup plus faible entre 3 à 5 m.s⁻¹ en moyenne mensuelle. La rencontre entre le flux de mousson (air humide) et le flux d'harmattan (air sec) forme près de la surface une zone de

convergence appelée Front Inter Tropical (FIT, Hastenrath, 2012) (Figure 1.1) qui est une région de basse pression. Le FIT se positionne autour de 20°N en Juillet.

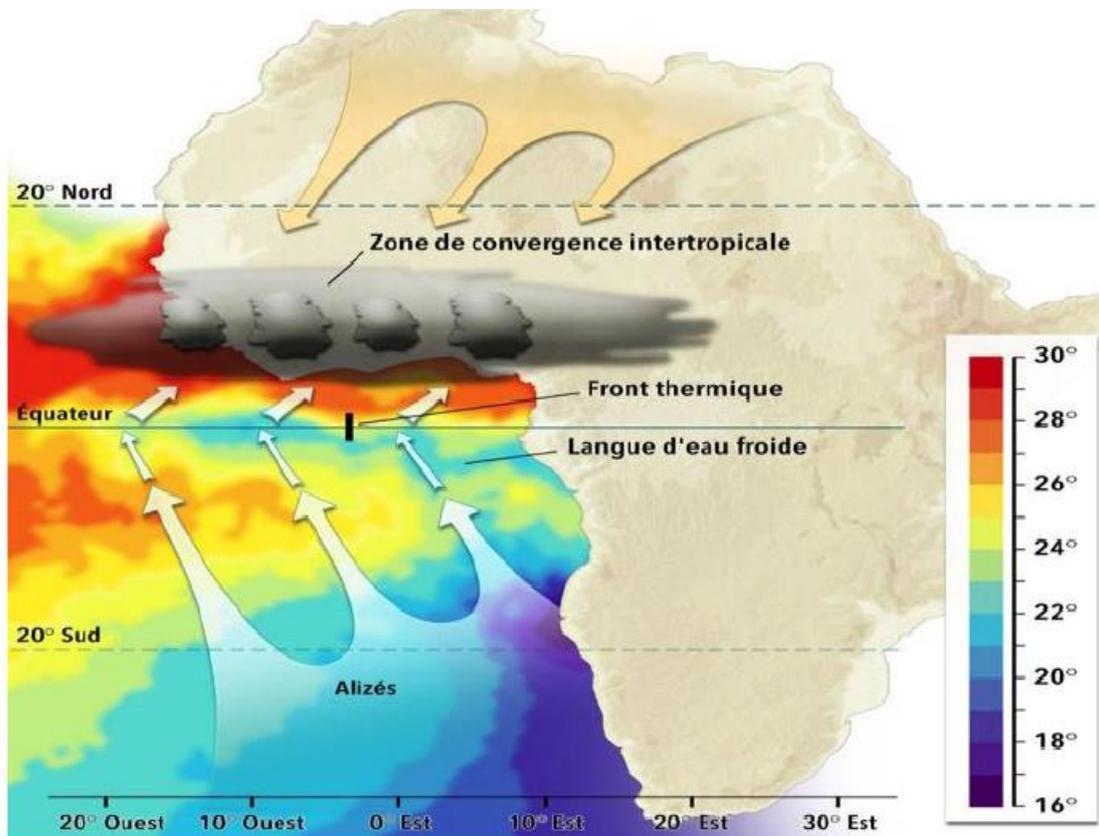


Figure 1.2: Conditions atmosphériques (vents et précipitations) et océaniques (SST, en couleur) dans le Golfe de Guinée en été boréal, avec la présence de la langue d'eau froide et de la ZCIT. Source: www.amma-international.org (28 janvier 2022).

• Front Inter Tropical (FIT)

Le FIT est une région zonale de basses pressions sur toute l'Afrique de l'Ouest (Figure 1.1). Sa position est marquée par un déplacement latitudinal annuel très large. En février elle est située un peu plus au nord de la côte guinéenne alors qu'entre Juillet et Août, elle atteint sa position la plus au nord, autour de 20°N. A cette variation annuelle, s'ajoute un cycle diurne très marqué avec une variation latitudinale journalière de l'ordre de 200 km (Sultan et al., 2007).

Le FIT est identifié généralement selon deux critères: un critère dynamique basé sur l'inspection des champs de vent, dans ce cas le FIT est la région de convergence maximale et de très faibles vents (2 m.s^{-1}), et un critère thermodynamique basé sur la mesure de la température de rosée. Leroux (1970) et Buckle (1996) ont montré dans ce dernier cas que le FIT est la région où la température de rosée atteint 15°C. Selon BouKaram et al. (2008), le FIT,

de par sa nature, est une région qui présente un fort cisaillement horizontal et vertical entre le flux de mousson et le flux d'harmattan. Durant la saison de mousson, cette interface est souvent perturbée par la propagation vers le nord de courants de densité émanant des systèmes convectifs qui se forment au sud du FIT (Flamant et al., 2009).

1.1.2 Moyennes et hautes couches

Dans la moyenne et haute troposphère, la MAO est également caractérisée par deux jets prédominants: le Jet d'Est Africain (JEA) et le Jet d'Est Tropical (TEJ) (Figure 1.1).

- **Jet d'Est Africain (JEA)**

Le JEA est un jet d'échelle régionale observé entre les longitudes 15°W et 15°E, et entre 500 et 700 hPa au niveau où le gradient méridien d'humidité change de sens. La vitesse maximale de ce jet se situe aux alentours de 15°N. Le JEA est un élément important pour le climat de l'Afrique de l'Ouest avec une intensité maximale variable de 10 m.s⁻¹ (Diallo et al., 2010) et suit le mouvement méridien de la ZCIT.

Selon Cadet et Nnoli (1987), le JEA a pour impact le transport d'humidité au-dessus des régions du Sahel. Plusieurs auteurs ont mené des études pour comprendre l'origine et le maintien du JEA. Par exemple, Burpee (1972), à partir d'une analyse statistique de radiosondages sur l'Afrique de l'Ouest et de l'Est, suggère l'existence d'une circulation méridienne agéostrophique thermique directe découlant du fort contraste thermique lié au réchauffement au nord de l'Afrique de l'Ouest (dans le Sahara). Cook (1999) en faisant des simulations avec les modèles de circulation générale (MCG) montre que le jet doit son existence à la présence d'un gradient méridien d'humidité du sol et un gradient méridien de température de surface. Les résultats de ces simulations montrent qu'un fort albédo et une aridité du sol du Sahara sont les conditions indispensables et suffisantes à l'existence du JEA. Thorncroft et Blackburn (1999) ont montré l'importance des différents types de convection observés de part et d'autre du JEA dans le maintien et l'altitude du jet après avoir analysé les processus physiques à l'origine de ce jet avec un modèle à symétrie zonale. Le jet est entretenu par la présence de la convection profonde au sud, dans la ZCIT, et de la convection sèche au nord, sur le Sahara. Le JEA est primordial dans la circulation de mousson, car il est le siège d'instabilités barotropes (instabilités du cisaillement horizontal de l'écoulement) et baroclines (instabilités du champ de pression associée à un fort gradient horizontal de température). Ces instabilités peuvent donner naissance aux Ondes d'Est Africaines (OEA).

• Ondes d'Est Africaines (OEA)

Les OEA sont des perturbations d'échelle synoptique que l'on observe entre la surface et la moyenne troposphère (environ 500hPa) depuis l'Afrique de l'Est (Soudan, Centre Afrique, Tchad) jusqu'au large des côtes guinéennes et sénégalaises en passant par l'Afrique de l'Ouest (Niger, Nigéria, Burkina-Faso, Mali).

Les OEA sont une composante importante de la mousson ouest africaine car elles sont associées à la variabilité des systèmes convectifs (Fink et Reiner, 2003). Pendant la mousson d'été qui est l'élément crucial pour notre étude, on peut distinguer deux grandes familles d'ondes d'est africaines, l'une de période 3-5 jours et l'autre de période 6-9 jours qui modulent à la fois la convection et les précipitations et qui déplacent de part et d'autre du Jet d'Est Africain (JEA).

Les OEA de période 3-5 jours font parties de la catégorie d'ondes d'est les plus fréquemment étudiée par la communauté scientifique (Diédhiou et al., 2001). Entre juin et octobre, une onde d'est prend naissance tous les 3 à 5 jours sur la corne de l'Afrique (30°E), s'intensifie à l'ouest de cette longitude au niveau du Tchad/Centre Afrique et devient maximale vers 15°W avant de s'affaiblir sur l'Atlantique central. Ces ondes d'est se déplacent de l'est vers l'ouest, autrement dit dans le même sens que le JEA. Les ondes d'est de périodes 3-5 jours présentent des caractéristiques différentes en fonction de leur trajectoire. Les ondes qui circulent au sud du JEA vers 5°-10°N présentent une longueur d'onde proche de 4500-5000 km, une vitesse de phase de 12 m/s et un maximum d'amplitude vers 600/700 hPa et celles qui circulent au nord du JEA vers 15°N ont une longueur d'onde proche de 3000 km, une vitesse de phase de 6 à 8 m/s et un maximum d'amplitude vers 850 hPa (Diedhiou et al., 2001).

Les OEA de période 6-9 jours sont moins fréquentes que les ondes d'est de période 3-5 jours. Elles s'observent uniquement au nord du JEA dans une bande de latitude assez large comprise entre 17°N et 20°N (Diedhiou et al., 2001). La trace au sol du thalweg de l'onde d'est peut même se positionner au niveau de la dépression thermique saharienne vers 25°N. Ces ondes ont une longueur d'onde proche de 5000-5500 km et leur vitesse de phase avoisine les 7 m/s. Le maximum d'amplitude de la perturbation se situe un peu plus bas, en moyenne climatologique vers 850 hPa. Les ascendances d'échelle synoptique se situent, comme pour les ondes d'est de période 3-5 jours, sur la face ouest du thalweg car le cisaillement vertical de vent est dirigé dans le même sens c'est-à-dire vers l'ouest. Enfin, ces ondes ne sont pas toujours associées à la convection car, à ces latitudes, le flux de mousson n'est plus assez épais, ni suffisamment humide. En plus de ces ondes d'est. Il existe un autre jet d'altitude supérieure appelé Jet d'Est Tropical.

• Jet d'Est Tropical (JET)

Le JET est un jet qui s'installe en été boréal dans la haute troposphère (Figure 1.1) entre les plateaux tibétains et les côtes ouest africaines. Ce jet est lié à l'établissement de la mousson indienne notamment aux contrastes thermiques existant en été entre les hauts plateaux du Tibet et les régions océaniques moins chaudes dans le sud-est asiatique. Le JET est observé en Afrique de l'Ouest vers 7°N et est centré sur 200 hPa avec une intensité maximale de l'ordre de 12 m.s⁻¹ (Diallo et al., 2010). Les interactions entre le JET et la convection sont encore mal connues. Cependant Chen (1980) montre que le JET peut être alimenté par la chaleur latente libérée au sein des systèmes convectifs associés aux moussons indienne et ouest africaine. Hulme and Tosdevin (1988) ont montré que les variations de flux du JET influent sur le régime des précipitations au Soudan. Kanamitsu and Krishnamurti (1978) remarquent une tendance du JET à s'affaiblir en intensité (vitesse moyenne et extension spatiale) pendant les années sèches. Selon Janicot (1990), le JET représente en fait la branche haute de la cellule de Walker sur l'Afrique, circulation de faible intensité comparée à la circulation zonale sur le Pacifique. Cependant, la présence de ce jet favorise les cisaillements verticaux au-dessus de l'Afrique, et donc la génération de systèmes convectifs tels que les lignes de grains.

1.1.3 Zones de convection humides et sèches

Il existe deux structures convectives essentielles dans le fonctionnement de la mousson ouest africaine: la ZCIT et la DTS. Ceci résulte d'un fort contraste méridien de part et d'autre du Front intertropical (FIT) qui est la trace au sol de la ZCIT durant la période de mousson avec une zone de convection humide au sud et une zone de convection sèche au nord (Figure 1.1).

• Zone de convergence intertropicale (ZCIT)

Dans la troposphère moyenne, se dresse la ZCIT (Figure 1.1). Contrairement à la situation sur l'océan, la zone de convection profonde ne se positionne pas à la verticale du FIT, ceci en raison de la forte inhibition convective associée à la sécheresse de l'atmosphère sahélienne. La ZCIT se positionne donc au sud du FIT vers 10°N en juillet au-dessus du continent là où l'énergie disponible à la convection est maximale. La ZCIT en hiver est située au-dessus de l'océan près de l'équateur. L'arrivée de la ZCIT au-dessus du continent à partir du mois de mai annonce l'arrivée des pluies sur le Sahel (Sultan and Janicot, 2000; Le Barbé et al., 2002). Cependant, la vision continue des pluies dans la ZCIT est trompeuse car elles sont en majorité apportées par des systèmes convectifs de méso-échelle (SCM). La convection dans la ZCIT a en effet tendance à s'organiser en SCM. Les SCM ou lignes de grains fournissent la majorité des pluies

sur l'Afrique de l'Ouest (Mathon and Laurent, 2002; Le Barbé et al., 2002). Ces systèmes se déplacent d'est en ouest et modulent les précipitations sur des périodes de 5 à 6 jours. Une fois arrivés sur l'Atlantique, ils se transforment parfois en cyclones. La variabilité intrasaisonnière est parfois constituée d'une succession de phases actives et inactives de 10 à 20 jours de juillet à septembre.

- **Dépression thermique sahélienne (DTS)**

Au nord du FIT, une zone de convection sèche intense se développe en réponse au fort chauffage radiatif au niveau du sol. Cette circulation thermique correspond à un maximum de température et un minimum de pression au sol et forme une dépression thermique typique des régions désertiques (Figure 1.1). Elle est cyclonique au sol de par l'effet de la force de Coriolis sur les vents de mousson et d'harmattan. En été, la dépression thermique se positionne au-dessus du désert dans le sud de l'Algérie et au nord du Mali. A ce cycle annuel, s'ajoute un cycle diurne associé plutôt aux effets orographiques et se présente sous forme d'oscillations est-ouest durant la saison de mousson (Lavaysse et al., 2009). Selon Parker et al. (2005), la DTS, dont l'intensité est principalement fonction de la température de surface, est un élément important de la mousson d'Afrique de l'Ouest. En effet, la dépression thermique semble être responsable de l'avancement vers le nord du flux de mousson. Couvreur et al. (2008) ont montré que la dynamique de la dépression thermique est à l'origine des pulsations d'une période de 4-5 jours que connaît le flux de mousson avant l'Onset (i.e, saut de mousson). En effet, une forte température de surface sur le Sahara favorise une couche de mélange profonde, un renforcement de la dépression de surface et donc une plus forte aspiration de la mousson vers le nord. L'air froid et humide advecté par le flux de mousson va, en retour, causer une ventilation et un affaiblissement de la dépression thermique (Peyrille et al., 2007). Ceci attribue à l'intensité de la dépression thermique, durant la saison des pluies, un cycle intra-saisonnier d'une période inférieure à 10 jours auquel s'ajoute un second cycle intra-saisonnier d'une période de 10 à 60 jours plutôt lié à la circulation des moyennes latitudes.

1.2 Variabilité des précipitations

1.2.1 Cycle saisonnier des précipitations

Les précipitations ouest africaines sont pilotées par le déplacement méridien de la ZCIT et liées à son cycle saisonnier. La figure 1.3 montre l'évolution régionale des précipitations saisonnières sur différentes zones d’Afrique de l’Ouest. On observe deux grands régimes pluviométriques : un régime guinéen caractérisé par un cycle bimodal dominé par deux pics de précipitations en juin et en septembre et une petite saison sèche de juillet à août (Figure 1.3d), et un régime soudano-sahélien (Sahel Ouest, Sahel Central, Zone Soudanienne) unimodal, dit de mousson, entre juillet et septembre (Figure 1.3a-c), dû essentiellement aux systèmes convectifs associés à la migration rapide de la ZCIT vers le nord (Sultan et Janicot, 2000; Le Barbé et al., 2002).

La variabilité des précipitations associées à la mousson à travers le déplacement de la ZCIT est visible sur la figure 1.4 sur le cycle annuel moyen des précipitations calculé sur la période 1981-2020 pour les quatre saisons: l’hiver boréal (JFM), printemps boréal (AMJ), l’été boréal (JAS) et automne boréal (OND).

- L’hiver boréal (janvier-mars, Figure 1.4a) est la grande saison sèche ouest africaine où les cumuls de précipitations sont très faibles sur les régions guinéennes (250 mm) et presque nuls sur les régions soudano-sahéliennes (inférieurs à 50 mm). Cette répartition des précipitations est due à l’établissement de la ZCIT sur l’océan du fait qu’elle occupe sa position la plus méridionale (vers 2°N) pendant cette période de l’année.

- Le printemps boréal (avril-juin, Figure 1.4b) est caractérisé par une augmentation des précipitations au sud de 11°N (entre 400 et 1000 mm) ; ce qui marque la première saison des pluies en zone guinéenne. Entre les latitudes 11°N et 15°N (sud du Sahel), un faible cumul (50 à 200 mm) est observé: ce sont les premières pluies dans certaines régions du Sahel (par exemple, le sud du Sénégal, le sud du Mali). Au nord de 15°N (nord du Sahel), la saison sèche se prolonge. Cette différence entre les côtes guinéennes et la zone soudano-sahélienne est due principalement aux sauts méridiens successifs de la ZCIT vers le nord.

- En été boréal (juillet-septembre, Figure 1.4c), la ZCIT occupe sa position la plus septentrionale après un saut rapide de 5°N à 10°N lors de la mise en place de la mousson sur la zone soudano-sahélienne. Ce saut est accompagné d’une augmentation des précipitations (entre 500 et 1000 mm) sur le Sahel. C’est le cœur de la saison des pluies au Sahel. Par contre, la zone

guinéenne connaît sa petite saison sèche (diminution des précipitations). Les maxima de précipitations sont localisés au niveau des régions orographiques (Fouta Djallon, Plateau de Jos et Mont Cameroun) et sont présentés sur la figure 1.5 avec des cumuls de précipitations supérieurs à 1200 mm.

- L'automne boréal (octobre-novembre, Figure 1.4d) correspond à la seconde saison des pluies dans les régions guinéennes. Par contre, une diminution des pluies est observée sur les régions sahéliennes due au retrait progressif vers le sud (5°N) de la ZCIT.

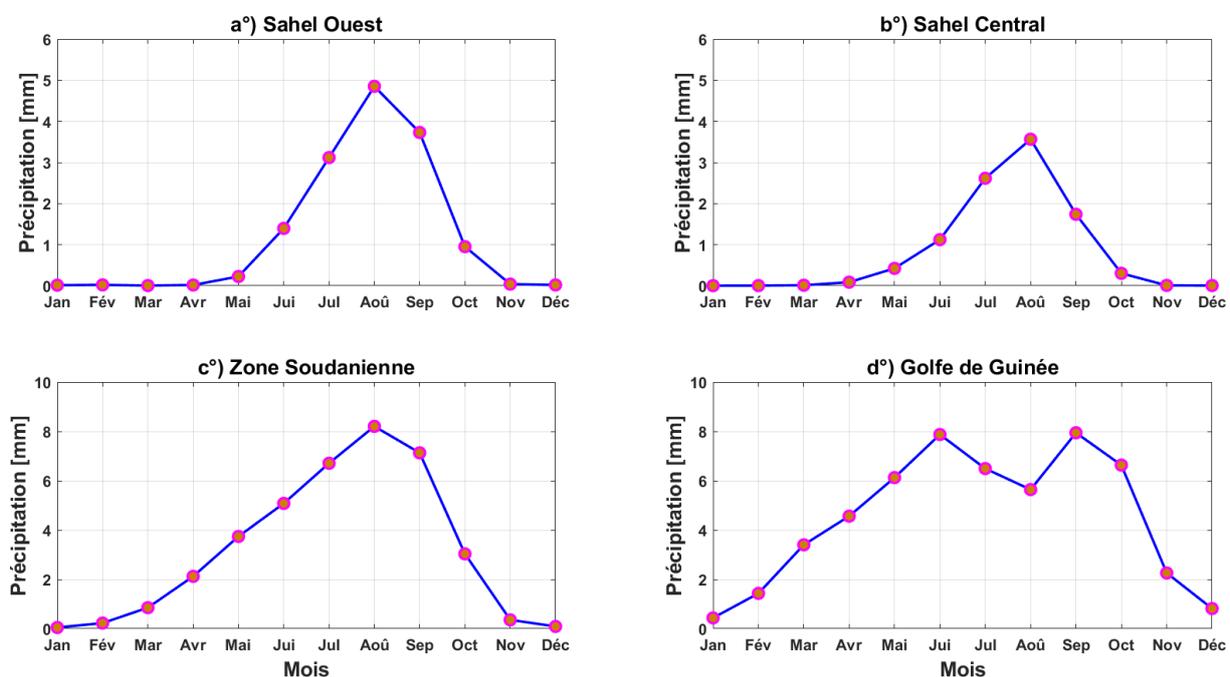


Figure 1.3: Cycle saisonnier moyen des précipitations (mm/jr) sur la période 1981-2020 (données CHIRPS) pour les zones: **a°**) Sahel Ouest, **b°**) Sahel Central, **c°**) Zone Soudanienne et **d°**) Golfe de Guinée.

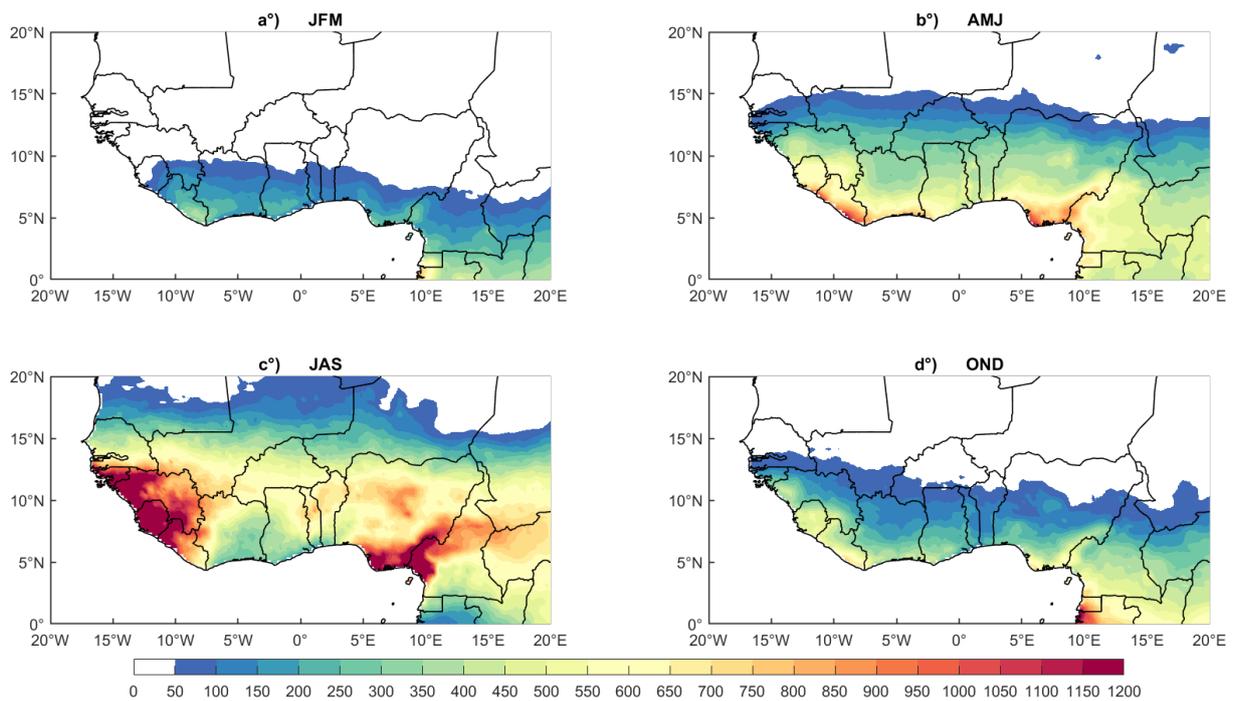


Figure 1.4: Cycle saisonnier moyen des précipitations (mm/jr) sur la période 1981-2020 (données CHIRPS), a°) janvier à mars, b°) avril à juin, c°) juillet à septembre et d°) octobre à décembre.

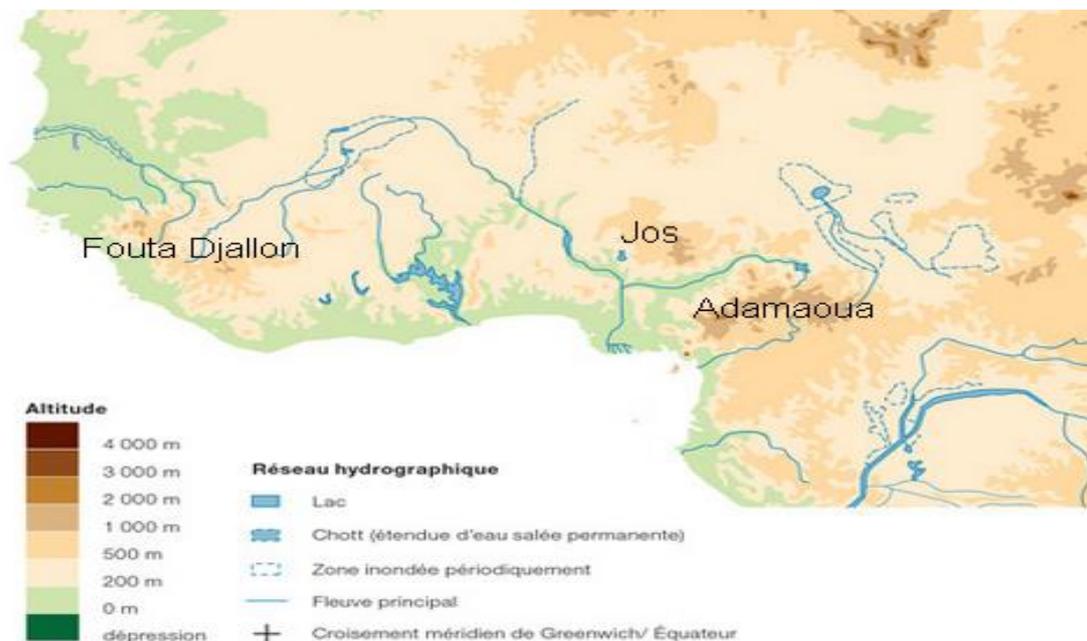


Figure 1.5: Topographie et réseau hydrographique en Afrique de l'Ouest. Source: <https://www.oecd.org/fr/csao/cartes>. (28 janvier 2022).

1.2.2 Variabilité interannuelle des précipitations

Les précipitations estivales en Afrique de l'Ouest sont soumises à une certaine variabilité interannuelle. La figure 1.6 montre les anomalies standardisées des précipitations estivales de quatre (04) régions d'Afrique de l'Ouest pour la période 1981-2020 : le Sahel Ouest, le Sahel Central, la Zone Soudanienne et le Golfe de Guinée. On observe une transition entre un état déficitaire de précipitations avant 1996 marqué par une tendance à la baisse et un état excédentaire après 1997 marqué par une tendance à la hausse sur le Sahel Ouest (Figure 1.6a) et sur le Sahel Central (Figure 1.6b). Le déficit (excédent) pluviométrique est plus fort pendant les années 1983 (2010) et 1984 (1999) dans le Sahel Ouest et le Sahel Central, respectivement. La Zone Soudanienne (Figure 1.6c) est marquée par une alternance des périodes déficitaires (i.e, 1981-1993 et 2013-2017) et excédentaires (i.e, 1994-1999 et 2008-2012) avec un maximum en 1999. Quant à la zone guinéenne (Figure 1.6d), on observe une alternance des années sèches et humides de 1981 à 2005. De plus, une période excédentaire est observée entre 2006 et 2012 accompagnée d'une période déficitaire de 2013 à 2020. Sur toute la période, l'année 1983 (1999) est la plus sèche (humide).

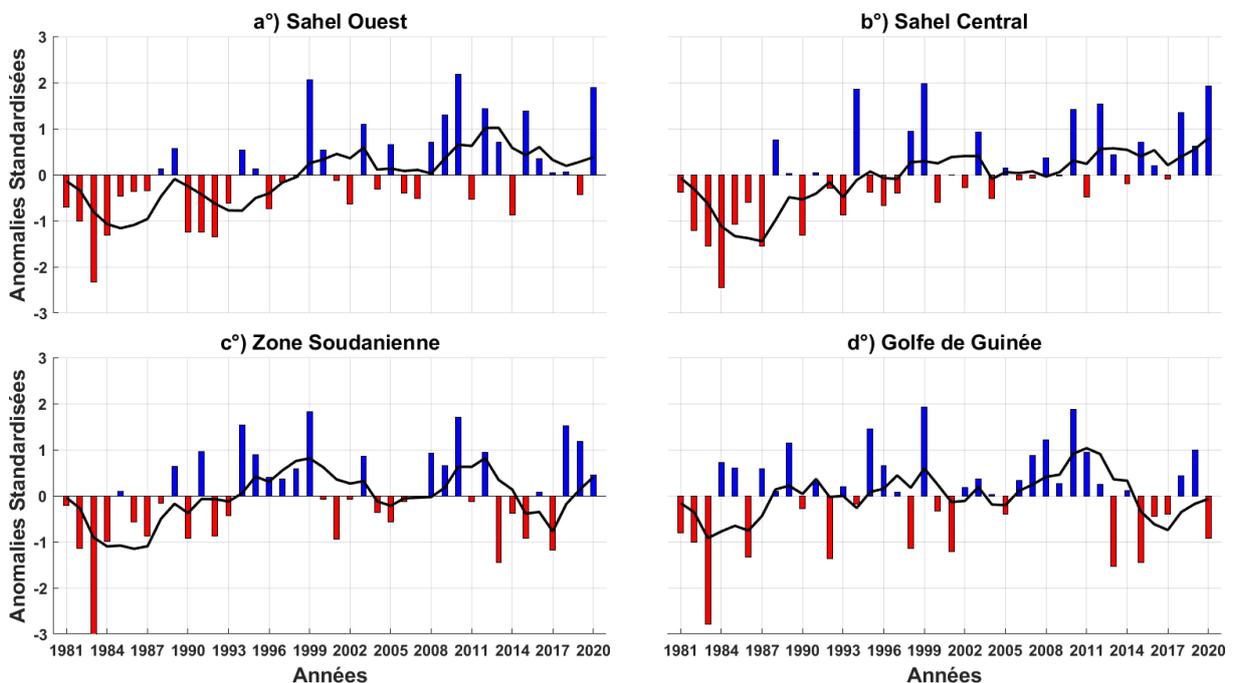


Figure 1.6: Anomalies standardisées de précipitations annuelles: **a°**) Sahel Ouest, **b°**) Sahel Central, **c°**) Zone Soudanienne et **d°**) Golfe de Guinée pour la période 1981-2020 (Données CHIRPS). Une moyenne glissante sur cinq (05) ans (courbe noire) est superposée pour montrer la transition d'une période sèche à une période humide.

Chapitre 1 : Généralités sur la mousson d'Afrique de l'Ouest

Cette variabilité spatio-temporelle des anomalies de précipitations est associée aux forçages océaniques. Lamb (1978) et Hastenrath (1984) ont mis en évidence l'influence de l'atlantique tropical sur les précipitations en Afrique de l'Ouest. Selon ces auteurs, le déficit pluviométrique au Sahel est associé aux anomalies positives de la température de surface de l'océan (TSM) du pacifique équatoriale qui favorise une ZCIT plus méridionale que la normale. Ces résultats ont été ensuite confirmés à de grandes échelles par Lamb and Pepler (1991) et Janicot (1992). Il existe également un lien statistiquement significatif entre la TSM du Pacifique et la pluviométrie en Afrique de l'Ouest (Rowell et al., 1995; Ward, 1998). La figure 1.7 montre la variation des anomalies des précipitations en fonction des anomalies de TSM du Pacifique Niño 3.4 (5°N-5°S et 170°W-120°W).

Il apparaît que l'année El Niño 1983 (i.e, anomalie positive de TSM supérieure à 0.5) est caractérisée par une diminution des précipitations sur toutes les régions d'Afrique de l'Ouest tandis que l'année La Niña 1999 (i.e, anomalie négative de TSM inférieure à -0.5) est caractérisée par une augmentation de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest.

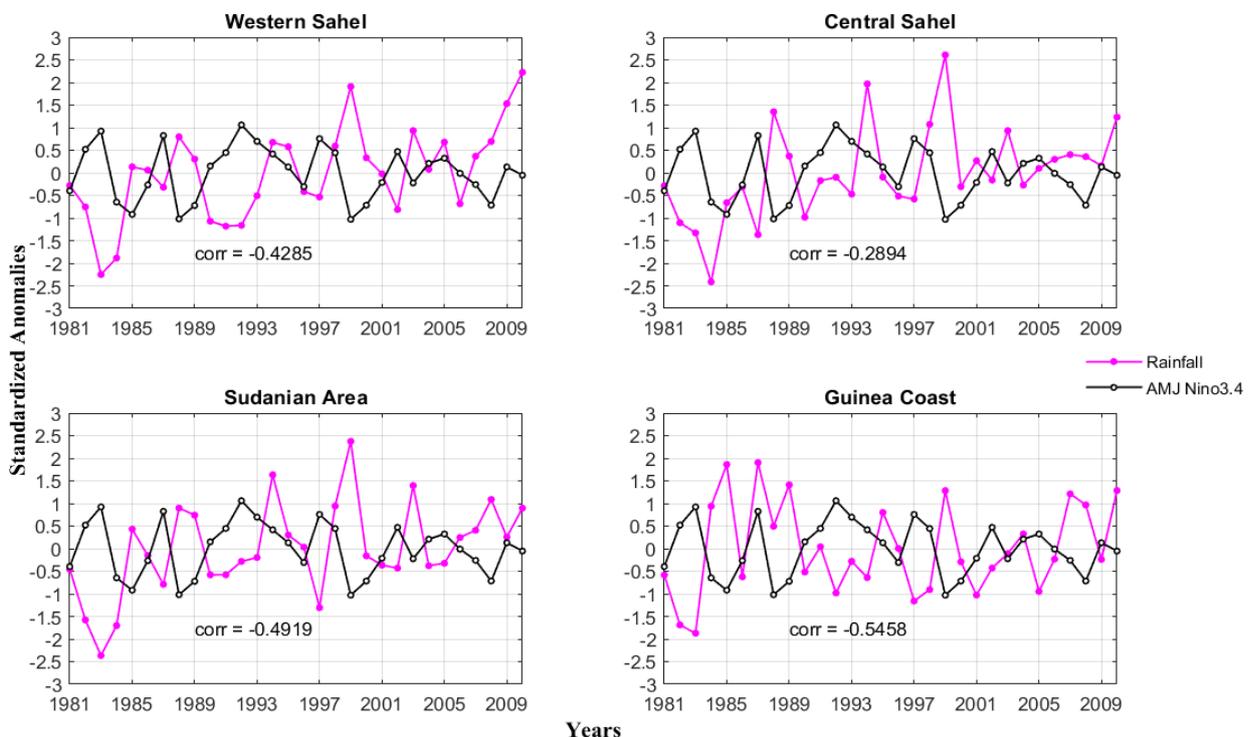


Figure 1.7: Variabilité interannuelle des anomalies pluviométriques (données CHIRPS) et des anomalies de TSM de la saison AMJ dans la région Niño 3.4 (ersstv5) sur la période 1981-2010. La valeur de la corrélation (corr.) entre les précipitations et Niño 3.4 est indiquée pour chaque zone.

Chapitre 2

Description des données et méthodes utilisées

Sommaire

2.1	Données.....	20
2.1.1	Observations.....	20
2.1.2	Expérience CORDEX.....	20
2.1.3	Réanalyses.....	24
2.2	Méthodes et Domaine d'étude.....	24
2.2.1	Détections des séquences sèches et humides.....	24
2.2.2	Chaine de Markov.....	27
2.2.3	Tests statistiques.....	30
2.2.4	Domaine d'étude.....	31

Ce chapitre fournit la description des données qui ont été utilisées dans cette thèse pour atteindre les objectifs. Il s'agit des données d'observations satellitaires, des réanalyses Era-Interim et les sorties des modèles climatiques régionaux du projet CORDEX. Ce chapitre fournit également la méthodologie qui a été adoptée pour exploiter ces données.

2.1 Données

2.1.1 Données d'observation

Nous avons utilisé les données pluviométriques quotidiennes du "Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations" (CHIRPS) sur la période 1981 à 2020, à une résolution spatiale de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (Funk et al., 2014). Plusieurs sources de données ont été assimilées pour la création des données CHIRPS. Il s'agit des données du "Tropical Rainfall Measuring Mission" version 3B42 (TRMMv3B42), du National Aeronautics and Space Administration (NASA) (Huffman et al., 2007; Huffman et al., 2011), du "Climate Forecast System", version 2 (CFSv2) (Saha et al., 2010), du "Climate Hazards Center's Precipitation Climatology" (CHPClim) provenant de deux sources à savoir du "Climate Prediction Center" (CPC) /National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) infrarouge et le "National Climatic Data Center" (NCDC) infrarouge (Janowiak et al., 2001; Knapp et al., 2011) et les observations de précipitations in situ obtenues à partir des services météorologiques nationaux et régionaux. Les données pluviométriques CHIRPS ont été validées avec succès à l'aide de diverses données d'observation pluviométrique (Badr et al., 2016; Herold et al., 2017; Bichet and Diedhiou, 2018). Les résultats de ces études ont montré une bonne performance de ces dernières dans la surveillance de la sécheresse.

2.1.2 Expérience CRODEX

L'expérience CRODEX (COordinated Regional Climate Downscaling EXperiment) a deux objectifs principaux : fournir un cadre pour évaluer et vérifier les performances des modèles et concevoir une série d'expériences pour fournir des projections climatiques pouvant être utilisées pour des études d'impact et d'adaptation. Un schéma de l'expérience est présenté sur la figure 2.1 et décrit dans les sections suivantes.

- **Domaines et résolution des modèles**

Afin d'établir le cadre d'évaluation des modèles et le cadre de production des projections climatiques, il est nécessaire de choisir des domaines communs.

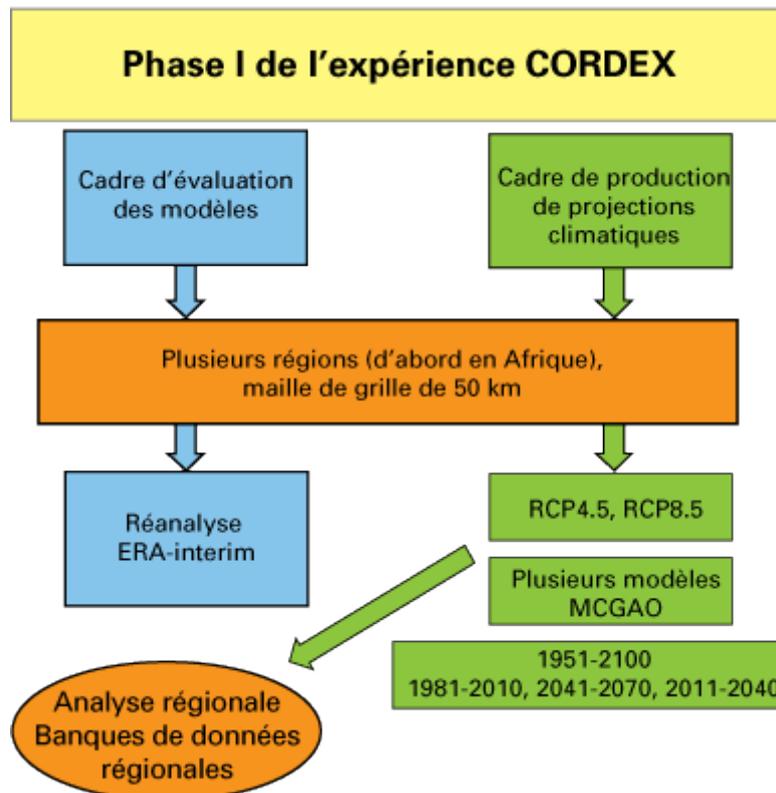


Figure 2.1 : Schéma de la première phase de l'expérience CORDEX (Giorgi et al., 2009).

L'objectif du projet CORDEX est de réaliser un système à la portée d'un grand nombre de scientifiques et de permettre une utilisation optimale des résultats. La figure 2.2 illustre les premiers domaines sélectionnés par l'expérience CORDEX dont l'Afrique (cadre rouge). L'Afrique est la première région retenue par l'expérience CORDEX pour tester le système afin d'évaluer ses forces et ses faiblesses. Ce choix est dû au fait que ce continent est vulnérable aux changements climatiques car plusieurs secteurs tels que l'agriculture, la gestion de l'eau et la santé dépendent de la variabilité climatique. Il est aussi important de noter que l'économie dans la plupart des régions de l'Afrique dépend en grande partie de l'agriculture.

Dans le cadre de notre thèse, les sorties des modèles CORDEX de la première phase ont été analysées. Ces sorties de modèles ont une résolution horizontale de 0.44° (soit environ 50 km) au niveau régional comme l'Afrique.

- **Cadre de production des projections climatiques**

Le projet CORDEX est basé sur une série de nouvelles simulations de modèles mondiaux à l'appui du cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) connu sous le nom de CMIP5. Ces simulations comprennent un

Chapitre 2 : Description des données et méthodes

grand nombre d'expériences : de nouvelles simulations de scénarios de gaz à effet de serre pour le 21^è siècle, des expériences de prévision décennale et de cycle du carbone, ainsi que des expériences destinées à l'étude des mécanismes de rétroaction (Taylor et al., 2012).

Dans un premier temps, l'expérience CORDEX s'est focalisée sur les simulations de scénarios. Contrairement aux simulations effectuées dans le cadre du quatrième cycle d'évaluation du GIEC qui étaient basées sur les scénarios d'émission de gaz à effet de serre (Watson, 2000), cette nouvelle génération de simulations de scénarios utilise des concentrations de référence (RCP), autrement dit un ensemble de concentrations de gaz à effet de serre prédéfinies pour le 21^{ème} siècle, qui correspond à différents niveaux de stabilisation du forçage radiatif d'ici 2100. Quatre niveaux de RCP ont été définis : les forçages radiatifs 2.6, 4.5, 6.0 et 8.5 $W.m^{-2}$ (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5, respectivement). Les détails sur les caractéristiques des différents scénarios sont représentés dans le tableau 2.1. Dans le cadre des simulations CMIP5, la priorité a été donnée aux RCP4.5 et RCP8.5 qui représentent respectivement les scénarios moyens et extrêmes. Ces deux scénarios de forçage radiatif seront utilisés dans le cadre de notre thèse.

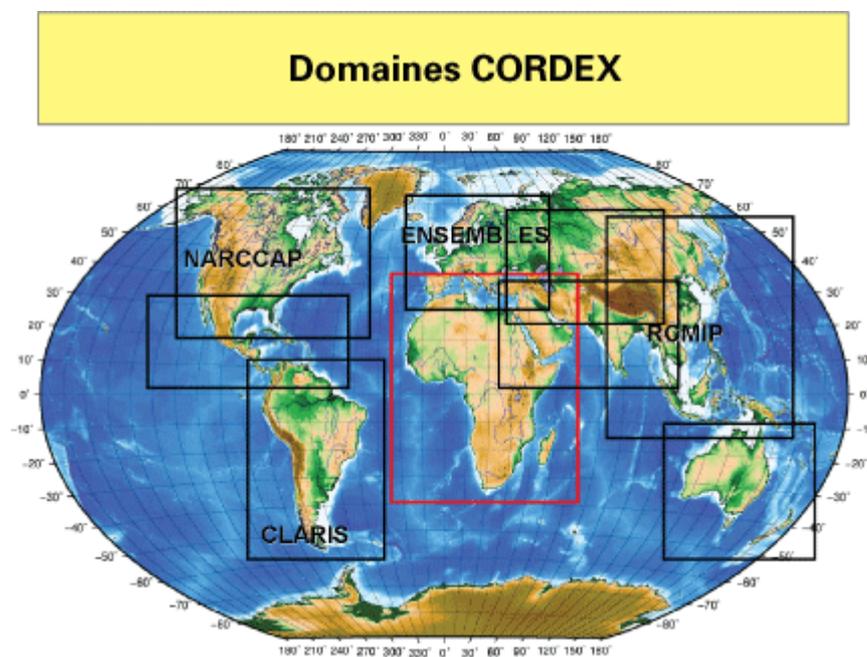


Figure 2.2: Domaines régionaux étudiés dans le cadre de l'expérience CORDEX (Giorgi et al., 2009).

Tableau 2.1 : Les caractéristiques des scénarios (source : Moss et al., 2010)

Scénario	Forçage	Concentration (ppm)	Trajectoire
RCP2.6	Pic à $\sim 3 \text{ W.m}^{-2}$ avant 2100 puis déclin	Pic $\sim 490 \text{ eq-CO}_2$ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin
RCP4.5	$\sim 4.5 \text{ W.m}^{-2}$ au niveau de stabilisation après 2100	$\sim 660 \text{ eq-CO}_2$ au niveau stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP6.0	$\sim 6.0 \text{ W.m}^{-2}$ au niveau de stabilisation après 2100	$\sim 850 \text{ eq-CO}_2$ au niveau stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP8.5	$> 8.5 \text{ W.m}^{-2}$ en 2100	$> 1370 \text{ eq-CO}_2$ en 2100	Croissante

- **Modèles climatiques régionaux utilisés**

Des simulations issues de quatre (04) modèles climatiques régionaux (MCR) du projet CORDEX sont utilisées dans cette étude. Le tableau 2.2 résume les informations sur ces MCR avec les modèles climatiques globaux (MCG) forceurs, les instituts d'appartenance, la période de référence (1976-2005) et les périodes de projection futures (c'est-à-dire le futur proche: 2021-2050 et le futur lointain: 2071-2100). Ces MCR sont forcés dans le futur sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

Chapitre 2 : Description des données et méthodes

Tableau 2.2 : Informations sur les Modèles Climatiques Régionaux (MCR) utilisés ainsi que leurs instituts d'appartenance, les Modèles Climatiques Globaux (MCG) forceurs et les périodes de simulations.

MCG	Institut	MCR	Période Référence	Période Projection (Future proche et lointain)
ICHEC-EC-EARTH	MPI	REMO	1976-2005	2021-2050 ; 2071-2100
	KNMI	RACMO22T	1976-2005	2021-2050 ; 2071-2100
	DMI	HIRHAM5	1976-2005	2021-2050 ; 2071-2100
CNRM-CERFACS	CLMcom	CCLM4-8-17	1976-2005	2021-2050 ; 2071-2100

2.1.3 Données des réanalyses

Les réanalyses résultent d'une assimilation de données observées provenant du système d'observations météorologiques mondiales (bouées, satellites et radiosondages) dans un modèle climatique global (MCG). Le produit des réanalyses utilisé dans cette étude est les réanalyses Era-Intérim (Simmons et al., 2007; Uppala et al., 2008) qui couvre la période 1988-2010 avec une résolution spatiale de $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$. Ces réanalyses, produites par le "European Centre for Medium-Range Weather Forecasts" (ECMWF) constituent une mise à jour des réanalyses ERA-40. Ces ensembles de données sont plus complets que les réanalyses ERA-40. Par exemple, le nombre de niveaux de pression est passé de 23 à 37 niveaux, de 1000 hPa à 1 hPa et des paramètres de nuages supplémentaires sont inclus. Parmi les 37 niveaux de pression sur la verticale, 27 sont inférieurs à 100 hPa. Les analyses des variables telles que le vent zonal, l'humidité relative et le géopotential sont calculées chaque jour à 00:00, 06:00, 12:00 et 18:00 TU.

2.2 Méthodes

2.2.1 Détection des séquences sèches et humides

L'occurrence d'un jour humide ou sec est un événement mutuellement exclusif (Chapman, 1998; Dobi-Wantuch et al., 2000). Un seuil pour délimiter les jours humides et secs est nécessaire lors de l'analyse des épisodes de précipitations, car la distribution de fréquence de la durée des épisodes humides/secs est fortement asymétrique et dépend du seuil choisi (Barring et al., 2006).

Chapitre 2 : Description des données et méthodes

Les études précédentes ont utilisé différents seuils en fonction de l'aspect des périodes qu'ils doivent considérer. Dobi-Wantuch et al. (2000) ont indiqué que le seuil d'observation standard de 0.1 mm fournit une bonne représentation des conditions de précipitation pour certains enregistrements d'observation. Moon et al. (1994) et Matrin-Vide et Gomez (1999) ont utilisé 0.1 mm car c'est la précision habituelle des pluviomètres. Frei et al. (2003) ont utilisé un seuil plus élevé de 1.0 mm car il est plus résistant aux erreurs de mesure liées aux faibles précipitations. Douguedroit (1987) et Lazaro et al. (2001) ont utilisé un seuil de 1.0 mm et ont soutenu que les précipitations inférieures à cette quantité s'évaporeraient directement. Perzyna (1994) a utilisé un seuil de 2.0 mm afin d'éliminer tous les événements présentant des précipitations inférieures et ayant une très faible importance dans le débit de la rivière en raison des pertes par interception et évaporation. Ceballos et al. (2004) ont utilisé un seuil de 10 mm car les précipitations inférieures à cette quantité n'ont qu'un faible effet sur la teneur en eau du sol à une profondeur supérieure à 5 cm de la surface (Ceballos et al., 2002). Ces précipitations restent à la surface du sol ou sur sa couverture végétale, d'où elles retournent facilement dans l'atmosphère par évapotranspiration.

En Afrique de l'Ouest le seuil de 1.0 mm est le plus utilisé pour détecter les jours humides et secs (Froidurot and Diedhiou, 2017; Bichet and Diedhiou, 2018; Fall et al., 2021; Osei et al., 2021).

Dans notre étude, deux méthodes ont été utilisées pour identifier les séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest sur la base des précipitations journalières. D'abord, les périodes humides et sèches sont détectées en utilisant la méthodologie largement décrite dans Mohan and Rao (2012, 2016). La figure 2.3 montre les précipitations estivales moyennes sur le Sahel occidental sur la période 1988-2010 et le cycle saisonnier des précipitations estivales moyennes sur le Sahel occidental sur une année particulière (c'est à dire, 1996) (Figure 2.4). Sur cette dernière figure qui montre le cycle saisonnier des précipitations sur le Sahel Ouest au cours d'une année particulière (1996), les barres cyan représentent les précipitations quotidiennes (R) pour l'année 1996, la ligne noire pleine fait référence à la variation de la moyenne climatologique des précipitations au cours de la période 1988-2010 sur le Sahel Ouest, tandis que la ligne bleue (rouge) pleine représente $clim + \sigma$ ($clim - \sigma$), où $clim$ est la moyenne climatologique journalière des précipitations au cours de la période 1988-2010 et σ est l'écart-type. Les jours secs et humides sont définis comme suit :

Si $R \geq clim + \sigma$, un jour humide est détecté

Chapitre 2 : Description des données et méthodes

Si $R < clim - \sigma$, un jour sec est détecté

Enfin, pour chaque année, les épisodes humides et secs sont identifiés et les conditions atmosphériques sont moyennées sur toutes les séquences humides (sèches) qui se sont produites de 1988 à 2010 pour construire le composite des épisodes humides (secs).

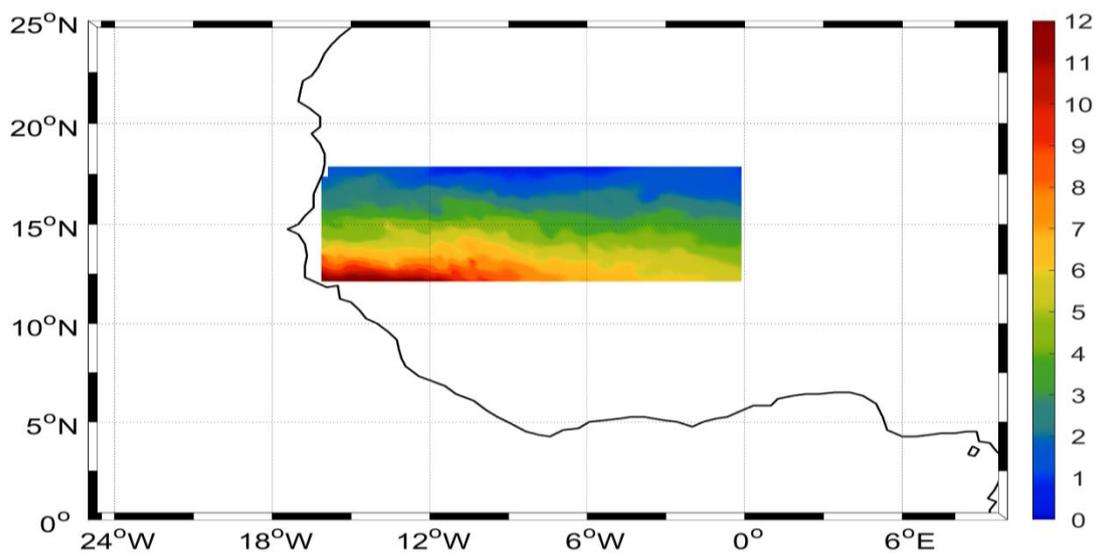


Figure 2.3: Précipitations estivales (Juillet-Septembre) moyennées sur le Sahel occidental sur la période 1988-2010.

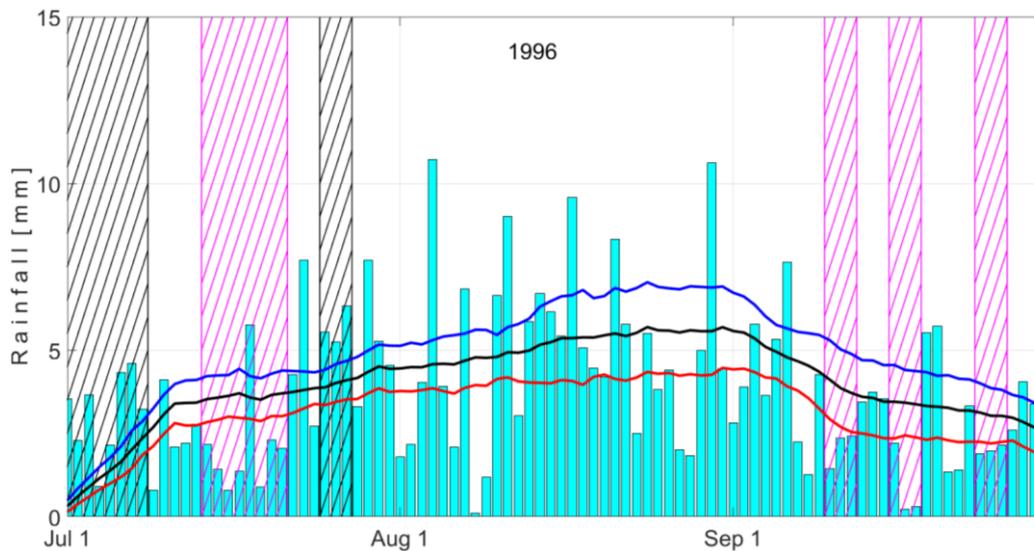


Figure 2.4: Cycle saisonnier des précipitations sur le Sahel Ouest au cours d'une année particulière (1996) : les barres cyan représentent les précipitations moyennes quotidiennes, tandis que les barres hachurées magenta et noires représentent les séquences sèches et humides, respectivement. La ligne continue noire fait référence à la variation de la pluviométrie moyenne climatologique (*clim*) sur la période 1988-2010, tandis que la ligne continue bleue (rouge) représente $clim + \sigma$ ($clim - \sigma$), respectivement. σ est l'écart-type.

Ensuite, un seuil de 1.0 mm a été utilisé pour délimiter les jours humides des jours secs. Selon Gitau (2011), cela est principalement dû à deux raisons: 1°) les seuils inférieurs à 1.0 mm sont plus vulnérables aux erreurs de mesure associées aux faibles précipitations et s'évaporent facilement étant donné le taux d'évapotranspiration plus élevé dans la région étudiée et 2°) les seuils supérieurs à 1.0 mm réduisent considérablement la taille de l'échantillon de données à utiliser pour une analyse plus approfondie, car ils réduisent considérablement le nombre de jours humides. Dans notre étude, un jour sec a donc été défini comme tout jour ayant reçu des précipitations inférieures à 1.0 mm, tandis qu'un jour humide est tout jour ayant reçu des précipitations supérieures ou égales à 1.0 mm.

2.2.2 Chaîne de Markov

Une chaîne de Markov ou un processus de Markov, nommé d'après le mathématicien russe Andrey Markov (Shannon, 1948), est un système mathématique qui subit des transitions d'un état à un autre (à partir d'un nombre fini ou dénombrable d'états possibles) à la manière d'une

Chapitre 2 : Description des données et méthodes

chaîne. Il s'agit d'un processus aléatoire doté de la propriété de Markov. Les changements d'état du système sont appelés transitions, et les probabilités associées aux différents changements d'état sont appelées probabilités de transition. L'ensemble de tous les états et probabilités de transition caractérise complètement une chaîne de Markov. Pour une chaîne de Markov du premier ordre, la dépendance en chaîne signifie que l'état au temps t ne dépend que de l'état au temps $t - 1$, et est indépendant des états des autres temps. Si l'état actuel dépend de plus d'un état précédent, on dit que la séquence temporelle suit un processus d'ordre supérieur dépendant de la chaîne et le nombre d'états précédents liés est appelé l'ordre de la chaîne.

Dans notre étude, l'occurrence des précipitations est décrite par une chaîne de Markov à deux états (sec ou humide) du premier ordre, c'est-à-dire que la probabilité de pluie à un jour donné dépend de la présence ou non de pluie le jour précédent. Cette approche a été utilisée avec succès et étudiée de manière approfondie pour générer des précipitations (Larsen and Pense 1982; Roldan and Woolhiser 1982; Richardson, 1985).

L'occurrence des précipitations peut être définie comme suit :

$$X_t = \begin{cases} 0, & \text{si le jour au temps } t \text{ est sec} \\ 1, & \text{si le jour au temps } t \text{ est humide} \end{cases}$$

Le processus de chaîne de Markov d'ordre 1 est le plus simple et le plus utilisé dans la littérature. Le processus d'occurrence d'une série en chaîne d'ordre premier à deux états est ainsi décrit:

$$P_{ij} = Pr(X_t = j | X_{t-1} = i, X_{t-2} = i_{t-1}, \dots, X_1 = i_1) = Pr(X_t = j | X_{t-1} = i) \quad (1)$$

Où $i, j, i_1, \dots, i_{t-1} \in \{0, 1\}$, Pr est la probabilité et P_{ij} sont les probabilités de transition pour passer de l'état i (sec ou humide) à l'état j (sec ou humide).

Considérons la matrice de transition comme :

$$\begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}$$

Où P_{00} est la probabilité conditionnelle d'avoir un jour sec précédé d'un jour sec, P_{01} est la

Chapitre 2 : Description des données et méthodes

probabilité conditionnelle d'avoir un jour humide précédé d'un jour sec, P_{10} est la probabilité conditionnelle d'avoir un jour sec précédé d'un jour humide et P_{11} est la probabilité conditionnelle d'avoir un jour humide précédé d'un jour humide.

Ainsi, $P_{00} + P_{01} = 1$ et $P_{10} + P_{11} = 1$

Ces différents termes de probabilité utilisés ainsi que les probabilités d'un jour sec P_0 et de jour humide P_1 sont calculées comme suit:

Probabilités initiales

$$P_0 = \frac{N_0}{N} \quad (2)$$

$$P_1 = \frac{N_1}{N} \quad (3)$$

Probabilités de transition

$$P_{00} = \frac{N_{00}}{N_0} \quad (4)$$

$$P_{11} = \frac{N_{11}}{N_1} \quad (5)$$

$$P_{01} = 1 - P_{00} \quad (6)$$

$$P_{10} = 1 - P_{11} \quad (7)$$

Où N_0 est le nombre total de jours secs, N_1 est le nombre total de jours humides, N est le nombre total de jours dans la saison, N_{00} est le nombre de jours secs précédés de jour secs et N_{11} est le nombre de jours humides précédés de jour humides.

Alors, les probabilités de jours secs et de jours humides pendant n jours (Moon et al., 1994; Sonnadara and Jayewardene, 2015; Raheem et al., 2015; Raheem et Ezepeue, 2016; Nuga and Adekola, 2018) sont calculées respectivement :

$$P(D = n) = P_{00}^{n-1}(1 - P_{00}) \quad (8)$$

$$P(W = n) = P_{11}^{n-1}(1 - P_{11}) \quad (9)$$

2.2.3 Analyse statistique

- **Test non paramétrique**

Les statistiques non paramétriques sont habituellement beaucoup moins affectées par la présence de valeurs aberrantes et d'autres formes de non-normalité (Lanzante, 1996) et représentent une mesure de la dépendance linéaire monotone (Davis, 1986; Rossi et al., 1992). Le test non paramétrique le plus fréquemment utilisé pour identifier les tendances des variables hydrologiques est le test de Mann-Kendall (MK).

- **Test de Mann-Kendall**

Le test de Mann-Kendall permet de vérifier s'il existe une tendance dans les données d'une série chronologique. Il s'agit d'un test non paramétrique qui élimine les valeurs aberrantes.

Les n valeurs de la série chronologique (x_1, x_2, \dots, x_n) sont remplacées par leurs rangs relatifs (y_1, y_2, \dots, y_n).

La statistique de Mann-Kendall S est donnée comme suit :

$$S = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(y_i - y_j) \right\} \quad (10)$$

Où,

$$\text{sign}(y_i - y_j) = 1 \text{ si } y_i - y_j > 0$$

$$\text{sign}(y_i - y_j) = 0 \text{ si } y_i - y_j = 0$$

$$\text{sign}(y_i - y_j) = -1 \text{ si } y_i - y_j < 0$$

Si l'hypothèse nulle (H_0) est vraie, alors S est approximativement distribué normalement avec :

$$\delta = n \frac{(n-1)(2n+5)}{18} \quad (11)$$

Où, δ est la variance de S et n est le nombre de points de données.

La z-statistic de Mann-Kendall s'écrit comme suit :

$$Z = \frac{|S|}{\sqrt{\delta}} \quad (12)$$

Une valeur positive de S indique qu'il y a une tendance à la hausse et une valeur négative indique une tendance à la baisse. L'hypothèse nulle H_0 selon laquelle il n'y a pas de tendance dans les données est acceptée ou rejetée selon que la valeur Z calculée est inférieure ou supérieure à la valeur critique de la Z -statistic obtenue à partir du tableau de distribution normale au niveau de significativité de 5%. Une valeur Z positive supérieure à 1.96 (sur la base de tables de probabilités normales) indique une tendance à la hausse significative au niveau de significativité de 0.05, tandis qu'une valeur Z négative inférieure à -1.96 indique une tendance à la baisse significative. Ces tests sont appliqués aux données de précipitations en termes de probabilités d'occurrence des jours secs et humides afin de détecter les tendances et de quantifier les changements dans l'espace et dans le temps.

- **Ecart relatif**

L'écart relatif (ER) est exprimé en pourcentage (%) sous la forme :

$$ER = 100 \times \left(\frac{PP-HIST}{HIST} \right) \quad (13)$$

Où, PP représente la période de projection moyenne estivale dans le futur sous les scénarios de réchauffement et $HIST$ représente la période historique.

2.2.4 Domaine d'étude

Notre domaine d'étude couvre l'Afrique de l'Ouest (Figure 2.5) qui a été découpée en différentes zones (Sahel Ouest [18°W-10°W; 12.5°N-17.5°N], Sahel Central [10°W-10°E; 12.5°N-17.5°N], zone Soudanienne [8°W-10°E; 9°N-12.5°N] et Golfe de Guinée [8°W-5°E; 5°N-9°N]). Nous avons fait un focus sur le Sénégal dans le chapitre 5 (Figure 2.6) en considérant aussi ses différentes régions climatiques (Sud du Sénégal [17°W-14°W; 12.3°N-13.5°N], Est du Sénégal [14°W-11.3°W; 12.3°N-15°N], Centre du Sénégal [17.6°W-14°W; 13.5°N-15.2°N] et Nord du Sénégal [17°W-13°W; 15.2°N-16.7°N]). L'Afrique de l'Ouest est une région comportant plusieurs zones montagneuses : les montagnes du Fouta Djallon (FD), les plateaux de Jos (Jos) et le Mont Cameroun (MC) qui influencent la convection et donc les précipitations, et une partie de l'océan atlantique. Il s'étend entre la latitude 0 et 25°N et la

Chapitre 2 : Description des données et méthodes

longitude 25°W et 20°E. C'est dans ces zones montagneuses où les maxima de précipitations sont observés.

La région ouest africaine est caractérisée par deux grands régimes de pluies. Le régime guinéen caractérisé par deux saisons des pluies (caractère bimodale) et le régime de mousson (soudano-sahélien) marqué par une unique saison des pluies (caractère uni modale) (Sultan, 2002). Le régime guinéen est observé dans les latitudes inférieures, entre 5°N et 9°N et est marqué par deux maxima de pluies en Juin et en Septembre, et un minimum au mois d'Août. Ce minimum est expliqué par la baisse de la température de surface de la mer et de la divergence de l'humidité spécifique (Adegoke and Lamptey, 2000). Ces deux maxima marquent la phase de migration de la ZCIT entre ces deux positions d'équilibre (Diallo et al., 2010). Sylla et al. (2009) ont montré que ces deux pics de pluie sont liés à l'existence d'un système de basse pression due à la migration de la ZCIT entraînant une instabilité dans la région durant ces périodes. Le régime de mousson règne dans les latitudes supérieures (entre 9°N et 17.5°N) et est marqué par un seul maximum au mois d'Août dans le Sahel Ouest et Central. Il est caractérisé par deux saisons : une saison humide en été boréal (Juin-Septembre) et une saison sèche le reste de l'année. La zone de transition (Zone Soudanienne) est également marquée par un seul pic de maximum de précipitation observé au mois d'Août. Dans cette zone, la pluie commence dans la deuxième moitié du mois de mars et se termine au milieu du mois d'octobre, soit sept mois de saison des pluies.

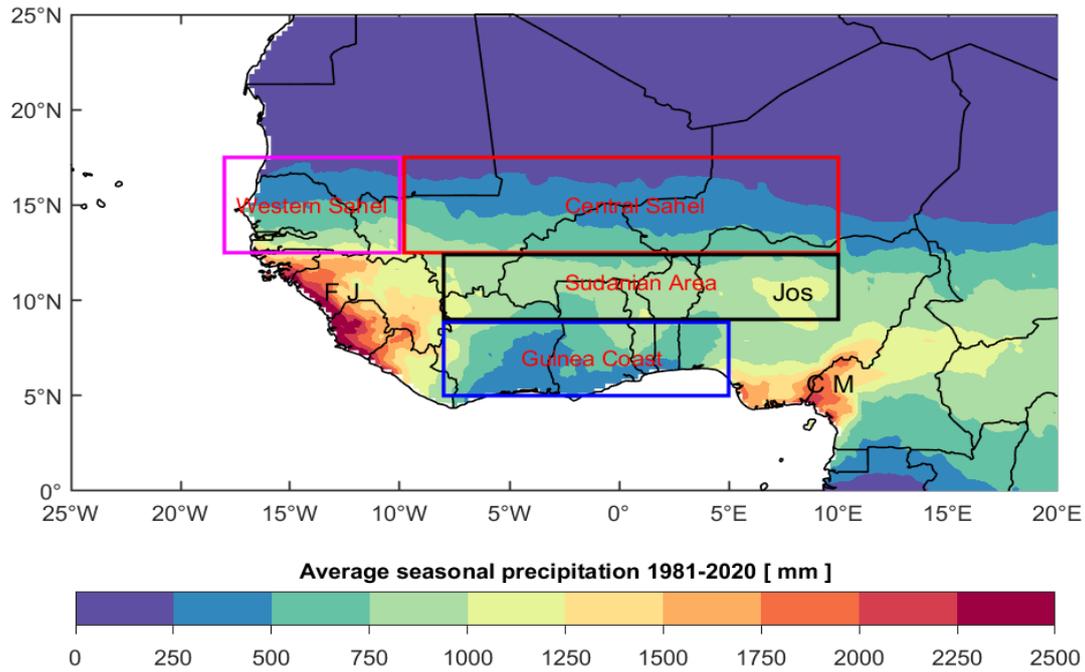


Figure 2.5: Précipitations moyennes estivales (JAS en mm) observées avec les données CHIRPS sur le domaine d'étude (Afrique de l'Ouest) durant la période 1981-2020. Les rectangles colorés indiquent les sous-régions considérées : Sahel Ouest (magenta), Sahel Central (rouge), Zone Soudanienne (noire) et Golfe de Guinée (bleue). Les zones montagneuses sont également représentées : Montagnes du Fouta Djallon (FJ), Plateau de Jos (Jos) et Mont Cameroun (CM).

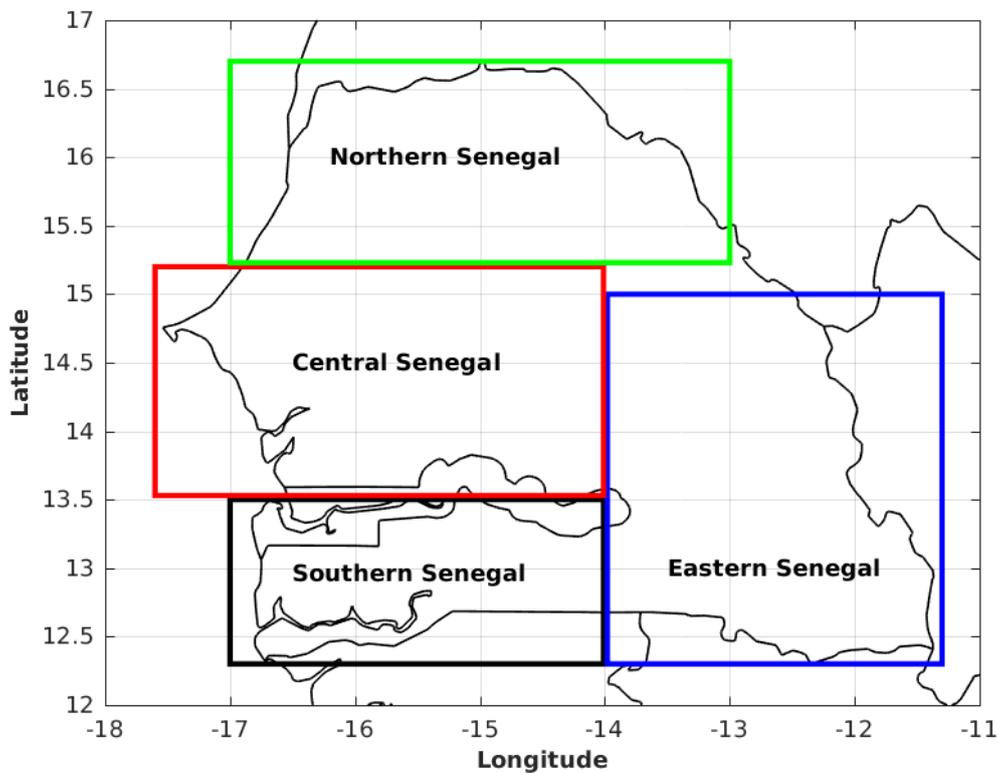


Figure 2.6: Zones climatiques du Sénégal: Sud du Sénégal (noire), Est du Sénégal (bleue), Centre du Sénégal (rouge) et Nord du Sénégal (verte).

Chapitre 3

Probabilités des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest pendant la mousson d'été

Sommaire

3.1	Résumé étendu de l'article Basse et al. (2021a).....	36
3.2	Article Basse et al. (2021a).....	38

Chapitre 3 : Probabilités des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest pendant la saison de mousson d'été

Ce chapitre est présenté sous forme d'un article publié dans la revue indexée "**Scientific Research and Essays**". Ce travail vise à caractériser les probabilités de jours secs et humides en Afrique de l'Ouest en utilisant l'approche de chaîne de Markov du premier ordre pendant la saison de la mousson (juin à octobre). D'abord, la variabilité spatiale des probabilités initiales (un seul jour sec ou humide), de transition et de jours consécutifs a été réalisée, suivi du cycle saisonnier des probabilités de transition. La dernière étape de l'article est consacrée à l'étude de la variabilité interannuelle des différentes probabilités.

3.1 Résumé étendu de l'article Basse et al. (2021a)

Les rendements des cultures en Afrique de l'Ouest dépendent principalement du régime pluviométrique de la mousson ouest-africaine (MOA). La connaissance des jours humides et secs consécutifs pourrait être utile pour l'analyse des régimes pluviométriques afin d'en tirer des informations spécifiques nécessaires à la planification des cultures et à la réalisation des campagnes agricoles (Shahraki et al., 2013). Selon le "West Council and African Center for Agricultural Research and Development" (Lamien, 2012), l'agriculture est le secteur qui continue de jouer un rôle dominant dans l'économie des pays d'Afrique de l'Ouest représentant plus de 40% de leur produit intérieur brut (PIB) et fournissant des revenus et des emplois à environ 70% des populations de la région. Les périodes humides et sèches sont parmi les caractéristiques les plus importantes de la variabilité des précipitations car elles affectent les ressources en eau, les rendements des cultures ainsi que la demande alimentaire (Biao and Alamou, 2018; Ayanlade et al., 2018). Par conséquent, l'analyse des précipitations doit être faite en termes de probabilités d'occurrence de ces épisodes dans le but de faire face au risque climatique sur les cultures en Afrique de l'Ouest. Ceci se justifie par le fait que le secteur agricole est fortement dépendant de la pluviométrie et donc des conditions climatiques.

En Afrique de l'Ouest, il existe quelques travaux utilisant les chaînes de Markov pour étudier les probabilités de jours secs et humides (Raheem et al., 2015; Tettey et al., 2017; Biao and Alamou, 2018; Doto et al., 2020) à l'échelle locale (pays). Cependant, aucune de ces études ne se concentre sur l'analyse des probabilités initiales, conditionnelles et consécutives de jours secs et humides dans l'ensemble du domaine ouest-africain. Les analyses précédentes sont locales et ne peuvent donc pas représenter les principales caractéristiques des précipitations des sous-domaines de l'Afrique de l'Ouest. Des informations climatiques plus spécifiques à

Chapitre 3 : Probabilités des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest pendant la saison de mousson d'été

chaque domaine de l'Afrique de l'Ouest sont utiles pour une meilleure gestion de l'agriculture et des ressources en eau.

Ce travail vise à caractériser les probabilités initiales, conditionnelles et consécutives de jours secs et humides en Afrique de l'Ouest en utilisant l'approche de la chaîne de Markov du premier ordre pendant la saison de mousson (juin à octobre). Les résultats montrent que les probabilités d'avoir un jour humide (P_W), un jour humide précédé d'un jour humide (P_{WW}) et un jour humide précédé d'un jour sec (P_{DW}) sont plus fortes dans les régions où les précipitations sont maximales (régions montagneuses). En revanche, les probabilités d'avoir un jour sec (P_D), un jour sec précédé d'un jour humide (P_{WD}) et un jour sec précédé d'un jour sec (P_{DD}) sont plus faibles dans les régions où les précipitations sont plus importantes.

Le cycle saisonnier de la probabilité P_{WW} est cohérent avec celui de la probabilité P_W dans toutes les régions sélectionnées. Les plus fortes (faibles) probabilités sont observées au mois d'août sur le Sahel Ouest, le Sahel Central et sur la zone Soudanienne (Golfe de Guinée). De même, le cycle saisonnier de probabilités P_{DD} est similaire avec celui de probabilités P_D , avec les minima sur le Sahel Ouest, le Sahel Central et la zone Soudanienne, et les maxima sur le Golfe de Guinée en août.

A l'échelle interannuelle, les résultats du test Mann-Kendall (MK) au seuil de confiance 5% montrent que la probabilité P_W et la probabilité P_{DW} présentent des tendances à la hausse statistiquement significative sur le Sahel Ouest et le Sahel Central tandis que les probabilités P_D et P_{DD} montrent des tendances à la baisse significatives. En outre, les périodes de sécheresse les plus courtes (3 jours) présentent des tendances aux baisses statistiquement significatives uniquement dans le Sahel Ouest. Les périodes sèches plus longues (c'est-à-dire; 5, 7 et 10 jours) montrent des tendances à la baisse statistiquement significatives sur le Sahel Ouest et Central. Les probabilités de périodes humides montrent des tendances à la baisse non significatives dans tous les sous-domaines, excepté le Sahel Ouest pour les périodes de 10 jours.

La connaissance de ces probabilités peut contribuer à développer des stratégies efficaces pour la gestion des ressources en eau et la prise de décision sur le plan de l'agriculture dans les pays d'Afrique de l'Ouest.

3.2 Article Basse et al. (2021a)

Probability of dry and wet spells over West Africa during the summer monsoon season

Jules Basse¹, Moctar Camara^{1*}, Ibrahima Diba¹ and Arona Diedhiou²

¹Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC), Université Assane Seck de Ziguinchor/Senegal

²Université Grenoble Alpes, IRD, CNRS, Grenoble INP, IGE, F-38000 Grenoble, France

*Corresponding author: Moctar Camara

Email: mocamara@zig-univ.sn

Article publié dans "Scientific Research and Essays"

Le 31 Juillet 2021

Vol. 16(3), p. 20-35, July-September, 2021

Doi: [10.5897/SRE2021.6718](https://doi.org/10.5897/SRE2021.6718)

Full Length Research Paper

Probability of dry and wet spells over West Africa during the summer monsoon season

Jules Basse¹, Moctar Camara^{1*}, Ibrahima Diba¹ and Arona Diedhiou²

¹Laboratoire d'Océanographie des Sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC) Université Assane Seck de Ziguinchor Senegal.

²Université Grenoble Alpes IRD CNRS Grenoble INP IGE F-38000 Grenoble France.

Received 08 March 2021; Accepted 10 June 2021

This work aims at characterizing the conditional probability of single or consecutive dry and wet days in West Africa using the first-order Markov chain approach during the monsoon season (June to October). The results show that the probabilities of having a wet day (P_w), a wet day preceded by another wet day (P_{ww}) and a wet day preceded by a dry day (P_{dw}) are stronger in regions where the rainfall is maximum (mountain regions). In contrast, the probabilities of having a dry day (P_d), a dry day preceded by a wet day (P_{wd}) and a dry day preceded by another dry day (P_{dd}) are lower in the regions with higher precipitation. The seasonal cycle of P_{ww} (P_{dd}) is consistent with that of P_w (P_d), respectively in Western Sahel and Central Sahel regions. At the interannual timescale, MK test results show that P_w and P_{dw} (P_d and P_{dd}) exhibit statistically significant increasing (decreasing) trends the Western Sahel and the Central Sahel. Besides, the shorter dry spells (3 days) show statistically significant decreasing trends only in the Western Sahel. The longer dry spells (5, 7 and 10 days) show statistically significant downward trends over the Western and Central Sahel. Wet spells probabilities show non-significant decreasing trends in all sub-domains, except in the Western Sahel for the 10 days spells.

Knowledge of these probabilities will contribute to develop efficient strategies for water resources management and agricultural decision making in West African countries.

Key words: Markov chain, rainfall, occurrence, wet spell, dry spell, West Africa.

INTRODUCTION

Crop yields in West Africa depend mainly on the rainfall regime of the West African Monsoon (WAM). Knowledge of consecutive wet and dry days could be useful for the analysis of rainfall regimes in order to derive specific information necessary for crop planning and carrying out agricultural campaigns (Shahraki et al., 2013). According

to the West Council and African Center for Agricultural Research and Development (Lamien, 2012) agriculture is the sector that continues to play a dominant role in the economy of West African countries representing more than 40% of their gross domestic product (GDP) and providing incomes and jobs for about 70% of the region's

*Corresponding author. E-mail: moctar.camara@univ-zig.sn

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

populations. Sarr and Camara (2018) found that climate change could have adverse effects on groundnut cultivation and that adaptation strategies will be essential for protecting this sector. West African agriculture is mainly influenced by the summer precipitation variability characterized by a succession of wet and dry days. Froidurot and Diedhiou (2017) have shown that the spatio-temporal variability of wet and dry episodes is linked to the spatio-temporal variability of the West African monsoon. Bichet and Diedhiou (2018a) found that the recent increase in rainfall over the entire West African Sahel band is mainly due to an increase in the number of wet days with more a strengthening of rainfall intensity in the central part of the subregions (Mali Niger Chad) and an increase of short dry spells occurrences. According to Taylor et al. (2017) the recent increase of the number of wet days and of the intensity of rainfall in the Central Sahel is associated with a tripled frequency of extreme Sahelian storms since 1982 due to global warming. Over the Gulf of Guinea and during the first rainy season (April-June) there is no significant trend observed in mean precipitation during the last thirty years but an increased occurrence of more intense rainfall is noted along the coast in agreement with the rise of the frequency of devastating floods. During the second rainy season (September-November) there is a significant increase in mean precipitation associated with an increase in precipitation intensity and frequency (Bichet and Diedhiou 2018b).

Wet and dry spells are among the most important rainfall variability characteristics as they affect water resources crop yields and food demand causing surpluses and deficits within a region (Biao and Alamou 2018; Ayanlade et al. 2018). Therefore the analysis of the rainfall should be done in terms of the probability of occurrence of these spells in the aim to tackle the climatic risk on crops in West Africa. This is justified by the fact that the agricultural sector is highly dependent on climatic conditions. It is therefore indispensable to develop a correspondence between the risk incurred by the agricultural sector and a climate risk model to facilitate the decision-making of policymakers (Stern and Cooper 2011). Effective forecasting of certain weather events such as the wet and dry spells is not easy. However the statistical study is a good tool to identify some aspects of rainfall variability (Mathoulthi and Lebdi 2008 2009). For instance the Markov chain is one of those tools that compute the probability of occurrence of an event knowing that it has occurred previously (Thirriot, 1986; Arnaud 1985). Many studies using the Markov chain in other regions exist in the scientific literature (Gabriel and Newman 1962; Todorovic and Woolhiser 1975; Katz 1977; Shahraki et al., 2013; Halder et al. 2016; Yoo et al. 2016; Bojar et al. 2018). For example Halder et al. (2016) used the Markov chain process to analyze the rainfall distribution in Eastern India. They showed that the probability of having two consecutive wet days varies

between 40 and 70% while the probability of having two consecutive dry days is between 50 and 90%.

In West Africa there are few studies using Markov chains to investigate the probability of dry and wet days (Raheem et al. 2015; Tettey et al., 2017; Biao and Alamou 2018; Doto et al. 2020). None of these studies focus on the analysis of the conditional probability of single or consecutive dry and wet days in the whole West African domain using the Markov chain. Previous analyses are local ones (or country level) and cannot represent the main characteristics of West African sub-domains rainfall. Climate information more specific to each domain of West Africa will be useful for better management of agriculture and water resources management.

The objective of this study is to analyze the conditional probabilities of wet and dry days and spells in West Africa with an emphasis on different sub-regions (Western Sahel Central Sahel Sudan and the Guinea Coast) of West Africa at different timescales (Intraseasonal to Interannual) using a first-order Markov chain.

DATA AND METHODS

We used daily rainfall data from the Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS) for the period 1981 to 2020 with a spatial resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (Funk et al. 2014; Poméon et al. 2017; Kouadio et al. 2018; Didi et al. 2020). This rainfall product is constructed from a combination of satellite observations and rain gauge station data like other rainfall products generally used in the West African region which is known to be a data sparse region: The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) (Huffman et al. 2001) Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) (Schamm et al., 2014) Climate Research Unit (Mitchell and Jones 2005) The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (Huffman et al. 2007) etc. CHIRPS data were developed to support the United States Agency for International Development's Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET). CHIRPS seasonal (July to September) climatology (Figure 1) shows a zonal distribution of rainfall with maxima located in the orographic regions (FD CM and JP). The lower seasonal rainfall amount is observed in the northern part of the domain (Sahel) and in the Guinea Coast.

In this present work the two state Markov chain of the first order was used that better describe the short-term persistence of rainfall occurrence in West African sub-regions from the intraseasonal to the interannual timescale. This method has been discussed by several authors (Stern and Cooper 2011; Afouda and Adisso 1997; Stern et al. 2006). Two states were used: dry day (D) and wet day (W). A day is considered to be dry (D) when the cumulative rainfall is less than 1 mm; while a wet day (W) is diagnosed when the rainfall amount is greater than or equal to 1 mm. Moreover the first-order two-state Markov chain is characterized by the fact that the current state depends only on the state of the previous period.

The different probability scores in this analysis are given and defined below. Equations 1 to 6 represent the initial and conditional probabilities (Pandharinath 1991; Shahraki et al., 2013; Dabral et al. 2014; Halder et al. 2016 Sifer et al., 2016).

Initial probability:

$$P_D = \frac{F_D}{N} \quad (1)$$

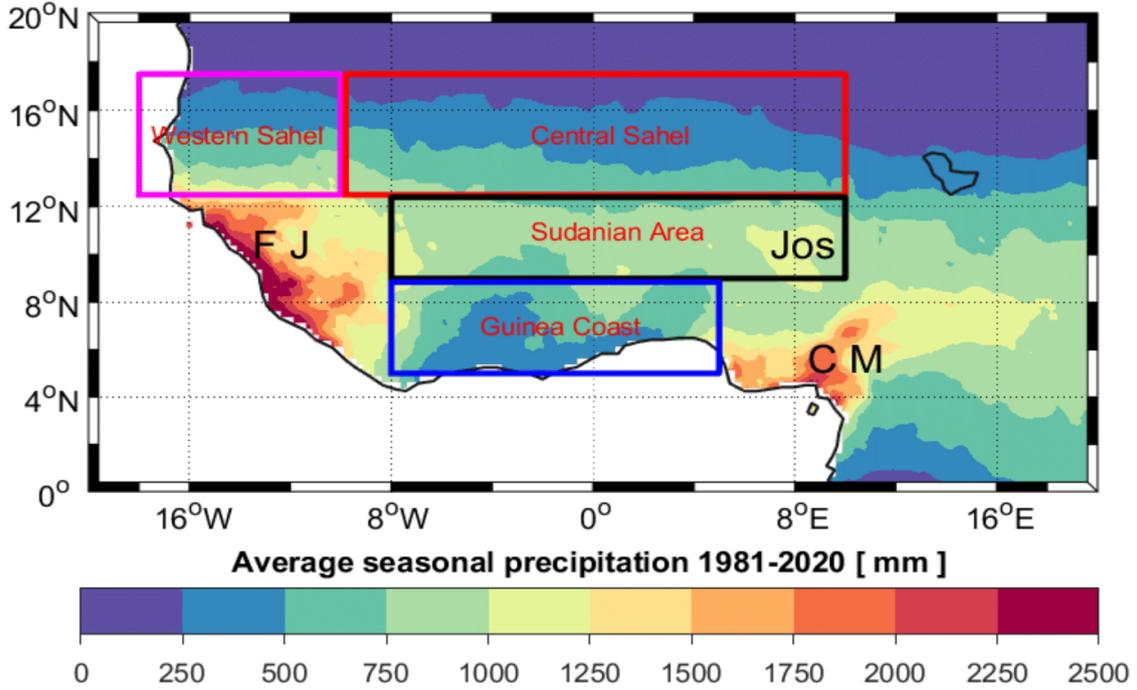


Figure 1. Average JAS seasonal precipitation (in mm) as observed with CHIRPS data for the period 1981-2020 over West Africa. The four colored rectangles indicate the considered sub-regions: Western Sahel (magenta) Central Sahel (red) Sudanian Area (black) and Guinea Coast (blue). The mountain areas are also shown: Fouta Jallon highlands (FJ) Jos Plateau (Jos) and Cameroon Mountains (CM).

$$P_W = \frac{F_W}{N} \quad (2)$$

Conditional probabilities

$$P_{DD} = \frac{F_{DD}}{F_D} \quad (3)$$

$$P_{WW} = \frac{F_{WW}}{F_W} \quad (4)$$

$$P_{DW} = 1 - P_{DD} \quad (5)$$

$$P_{WD} = 1 - P_{WW} \quad (6)$$

Where P_D is the probability of having a dry day P_W is the probability of having a wet day F_D is the number of dry days F_W

is the number of wet days N is the number of days in the season P_{DD} is the (conditional) probability of having a dry day preceded by another dry day P_{WW} is the (conditional) probability of having a wet day preceded by another wet day F_{DD} is the number of dry days preceded by another dry day F_{WW} is the number of wet days preceded by another wet day P_{DW} is the (conditional) probability of having a wet day preceded by a dry day and P_{WD} is the (conditional) probability of having a dry day preceded by a wet day.

Thus the probabilities of a wet or dry day during n periods (Moon et al. 1994; Sonnadara and Jayewardene, 2015; Raheem et al. 2015; Raheem and Ezepue 2016; Nuga and Adekola 2018) are respectively:

$$P(W = n) = P_{WW}^{n-1}(1 - P_{WW}) \quad (7)$$

$$P(D = n) = P_{DD}^{n-1}(1 - P_{DD}) \quad (8)$$

At the interannual time scale trends are evidenced by linear regression ($y = ax + b$). A trend is characterized by an increase (a decrease) when the slope $a > 0$ (when $a < 0$).

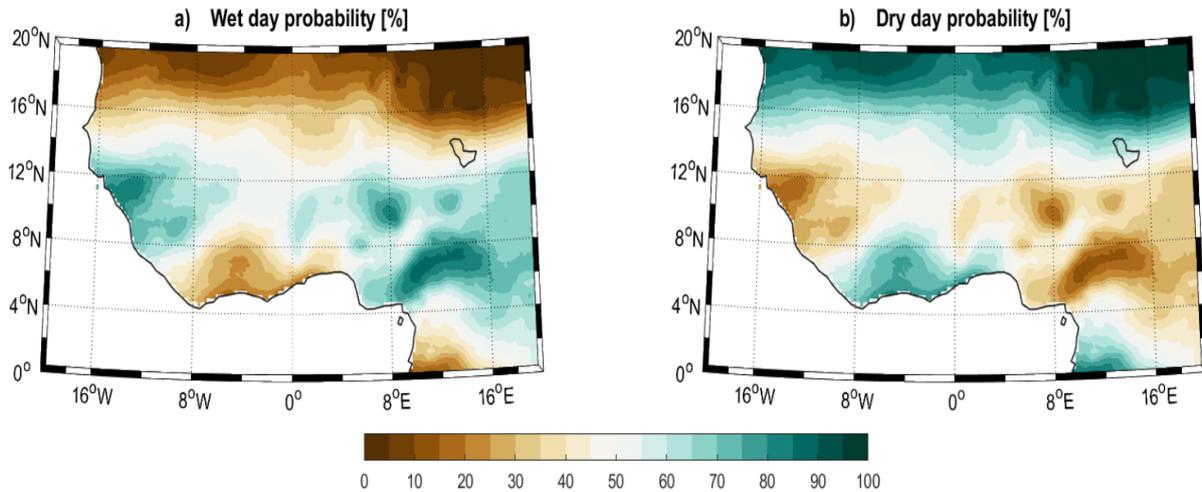


Figure 2. Probability (in %) of: (a) the wet day and (b) the dry day.

To detect statistically significant trends the nonparametric Mann-Kendall (MK) statistical test (Mann 1945; Kendall 1975) is used in this study. The test result $H = 1$ means a rejection of the null hypothesis at the alpha significance level. $H = 0$ means that the null hypothesis is not rejected at the alpha significance level. A typical value of alpha is 0.05 (Fatichi and Caporali 2009). If the p-value of the test is lower than alpha the test rejects the null hypothesis. If the p-value is greater than alpha there is insufficient evidence to reject the null hypothesis. The p-value of a test corresponds to the probability at the null hypothesis of obtaining a value of the test statistic as extreme as the value calculated from the time series data.

Figure 1 presents the study domain covering West Africa (20°W-20°E and 0-20°N) as in Froidurot and Diedhiou (2017). In this region rainfall follows a North-South gradient with the annual mean rainfall ranging between 400 mm in the Northern part (Northern Sahel) and more than 1500 mm in the South along the Guinea Coast. The highest annual mean rainfall is observed over mountain regions such as the Fouta Djallon the Adamawa Mountain between Nigeria and Cameroon and the Jos Plateau in central Nigeria.

We analyzed the spatio-temporal variability of the probabilities using four sub-regions represented in Figure 1 which are the Western Sahel (18°W-10°W; 12.5°N-17.5°N) the Central Sahel (10°W-10°E; 12.5°N-17.5°N) the Sudanian Zone (8°W-10°E; 9°N-12.5°N) and the Guinea Coast (8°W-10°E; 5°N-9°N). The mean annual precipitation in these sub-regions is respectively 575 430 1047 and 1247 mm (Froidurot and Diedhiou 2017). Rainfall patterns follow the seasonal migration of the Inter-Tropical Convergence Zone (ITCZ). They are also associated with the northward movement of the monsoon flow over the continent (Sultan et al. 2007). The Guinean Coast has two rainy seasons (from April to July and from September to October) while the Sahel domain (Western Sahel and Central Sahel) is characterized by a single rainy season located roughly between June and October.

The occurrence of wet and dry spells is evaluated for different intervals of duration (3 5 7 and 10 days) as in Sivakumar (1992) and Froidurot and Diedhiou (2017). These intervals are selected to be consistent with the African Easterly Waves (AEWs) synoptic disturbances which are known to modulate the daily rainfall in West Africa during the summer (Diedhiou et al., 1998; Wu et al., 2013).

RESULTS AND DISCUSSION

Spatial variability of the probabilities of wet and dry days

Figure 2 shows the spatial distribution of the probabilities of having a rainy day and a dry day during the summer season from July to September (JAS). The spatial variability of the probability of having an isolated single wet day (Figure 2a) is similar to that of seasonal precipitation (Figure 1) marked by a latitudinal gradient. The highest values are observed in the orographic regions (Fouta Jallon highlands Jos plateau and Cameroon Mountains). This distribution can be explained by the influence of the mountains and the latitudinal migration of the Inter-tropical Convergence Zone (ITCZ). The maximum probability in these orographic (mountains) areas is around 90% meaning that on average 83 days out of 92 days are wet in the season. Over these regions the orographic forcing of moisture fluxes leads to a stronger convective activity (intensity and frequency) (Sall et al. 2007). The probability of having an isolated wet day varies from more than 50% in the sahelian regions to less than 30% in the Gulf of Guinea. As for the probability of having a dry day (Figure 2b) low values are found in areas of high rainfall (that is Fouta Jallon highlands Jos Plateau and Cameroon Mountains) and stronger values in regions of lower annual rainfall (over the northern Sahel and the Guinea Coast). The spatial variability of conditional probabilities (P_{ww} P_{wd} P_{dw} and P_{dd}) are displayed in Figure 3. Figure 3a shows a spatial distribution of P_{ww} with high values located over the orographic regions (Fouta Jallon highlands Jos plateau

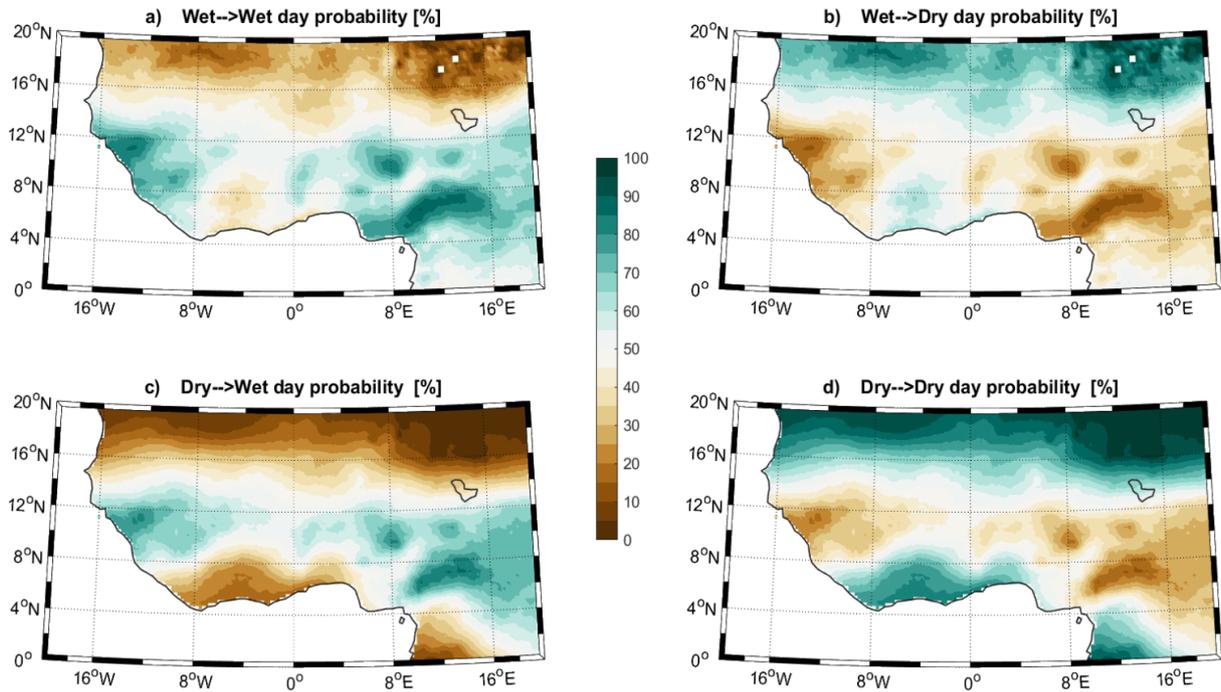


Figure 3. Transition probabilities (in %) of: a) wet day to wet day b) wet day to dry day c) dry day to wet day and d) dry day to dry day.

and Cameroon Mountains). Low values of P_{WW} are observed in the northern part of the Sahel and over the Guinea Coast. Conversely an opposite distribution is present when considering P_{WD} (Figure 3b) with low probabilities located over the orographic regions and high probabilities north of the Sahel and over the Guinea Coast. P_{DW} (Figure 3c) shows a distribution quite similar to that of P_{WW} with high values localized in mountainous areas and low ones north of the Sahel and over the Guinea Coast. However P_{DD} (Figure 3d) remains weak over the orographic regions. The high P_{DD} value is observed over the northern Sahel and the Guinea Coast. The strongest values of P_{DD} in the Guinea Coast are explained by the fact that the JAS period corresponds to the short dry season (or little dry season associated with a decrease of precipitation) in this region.

Figure 4 presents the spatial variability of the probabilities of consecutive rainy days of length 3 5 7 and 10 days. The spatial distribution of the probability to obtain 3 consecutive wet days (Figure 4a) is different from that of the mean seasonal precipitation with low values found over the orographic regions (Fouta Jallon

highlands Jos plateau and Cameroon Mountains). This means that the number of shorter wet spells are lower in these areas during the monsoon season (JAS) compared to other regions. Besides low probability values are found over the Guinea Coast in coherence with the decrease of precipitation during this season (little dry season) while North of 12.5°N the probability of having three (3) consecutive wet days varies up to 16% (that is over Senegal). Shorter wet spells are higher in the driest areas (Froidurot and Diedhiou 2017) that is in the sahelian regions. The patterns of the probability of occurrence of longer wet sequences (Figure 4b-d) exhibit a latitudinal gradient. They are higher in the same areas as those of the seasonal average precipitation (that is over the orographic regions). This result highlights the role of the orography (mountain) in the occurrence of these longer rainfall episodes. Their probabilities strongly decrease when the duration of the sequence becomes longer and are concentrated over the orographic regions; the probabilities of 7-10 days spells are lower than 4%.

Figure 5 presents the spatial variability of the probabilities of consecutive dry days. The probability of occurrence of short dry spells (Figure 5a) varies up to 16% in the whole region except in orographic areas where it reaches 4%. The probabilities of longer sequences (Figure 5b-d) are high in the northern Sahel

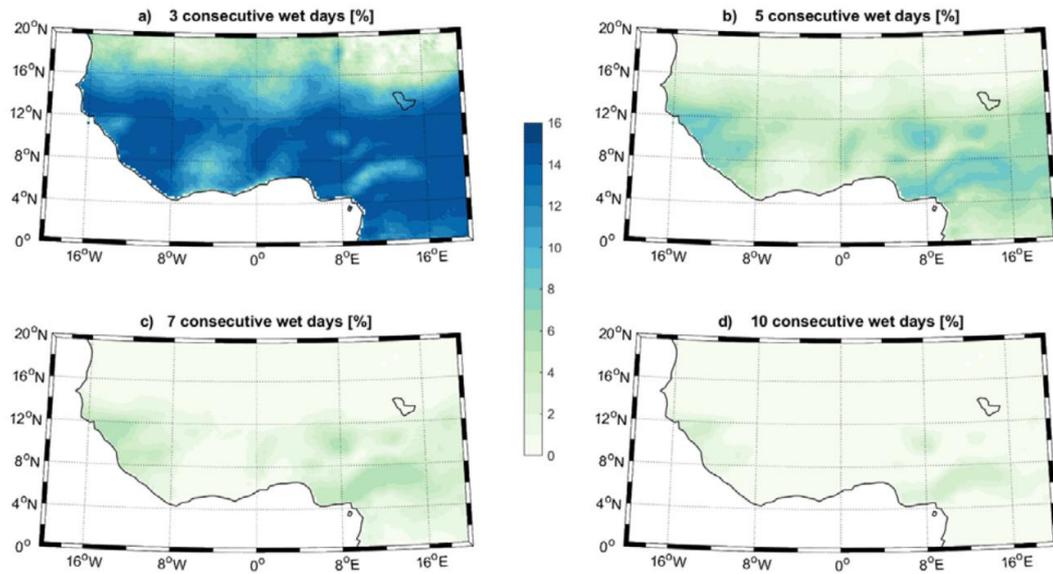


Figure 4. Probabilities (in %) of: a) 3 days wet spells length b) 5 days wet spells length c) 7 wet days spells length and d) 10 wet days spells length.

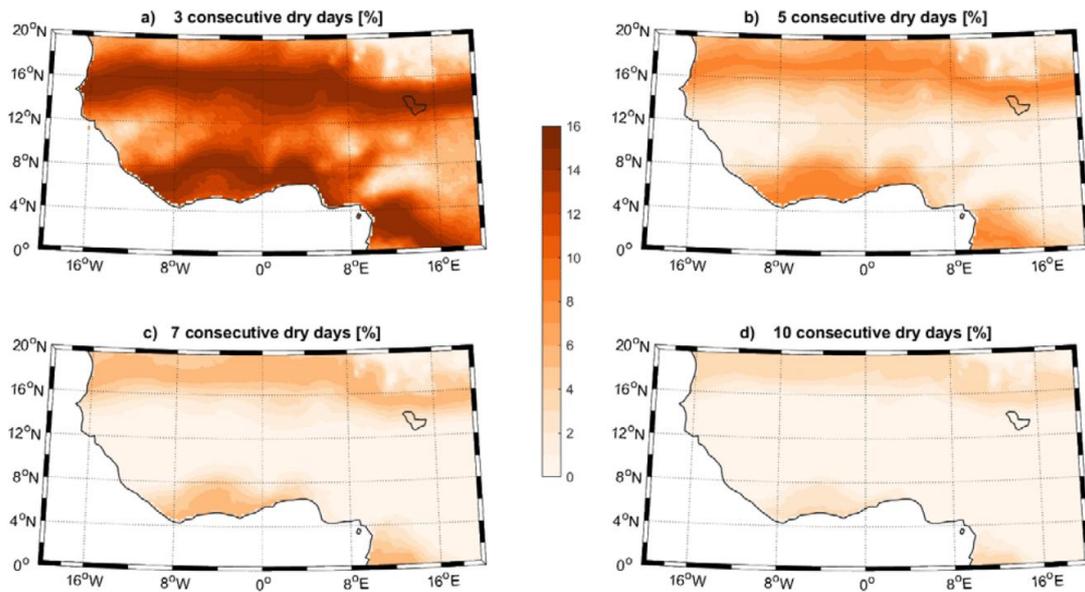


Figure 5. Probabilities (in %) of : a) 3 days dry spells length b) 5 days dry spells length c) 7 days dry spells length and d) 10 dry days spells length.

and the Guinea Coast and vary up to 9%. Like wet spells the probabilities of dry spells become lower when

considering longer sequences. Overall the highest probability values are encountered for short dry spells (3

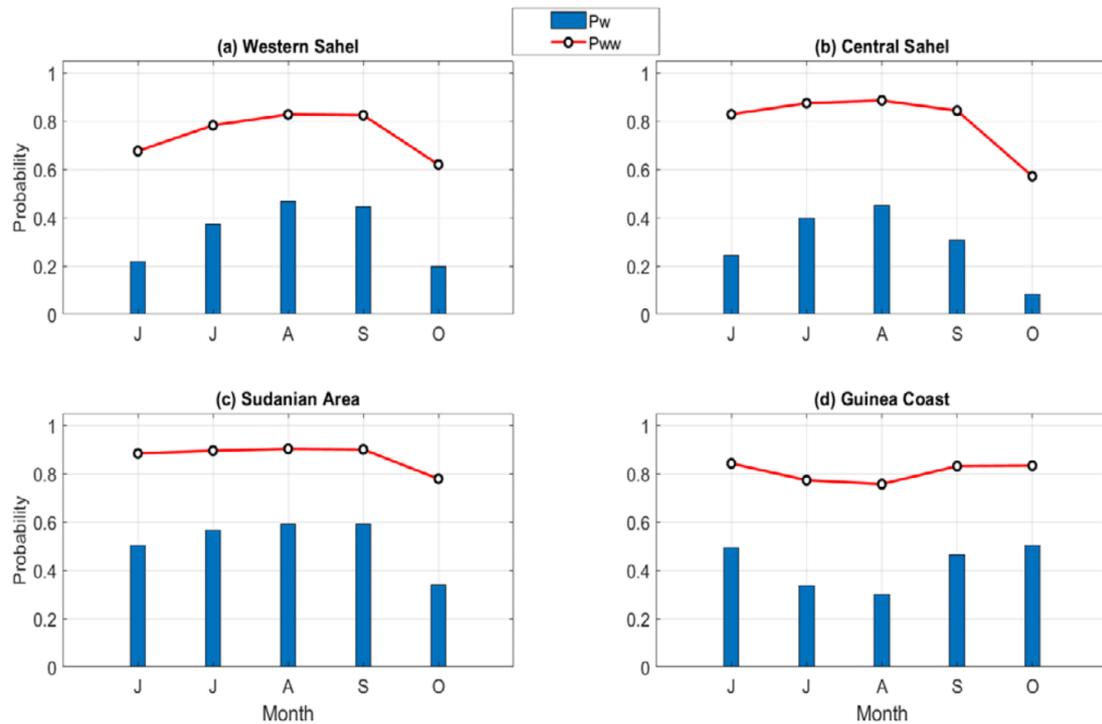


Figure 6. Seasonal cycle of the transitional probabilities (curve; P_{WW}) and the probability of wet days (histogram; P_W) for the sub-domains.

and 5 days) over the sahelian regions and the Guinea Coast. Longer dry spells (7 and 10 days) have low probabilities (<4%) in the same areas. These results concerning the spatial variability of wet and dry sequence probabilities are consistent with those described in Froidurot and Diedhiou (2017) for the same regions.

The analysis of wet and dry spells can help to better understand the occurrence of floods and drought. A better detection characterization and prediction of these spells are crucial for agriculture in West Africa. This sector is known to be highly dependent on monsoon rainfall and represents a significant amount of the GDP. The information on rainfall probabilities is vital for the design of water management supplementary irrigation projects and the evaluation of alternative cropping systems for effective soil water management plans.

Seasonal cycle of transition probabilities

Figures 6 and 7 present the seasonal cycle (from June to October) of transition probabilities of P_{WW} and P_{DD} (respectively from wet-to-wet and dry-to-dry respectively).

The other two transition probabilities of P_{WD} and P_{DW} (from wet-to-dry and dry-to-wet respectively) can be inferred from these two probabilities respectively (Appendix Figures 1 and 2).

Figure 6 shows that the seasonal variation of the transition probabilities of P_{WW} is consistent with that of wet days probability (P_W) in all considered sub-domains.

The higher probability values are observed during the July-August-September period in the sahelian regions (Western Sahel and Central Sahel) and in the Sudanian area coinciding with the core of the monsoon season in those areas; the maximum appears during August. These months concentrate most of the annual rainfall amount in the Sahel-Sudan region as well as most of agricultural activities. Over the Guinea Coast the transition probability of wet spell (P_{WW}) shows two maximums. The first (second) maximum is observed in June (October) coinciding with the precipitation core of the first (second) rainy season in this area. The lowest P_{WW} is observed in August. The first and the second maximum of P_W in this

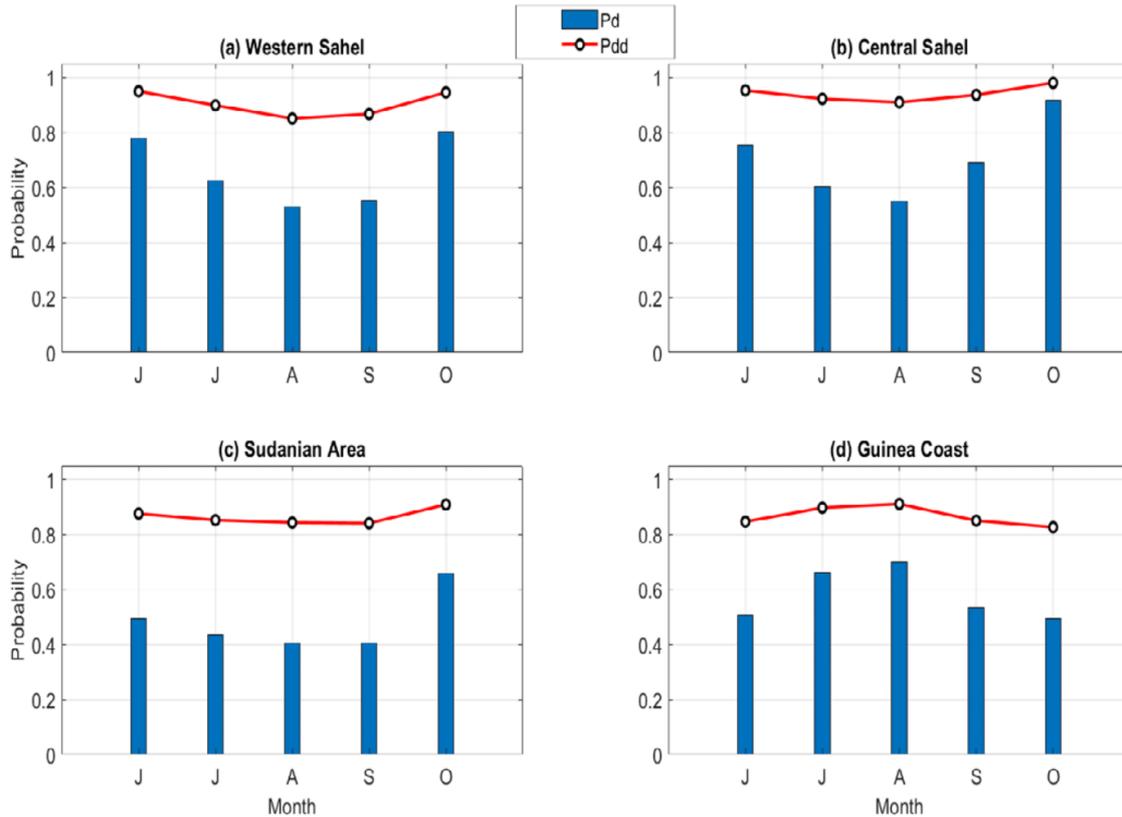


Figure 7. Seasonal cycle of the transitional probabilities (curve; P_{DD}) and the probability of dry days (histogram; P_D) for the selected sub-domains.

area corresponds to the same months (that is June and October respectively) as for P_{WW} . Therefore the transition probability of dry spells (P_{DD}) (Figure 7) shows the low values during the months where the probabilities of P_{WW} are high (that is JAS) in all sub-regions excepted in the Guinea Coast.

The probability of dry days (P_D) is consistent with P_{DD} in those regions. In the Guinea Coast the observed variation of transitional probabilities (P_{DD}) is consistent with the probability of dry days (P_D). The highest probabilities values are observed during July August and September due to a decrease in precipitation (that is the little rainy season) in this region. Our results on the seasonal transition probability of P_{WW} and P_{DD} in the sudano-sahelian regions are consistent with those of

Doto et al. (2020) in Burkina-Faso.

Interannual variability of the probabilities of wet and dry days

Here the analysis of the interannual variability of rainfall events probabilities on each of the considered sub-regions is presented.

Figure 8 presents the results of the probabilities of wet and dry days during the summer season (JAS). The probability of having a wet day (Figure 8a) varies between 33.23 and 50.76% over the Western Sahel 25.61 and 50.72% over the Central Sahel 47.76 and 66.83% over the Sudanian Zone and 25.43 and 60.16% over the Guinea Coast. Besides P_W showed a significant increase trend in the Western (p-value = 0.00005) and the Central Sahel (p-value = 0.00008) and non-significant increase trend in the Sudanian Zone (p-value = 0.9350)

Chapitre 3 : Probabilités des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest pendant la saison de mousson d'été

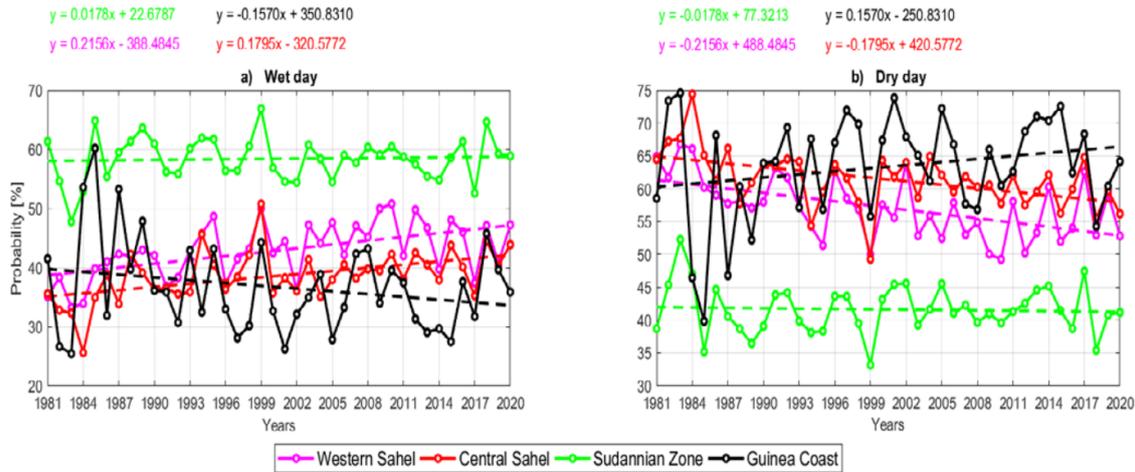


Figure 8. Probabilities of wet day (a) and dry day (b) over the period 1981-2020.

Table 1. Initial and transition probabilities of dry and wet days over West African sub-regions in the summer period (JAS).

Sub-region	Transition probability				Initial probability	
	P_{WW}	P_{WD}	P_{DD}	P_{DW}	P_W	P_D
Western Sahel	0.4709	0.5291	0.5932	0.4068	0.4291	0.5709
Central Sahel	0.4017	0.5983	0.6157	0.3843	0.3860	0.6140
Sudanian Area	0.5762	0.4238	0.4090	0.5910	0.5838	0.4162
Guinea Coast	0.4567	0.5433	0.6813	0.3187	0.3667	0.6333

while a non-significant decrease trend is observed in the Guinea Coast (p -value = 0.3822).

As for the probability of having a dry day it varies between 49.24 and 66.77% over the Western Sahel 49.28 and 74.39% over the Central Sahel 33.17 and 52.24% over the Sudannian Zone and 39.84 and 74.57% over the Guinea Coast (Figure 8b). Also P_D showed statistically significant decrease trends in the Western and Central Sahel.

Overall Table 1 shows that the probability of an isolated rainy day remains high in the Sudannian Zone (58.38% on average) compared to the other zones while the probability of having a dry day remains low (41.62% on average). The highest probability of having an isolated dry day is observed in the Guinea Coast (63.33% on average).

The transition probability analysis is shown in Figure 9. The probability of P_{WW} (transition from wet-to-wet) varies between 36 and 55.42% in the Western Sahel 34.27 and 50.68% in the Central Sahel 48.43 and 66.38% in the Sudannian Zone and 32.44 and 66.67% in the Guinea

Coast (Figure 9a). A downward and non-significant trend is observed in the Sudannian zone and the Guinea Coast while an upward and non-significant trend is observed in the Western Sahel and the Central Sahel (Figure 9a). As for the probability of P_{WD} it varies between 44.58 and 64% in the Western Sahel 49.32 and 65.73% in the Central Sahel 33.62 and 51.57% in the Sudannian Zone and 33.33 and 67.56% in the Guinea Coast (Figure 9b). As the P_{WW} the P_{WD} showed non-significant trends for all West African areas (Figure 9b).

The probability P_{DW} varies between 28.12 and 52.53% in the Western Sahel 22.12 and 52.07% in the Central Sahel 44.81 and 69.35% in the Sudannian Zone and 23.03 and 50.20% in the Guinea Coast (Figure 9c). The P_{DW} showed significant (non-significant) upward trends in the Western Sahel and Central Sahel (Sudannian zone) while a decrease and a non-significant trend is noted in the Guinea Coast. As for P_{DD} it ranges between 47.47 and 71.88% 47.93 and 77.88% 30.65 and 55.19% and 49.80 and 76.97% respectively over the Western Sahel

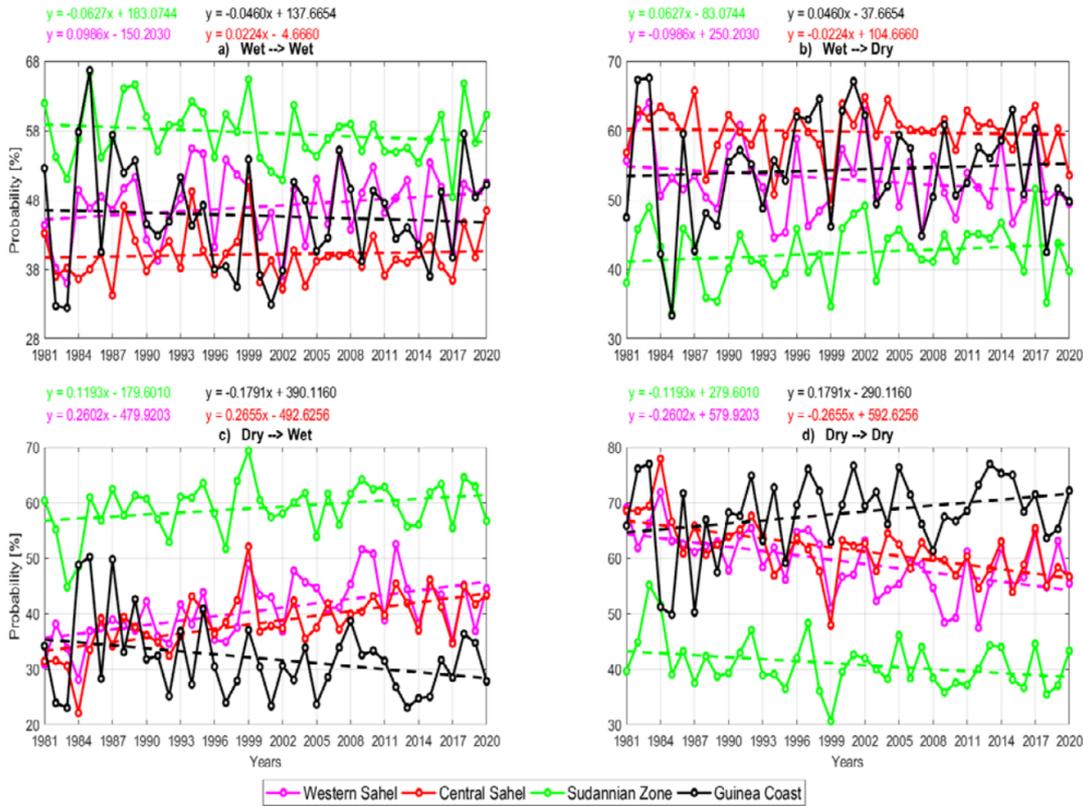


Figure 9. Transition probabilities. (a) Wet day to wet day (b) wet day to dry day (c) dry day to wet day and (d) dry day to dry day.

the Central Sahel the Sudannian Zone and the Guinea Coast (Figure 9d). Contrary to the trends of P_{DW} the P_{DD} exhibited significant (non-significant) downward trends in the Western Sahel and Central Sahel (Sudannian zone) while a non-significant increase trend is noted in the Guinea Coast. Overall in the Western Sahel and Central Sahel the P_{DW} have increased during these last thirty years. This means that the Sahel is becoming wetter confirming the recovering of the rainfall (associated with an increase of rainy days occurrence and intensities) (Nicholson 2005; Taylor et al. 2017; Bichet and Diedhiou 2008a). Taylor et al. (2017) demonstrate that due to global warming the frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982.

However Table 1 reveals that the probabilities of having two successive dry days (P_{DD}) are higher than having a dry day followed by a wet day (P_{DW}) in all considered sub-domains except the Sudannian Zone. On the other hand the probability of having a wet day followed by a dry

day (P_{WD}) is higher than that of having two successive wet days (P_{WW}). The highest probability of having two successive dry days is observed in the Guinea Coast (68.13% on average). This high probability may be due to a rainfall decrease during the JAS season over this area of West Africa. However the highest probability of having two successive wet days is recorded in the Sudannian Zone (57.62% on average). Our results on the transition probabilities are in agreement with those of Biao and Alamou (2018) who showed that the probabilities of having two successive dry days are stronger than those of having a dry day followed by a wet day and the probabilities of having two successive wet days are much lower than the probabilities of having a wet day followed by a dry day at all stations studied in Benin. Our results are also consistent with those found by Rahem et al. (2015) in Nigeria and Tetey et al. (2017) in the south eastern coastal belt of Ghana (that is Cape Coast Akatsi Keta Akuse and Accra). According to Selvaraj and Selvi (2011) knowledge of these probabilities can reduce the risk associated with meteorological uncertainty which

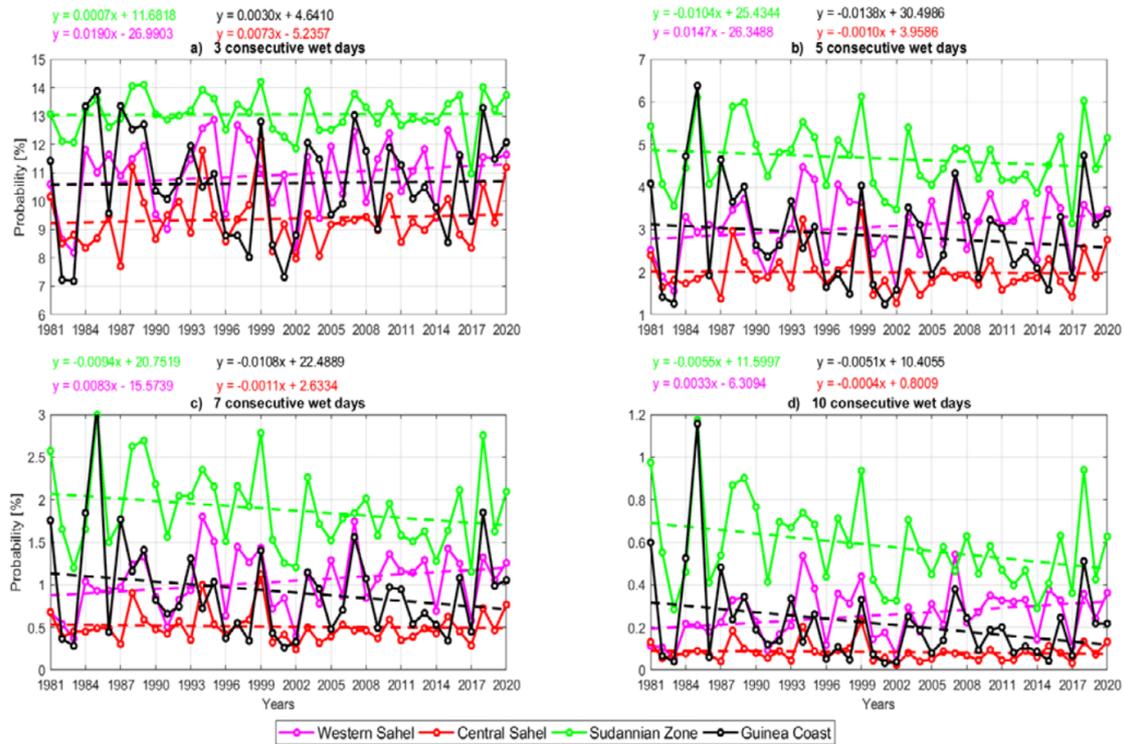


Figure 10. Consecutive wet day's probability. (a) 3 consecutive wet days (b) 5 consecutive wet days (c) 7 consecutive wet days and (d) 10 consecutive wet days.

in turn is fundamental because it can help policymakers take appropriate water management decisions for food security.

Analysis of the interannual variability of wet and dry spells is displayed in Figures 10 and 11 respectively. When considering the wet spells (Figure 10) the probability of occurrence of 3 consecutive wet days varies between 8.18 and 12.87% in the Western Sahel 7.71 and 12.16% in the Central Sahel 10.97 and 14.20% in the Sudanian Zone and between 7.18 and 13.88% in the Guinea Coast. The probability values decreased gradually for wet sequences of increasing length (Figure 10b c d). The probability of the occurrence of consecutive wet days remains high in the Sudanian zone regardless of the length of the considered wet sequence. Overall the Western and Central Sahel show an increasing trend of the probabilities of occurrence of consecutive wet days whatever the duration while the Sudanian Zone and the Guinea Coast show a decreasing trend during these thirty years. The probabilities of consecutive wet days showed non-significant trends for all studied areas except the Western Sahel where the 10 consecutive wet days show a significant increase trend (p-value = 0.0192).

The analysis of dry spells interannual variability (Figure 11) shows that the P_{3D} (Figure 11a) varies between 10.64 and 13.40% 10.92 and 13.78% 6.59 and 13.14% and 11.44 and 13.74% respectively over the Western Sahel the Central Sahel the Sudanian Zone and the Guinea Coast. As observed in Figure 11 the probability of consecutive dry days (for all durations) has a decrease trend in all studied areas except the Guinea coast where the increase trend is observed. The P_{3D} exhibits significant trends only in the Western Sahel (p-value = 0.0231). These probabilities decrease when the sequence becomes longer (Figure 11b c d). The longer dry spells (5 7 and 10 days) show statistically significant trends over the Western Sahel and the Central Sahel. In the Sudanian Zone only the 10 consecutive dry days show statistically significant trend (p-value = 0.0490). In Guinea Coast the probability of longer dry spells exhibits a non-significant trend. The Mann-Kendall test results for different West African sub-domains are summarized in Appendix Table 1. The Sudanian Zone experienced the weakest values of consecutive dry days. This difference in the spatio-temporal variability of the probabilities could

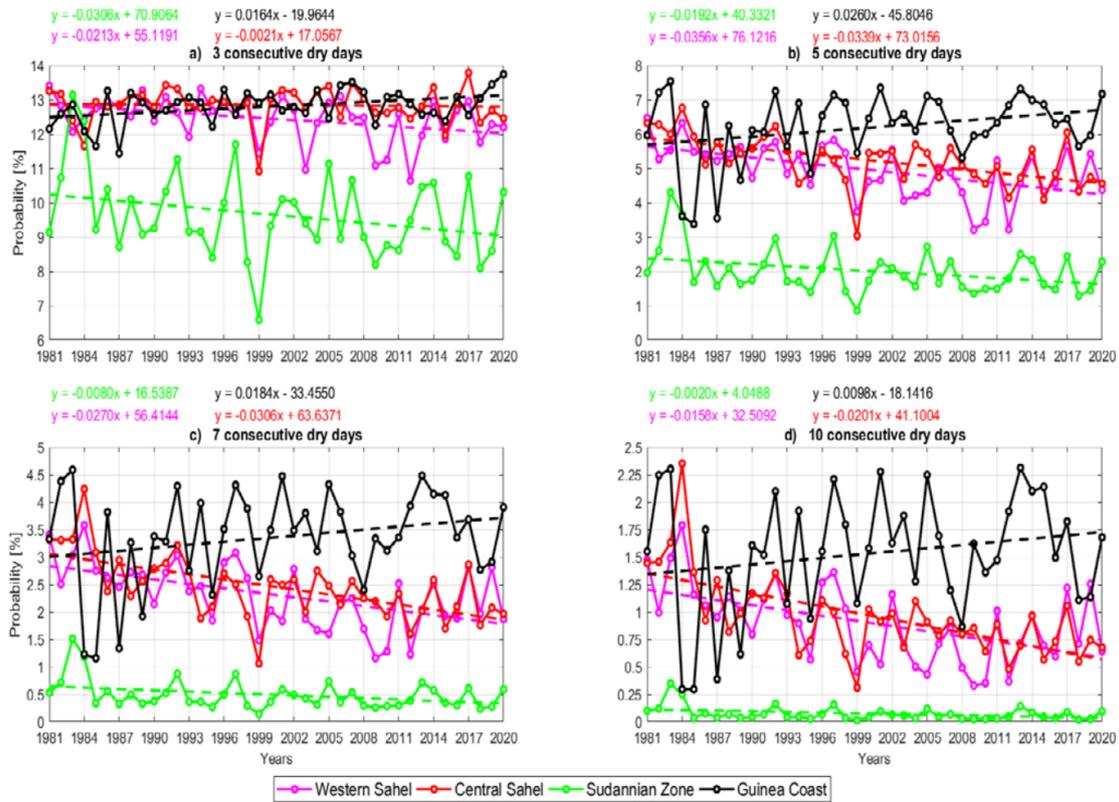


Figure 11. Consecutive dry day's probability. a) 3 consecutive dry days b) 5 consecutive dry days c) 7 consecutive dry days d) 10 consecutive dry days

Table 2. Probabilities of consecutive dry and wet days over West African sub-regions during the summer season.

Subregions	Consecutive wet day probabilities				Consecutive dry day probabilities			
	P_{3W}	P_{5W}	P_{7W}	P_{10W}	P_{3D}	P_{5D}	P_{7D}	P_{10D}
Western Sahel	0.1093	0.0306	0.0104	0.0026	0.1244	0.0494	0.0231	0.0090
Central Sahel	0.0938	0.0199	0.0051	0.0000	0.1284	0.0522	0.0246	0.0096
Sudanian Area	0.1306	0.0467	0.0189	0.0058	0.0964	0.0200	0.0049	0.0000
Guinea Coast	0.1063	0.0285	0.0092	0.0022	0.1281	0.0620	0.0336	0.0154

be due to the meridional movement of the Intertropical Convergence Zone (ICTZ). Table 2 summarize the characteristics of dry and wet spells probability and shows that the mean of 3 consecutive wet (dry) days probability is 0.1093 (0.1244) in the Western Sahel 0.0938 (0.1284) in the Central Sahel 0.1306 (0.0964) in the Sudannian Zone and 0.1063 (0.1281) in the Guinea Coast. These results indicate that there is probably more drought persistence in the rainy season in parts of West

Africa (Western Sahel Central Sahel and Guinea Coast) except the Sudannian Zone. This drought persistence may cause a shortage of river flows hence of water resources and water availability activities in agro-pastoral areas (Biao and Alamou 2018). The succession of dry days may be the combined result of the decrease in the intensity of rainfall and the number of wet days during the summer monsoon season in these regions (Western Sahel Central Sahel and Guinea Coast). This information

can have potential benefits for the water resource management and agricultural decision making.

Conclusion

The Markov chain process was used to evaluate the initial conditional and consecutive wet and dry day probabilities during the monsoon season in West Africa. The results can be summarized as follows:

- 1) When considering the intra-seasonal variability the probability of having an isolated wet (dry) day remains high (low) in regions with higher precipitation (Sahel and Sudan regions). The probabilities of P_{WW} and P_{DW} are stronger over the orographic regions while P_{DD} and P_{WD} values are lower in these same areas. The probability of consecutive wet days decreases when the sequence becomes longer and is stronger over the orographic regions. As for the wet days the probability of consecutive dry days becomes lower when the sequence is longer but is almost zero in the orographic regions.
 - 2) The analysis of the seasonal cycle shows that the variation of P_{WW} is similar to that of P_W in all sub-regions except the Guinea Coast with high values observed in the core of the rainy season (that is July to September). Besides the seasonal variation of P_{DD} is similar to that of P_D in all West African considered sub-regions.
 - 3) At the interannual timescale the probability of having an isolated wet (dry) day exhibits a significant increase (decrease) trend in the Western Sahel and the Central Sahel. However these probabilities are not statistically significant in the Sudanian zone and in the Guinea Coast. Regarding the analysis of conditional probabilities our results showed that P_{DD} (P_{DW}) exhibits a substantial statistically significant decrease (increase) trend in the Western and Central Sahel. The probability of P_{WW} and P_{WD} are statistically non-significant in West Africa regions. The probability of shorter dry spells (3 days) show significant downward trends only in the Western Sahel. In addition longer dry spells (5 7 and 10 days) show statistically significant downward trends over the Western Sahel and the Central Sahel and only the 10 consecutive dry days which show statistically significant decrease trend in the Sudanian Zone. In the Guinea coast the probability of dry spells show a non-significant upward trend.
- Future work is planned to study on one hand the changes in these probabilities in a near future (2040-2060) and in a far future (2080-2100) using climate projections and on another hand to characterize these changes under 1.5 and 2°C global warming.

For this purpose a goodness-of-fit test of the Markov chain (Besag and Mondal 2013) will be applied to CMIP5 and CMIP 6 data to find the relevant model which will better capture changes in the occurrence of wet and dry days (or spells) under different global warming levels (1.5 and 2°C) and different time horizons (near future and far future).

CONFLICT OF INTERESTS

The authors have not declared any conflict of interests.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Assane SECK University of Ziguinchor and the "Fond d'Impulsion de la Recherche Scientifique et Technologique" program of MESRI-Senegal for their support.

REFERENCES

- Afouda A Adisso P (1997). Etude stochastique des structures de séquences sèches au Bénin. Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty (Proceedings of the Rabat Symposium S1) IAHS Publication 240 Rabat Maroc.
- Arnaud M (1985). Contribution à l'étude stochastique markovienne des précipitations dans le bassin Adour-Garonne. Thèse présentée pour obtenir le titre de Docteur de l'Institut national polytechnique de Toulouse.
- Ayanlade A Radeny M Morton JF Muchaba T (2018). Rainfall variability and drought characteristics in two agro-climatic zones: An assessment of climate change challenges in Africa. *Science of the Total Environment* 630:728-737.
- Besag J Mondal D (2013). Exact goodness-of-fit tests for Markov chains. *Biometrics* 69(2):488-496.
- Biao El Alamou EA (2018). Stochastic Modelling of Daily Rainfall for Decision Making in Water Management in Benin (West Africa). *Research journal of Advance Environmental Science* 1: 12-21.
- Bichet A Diedhiou A (2018a). West African Sahel has become wetter during the last 30 years but dry spells are shorter and more frequent. *Climate Research* 75(2):155-162.
- Bichet A Diedhiou A (2018b). Less frequent and more intense rainfall along the coast of the Gulf of Guinea in West and Central Africa (1981-2014). *Climate Research* 76(3):191-201.
- Dabral P Purkayastha K Aram M (2014). Dry and wet spell probability by Markov chain model- a case study of North Lakhimpur (Assam) India. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 7(6):8-13. Doi: 10.3965/ij.ijabe.20140706.002.
- Didi SRM Ly M Kouadio K Bichet A Diedhiou A Coulibaly HSJ Kouadio KKA Coulibaly TJH Obahoundje S and Savané I (2020). Using the CHIRPS Dataset to Investigate Historical Changes in Precipitation Extremes in West Africa. *Climate* 8(7):1b-1b.
- Diedhiou A Janicot S Viltard A P de Felice (1998). Evidence of two regimes of easterly waves over West Africa and the tropical Atlantic. *Geophysical Research Letters* 25(15):2805-2808.
- Doto CV Niang D Zorom M Yacouba H (2020). Statistical Study of Dry Spells and Their Impact on Rainfed Corn in the Burkina Faso Sahel. *American Journal of Water Resources* 8(1):31-37. Doi: 10.12691/ajwr-8-1-4.
- Fatichi S Caporali E (2009). A comprehensive analysis of changes in precipitation regime in Tuscany. *International Journal of Climatology* 29(13):1883-1893. Doi: 10.1002/joc.1921.
- Froidurot S Diedhiou A (2017). Characteristics of wet and dry spells in the West African monsoon system. *Atmospheric Science Letters*

- 18(3):125-131.
- Funk CC Peterson PJ Landsfeld MF Pedreros DH Verdin JP Rowland JD Romero BE Husak GJ Michaelsen JC Verdin AP (2014). A quasi-global precipitation time series for drought monitoring. U.S. Geological Survey 832(4). Doi: 110.3133/ds832.
- Gabriel KR Newman J (1962). A Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel Aviv. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 88(375):90-95.
- Halder D Panda RK Srivastava RK Kheroar S Singh SP (2016). Stochastic analysis of rainfall and its application in appropriate planning and management for Eastern India agriculture. Water Policy 18(5):1155-1173. Doi: 10.2166/wp.2016.240.
- Huffman GJ Adler RF Morrissey MM Bolvin DT Curtis S Joyce R McGavock B Susskind J (2001). Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. Journal of Hydrometeorology 2(1):36-50.
- Huffman GJ Adler RF Rudolf B Schneider U Keehn PR (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global multiyear combined-sensor precipitation estimates at fine scales. Journal of Hydrometeorology 8(1):38-55.
- Katz RW (1977). Precipitation as a chain-dependent process. Journal of Applied Meteorology 16(7):671-676.
- Kendall MG (1975). Rank Correlation Methods 4th edition. Charles Griffin London U.K
- Kouadio K Bastin S Konare A Ajayi VO (2018). Does convection-permitting simulate better rainfall distribution and extreme over Guinean coast and surroundings? Climate Dynamics 55(1):153-174.
- Lamien N (2012). West Africa Agricultural Productivity Program (WAAPP), CORAF/WECARD. http://www.coraf.org/documents/fiches_projets/West_Africa_Agricultural_Productivity_Program.pdf
- Mann HB (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica 13:245-259.
- Mathoulthi M Lebdi F (2008). Assessment of the reliability of reservoir dam operation for dry events. Hydrological Sciences Journal 53(6):1194-1207.
- Mathoulthi M Lebdi F (2009). Analyse statistique des séquences sèches dans un bassin du nord de la Tunisie. Hydrological Sciences Journal 54(3):442-455.
- Mitchell TD Jones PD (2005). An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society 25(6):693-712.
- Moon SE Ryoo SB Kwon JG (1994). A markov chain model for daily precipitation occurrence in South Korea. International Journal of Climatology 14(9):1009-1016. Doi: 551.577.2 (519.5):519.217.
- Nicholson S (2005). On the question of the "recovery" of the rains in the West African Sahel. Journal of Arid Environments 63(3):615-641.
- Nuga OA, Adekola LO (2018). A Markov chain analysis of rainfall distributions in three south western cities of Nigeria. Research Journal of Physical Sciences 6(4):1-5.
- Pandharinath N (1991). Markov chain model probability of dry and wet weeks during monsoon periods over Andhra Pradesh. Mausam 42(4):393-400.
- Poméon B Jakisch T Diekkrüger D (2017). Evaluating the performance of remotely sensed and reanalysed precipitation data over West Africa using HBV light. Journal of Hydrology 547:222-235.
- Raheem MA Ezepeue PO (2016). A Three-State Markov Model for Predicting Movements of Asset Returns of a Nigerian Bank. CBN Journal of Applied Statistics 7(2):77-99.
- Raheem MA, Yahya WB, Obisesan KO (2015). A Markov chain approach on pattern of rainfall distribution. Journal of Environmental Statistics 7(1):1-13.
- Sall SM Viltard A Sauvageot H (2007). Rainfall distribution over the Fouta Djallon- Guinea. Atmospheric Research 86(2):149-161 Doi: 10.1016/j.atmosres.2007.03.008.
- Sarr AB Camara M (2018). Simulation of the impact of climate change on peanut yield in Senegal. International Journal of Physical Sciences 13(5):79-89. Doi: 10.5897/IJPS2017.4710.
- Schamm K Ziese M Becker A, Finger P, Meyer-Christo_er A, Schneider U, Schröder M, Stender P (2014). Global gridded precipitation over land: a description of the new GPCC First Guess Daily product. Earth System Science Data 6(1):49-60.
- Selvaraj RS, Selvi ST (2011). Stochastic modelling of daily rainfall at Aduthurai. Research Journal of Science and Technology 3(2):80-84.
- Shahraki N Bakhtiari B Ahmadi MM (2013). Markov chain model for probability of dry wet days and statistical analysis of daily rainfall in some climatic zone of Iran. Aerul și Apa: Componente ale Mediului 2013:399-406.
- Sifer K Yemenu F Kebede A Quarshi S (2016). Wet and dry spell analysis for decision making in agricultural water management in the eastern part of Ethiopia West Haraghe. International Journal of Water Resources and Environmental Engineering 8(7):92-96.
- Sivakumar MVK (1992). Empirical analysis of dry spells for agricultural applications in West Africa. Journal of Climate 5(5):532-539.
- Sonnadara DUJ Jayewardene DR (2015). A Markov chain probability model to describe wet and dry patterns of weather at Colombo. Theoretical and Applied Climatology 119(1):333-340 Doi: 10.1007/s00704-014-1117-z.
- Stern RD Cooper PMJ (2011). Assessing climate risk and climate change using rainfall data: a case study from Zambia. Experimental Agriculture 47(2):241-266.
- Sultan B Janicot S Drobinski P (2007). Characterization of the diurnal cycle of the West African Monsoon around the Monsoon Onset. Journal of Climate 20(15):4014-4032.
- Taylor CM, Belušić D, Guichard F, Parker DJ, Vischel T, Bock O, Harris PP, Janicot S, Klein C, Panthou G (2017). Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. Nature 544(7651):475-478.
- Tettey M Oduro FT Adedia D Abaye DA (2017). Markov chain analysis of the rainfall patterns of five geographical locations in the south eastern coast of Ghana. Earth Perspectives 4(1):1-11.
- Thirriot C (1986). Simplicité et efficacité des chaînes de Markov comme modèle de la pluviométrie. Arch Hydrotherapy 23:1-2.
- Todorovic P Woolhiser DA (1975). A Stochastic Model of n Day Precipitation. Journal of Applied Meteorology 14:17-24.
- Wu MLC Reale O Schubert SD (2013). A characterization of African easterly waves on 2.5-6 day and 6-9 day time scales. Journal of Climate 26(18):6750-6774.
- Yoo C, Lee J, Ro Y (2016). Markov Chain Decomposition of Monthly Rainfall into Daily Rainfall: Evaluation of Climate Change Impact. Advances in Meteorology, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7957490>.

APPENDIX

Table 1. MK test results for different West African sub-domains.

Variable	p-Values			
	Western Sahel	Central Sahel	Sudanian Zone	Guinea Coast
P_W	0.00005	0.00008	0.9350	0.3822
P_D	0.00005	0.00008	0.9350	0.3822
P_{WW}	0.2041	0.6001	0.3822	0.6664
P_{WD}	0.2041	0.6001	0.3822	0.6664
P_{DD}	0.00007	0.00000	0.0747	0.2393
P_{DW}	0.00007	0.00000	0.0747	0.2393
P_{3W}	0.3453	0.5681	0.6664	1
P_{5W}	0.1880	0.8980	0.4773	0.6001
P_{7W}	0.0911	0.8067	0.2041	0.4629
P_{10W}	0.0192	0.8613	0.0747	0.3335
P_{3D}	0.0231	0.2998	0.0826	0.0747
P_{5D}	0.0019	0.00001	0.0546	0.3335
P_{7D}	0.0019	0.00000	0.0575	0.3453
P_{10D}	0.0015	0.00000	0.0490	0.3108

Values in bold are statistically significant at the 95% confidence level.

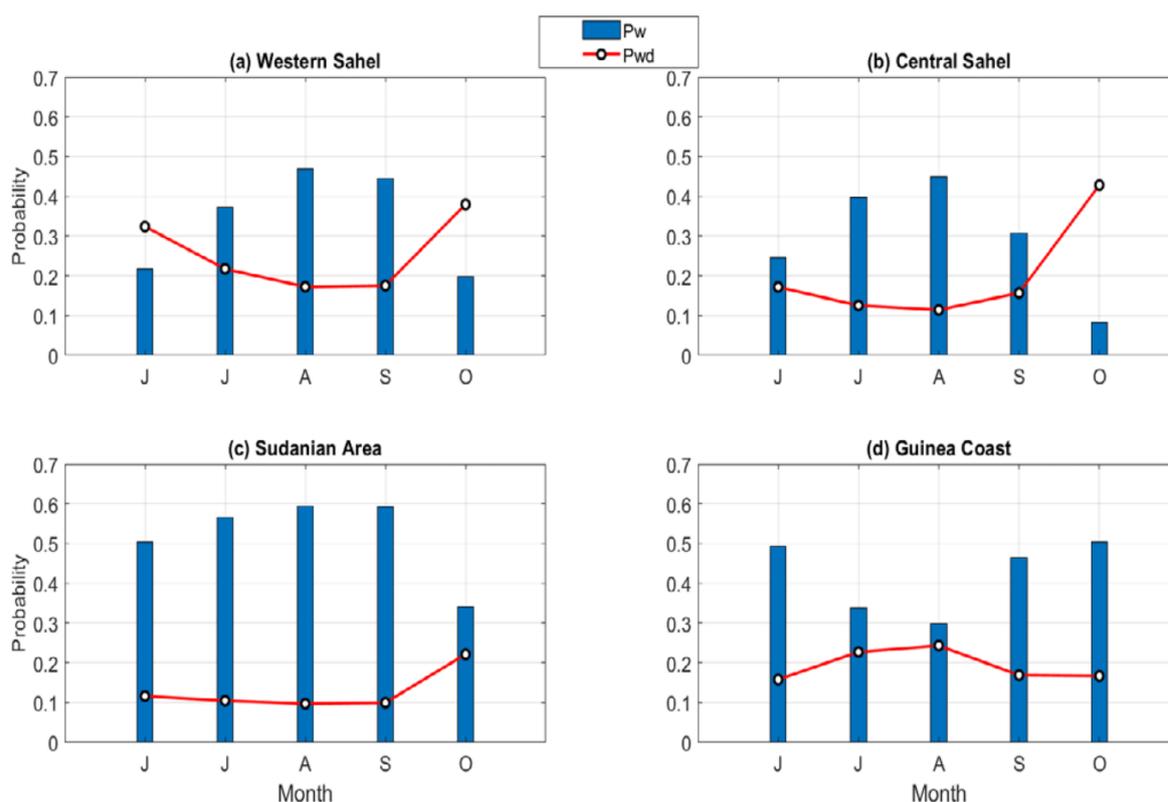


Figure 1. Seasonal cycle of the transitional probabilities (curve; P_{WD}) and the probability of dry days (histogram; P_W) for the selected sub-domains.

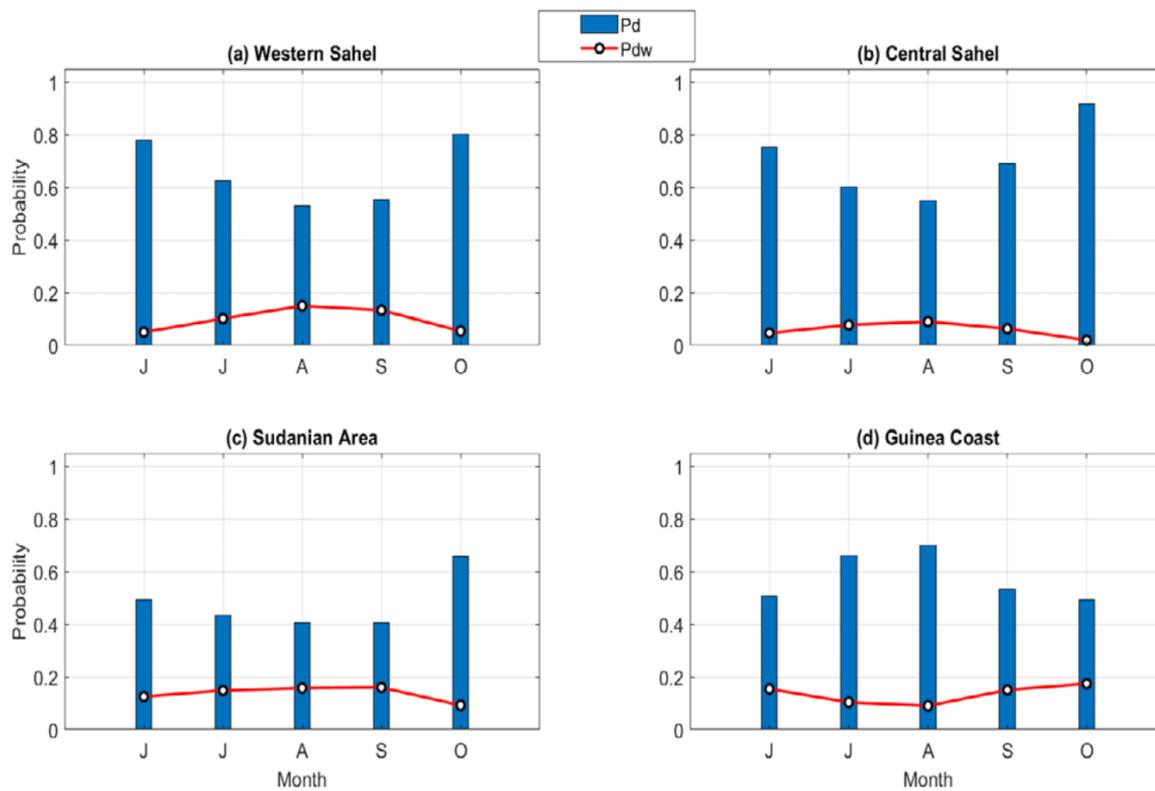


Figure 2. Seasonal cycle of the transitional probabilities (curve; P_{Dw}) and the probability of dry days (histogram; P_D) for the selected sub-domains.

Chapitre 4

Variabilité synoptique associée aux séquences sèches et humides au Sahel Ouest

Sommaire

4.1	Résumé étendu de l'article Basse et al. (2021b).....	57
4.2	Article Basse et al. (2021b).....	60

Ce chapitre est présenté sous la forme d'un article qui a été publié dans la revue indexée "**Theoretical and Applied Climatology**". L'objectif principal est de diagnostiquer les différences dans les structures verticales et horizontales de la circulation du vent atmosphérique et sa variation diurne entre les périodes sèches et humides en Afrique de l'Ouest. Dans cet article, les profils verticaux du vent zonal et de la vitesse verticale (oméga) pendant les séquences sèches et humides ont été d'abord analysés. Ensuite les caractéristiques spatiales des variables et phénomènes synoptiques d'intérêt (vents zonaux, hauteur géopotentielle, ondes d'est africaines (OEA), humidité relative) pendant les séquences sèches et humides ont été étudiées. La dernière étape est consacrée à la variation diurne des vents zonaux et de l'activité des OEA pendant les séquences sèches et humides. Les OEA de 3 à 5 jours sont caractérisées par la variance du vent méridional à 700 hPa filtrée entre 3 et 5 jours.

4.1 Résumé étendu de l'article Basse et al. (2021b)

Les précipitations de la mousson de l'Afrique de l'Ouest (MAO) présentent une variabilité intrasaisonnière avec des impulsions quasi-périodiques de cycles actifs (périodes humides) et de pauses (périodes sèches). En réponse aux activités convectives actives et aux pauses, les caractéristiques météorologiques, y compris les régimes de vent, changent également au cours de ces périodes. La MAO est une circulation à grande échelle caractérisée par une inversion saisonnière des vents due principalement au contraste de température entre la terre et la mer (Sylla et al. 2010). Les ondes d'est africaines (OEA) et les jets troposphériques, tels que le jet d'est africain (JEA) situé dans les couches moyennes (autour de 700 hPa) et le jet d'est tropical (JET) situé dans les hautes couches (autour de 200 hPa) font partie des systèmes modulant les précipitations journalières dans la région. Plusieurs travaux se sont concentrés sur la variabilité des précipitations de la MAO pendant les années humides et sèches en étudiant les caractéristiques atmosphériques pendant ces périodes contrastées. Cependant, peu d'études portant sur la variabilité intrasaisonnière de la circulation atmosphérique de la MAO pendant les séquences sèches et humides existent dans la littérature. Récemment, Osei et al. (2021) ont caractérisé les séquences sèches et humides, ainsi que la circulation atmosphérique associée dans un bassin versant du Ghana (pays d'Afrique de l'Ouest). Ces auteurs ont constaté que l'occurrence des séquences humides est favorisée par une circulation anticyclonique dans les moyennes couches couplée à des vents de sud à basse altitude de Juin à Août.

Chapitre 4 : Variabilité synoptique associée aux séquences sèches et humides au Sahel Ouest

La présente étude vise à comprendre la variabilité synoptique associée aux séquences sèches et humides, avec un accent particulier sur la circulation du vent et les conditions thermodynamiques pendant la période estivale (Juillet à Septembre) en Afrique de l'Ouest. Nous avons utilisé deux ensembles de données : les données de précipitations CHIRPS décrites par Funk et al. (2014), avec une résolution spatiale de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Ces données pluviométriques ont été validées avec succès à l'aide de diverses données d'observation pluviométrique (Badr et al., 2016 ; Herold et al., 2017 ; Bichet and Diedhiou, 2018). Ces données sont utilisées pour détecter les périodes humides et sèches. Les données de réanalyses Era-Interim ayant une résolution spatiale de $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ (Simmons et al., 2007 ; Uppala et al., 2008) sont principalement utilisées pour étudier les conditions dynamiques et thermodynamiques (vent, hauteur géopotentielle, humidité relative) associées à ces séquences sèches et humides sur la période 1988-2010 à différents réseaux horaires (00:00, 06:00, 12:00 et 18:00). La méthode d'identification des séquences sèches et humides est bien décrite dans le chapitre 2.

L'analyse du vent zonal montre un flux de mousson plus fort au nord du Sahel et dans la région de Guinée pendant les séquences humides que pendant les périodes sèches; coïncidant ainsi avec un JEA plus faible (plus fort) et déplacé vers le nord (vers le sud) pendant les séquences humides (sèches). Ce renforcement de la mousson est cohérent avec l'intensification de la DTS observée pendant les séquences humides. L'analyse des vitesses verticales montre également une intensification du noyau ascendant localisé au Sud associé à la convection profonde pendant les séquences humides. Dans les hautes couches, l'intensité du JET est plus forte (plus faible) pendant les séquences humides (sèches). L'analyse a également montré que l'activité des OEA et l'humidité relative sont plus fortes pendant les séquences humides que pendant les séquences sèches ; ce qui suggère que le flux de mousson apporte suffisamment d'humidité pour favoriser l'activité convective pendant les séquences humides. Cette constatation est cohérente avec l'affaiblissement de la hauteur géopotentielle à basse altitude pendant les séquences humides sur la région du Sahel.

L'analyse de l'évolution diurne montre que le flux de mousson s'intensifie fortement pendant la nuit et atteint sa valeur maximale à 06:00 pendant les deux périodes. En considérant la différence entre les périodes, le flux de mousson est plus fort (plus faible) sur le Golfe de Guinée et le nord du Sahel pour toutes les heures synoptiques pendant les séquences humides (sèches). Dans les moyennes couches, le JEA diminue fortement au Sahel à 18:00 et 00:00 durant les deux périodes. Ce jet est plus fort et se dirige vers le sud pendant les séquences sèches. Quant

Chapitre 4 : Variabilité synoptique associée aux séquences sèches et humides au Sahel Ouest

au JET, son intensité augmente pendant la nuit et atteint son maximum à 00:00 pendant les deux périodes. Cependant, l'amplitude du jet dans les hautes couches est plus forte pendant les séquences humides que pendant les périodes sèches, surtout à 00:00 et à 12:00. L'analyse de l'activité des OEA de 3 à 5 jours montre une activité plus forte sur le Sahel Ouest à 00:00 pendant les deux périodes, mais plus marquée pendant les séquences humides.

4.2 Article Basse et al. (2021b)

Synoptic variability associated with wet and dry spells in the Western Sahel

Jules Basse¹, Hamady N. Sabaly¹, Ibrahima Diba¹, Alioune B. Sarr¹, Moctar Camara^{1*}, and Arona Diedhiou²

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

²Université Grenoble Alpes, IRD, CNRS, Grenoble INP, IGE, F-38000 Grenoble, France

*Corresponding author: Moctar Camara

Email: mocamara@zig-univ.sn

Article publié dans "Theoretical and Applied Climatology"

Le 21 Septembre 2021

Volume 146, Issue 3-4, p.1019-1029, July-September, 2021

<https://doi.org/10.1007/s00704-021-03774-y>



Synoptic variability associated with wet and dry spells in the Western Sahel

Jules Basse¹ · Hamady N. Sabaly¹ · Ibrahima Diba¹ · Alioune Badara Sarr¹ · Moctar Camara¹ · Arona Diedhiou²

Received: 2 October 2020 / Accepted: 6 September 2021
© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH Austria, part of Springer Nature 2021

Abstract

Differences in vertical and horizontal structures of the atmospheric wind circulation and its diurnal variation between wet and dry spells over West Africa are studied. CHIRPS products are used to detect the wet and dry spells and Era-Interim reanalysis data to characterize the synoptic conditions during wet and dry spells. The analysis of the zonal wind shows a stronger monsoon flux over the Northern Sahel and the Guinea region during wet spells than that during dry spells, which coincides with a weaker (stronger) and northward (southward) displaced African easterly jet (AEJ) during wet (dry) spells. This strengthening of the monsoon is consistent with the intensification of the Saharan heat low (SHL) observed during wet spells. The vertical velocity analysis also shows an intensification of the southern updraft core associated with deep convection during wet spells than during dry spells. At higher levels, the TEJ intensity is stronger (weaker) during wet (dry) spells. The analysis also showed that the activity of the African easterly waves (AEWs) and the relative humidity are stronger during wet spells than those during dry spells, suggesting that the monsoon flux brings enough moisture to promote the convective activity during wet sequences. This finding is consistent with the weakening of the low-level geopotential height during wet spells over the Sahel region. The diurnal variation analysis shows that the monsoon flux magnitude strongly intensifies during the nighttime and reaches its maximum value at 06:00 during both spells. When considering the difference between the spells, the monsoon flow is stronger (weaker) over the Gulf of Guinea and the Northern Sahel for all synoptic hours during wet (dry) spells. At mid-levels, the AEJ strongly decreases over the Sahel region at 18:00 and 00:00 in both spells. This jet is stronger and southward during dry spells. As for the TEJ, its intensity increases during nighttime and reaches its maximum at 00:00 during both periods. However, the upper levels' jet magnitude is stronger during wet spells than that during dry spells, especially at 00:00 and 12:00. The analysis of the activity of 3–5-day AEWs shows a more vigorous activity over the Western Sahel at 00:00 during both spells, especially during wet spells.

Keywords West Africa · Summer monsoon · Wet spells · Dry spells

1 Introduction

The West African Summer Monsoon (WASM) rainfall shows an intra-seasonal variability with quasi-periodic pulses of active cycles (wet spells) and breaks (dry spells). In response to active and break convective activities, meteorological features, including the wind patterns,

also change during these periods. The WASM is a large-scale circulation characterized by a seasonal inversion of winds due mainly to the temperature contrast between land and sea (Sylla et al. 2010). Some precipitation-producing systems included in this circulation are the African easterly waves (AEWs) and the tropospheric jets, such as the African easterly jet (AEJ) located in the mid-levels (around 700 hPa) and the tropical easterly jet (TEJ) located around 200 hPa. Previous studies have mainly focused on the variability of the WASM precipitation in wet and dry years. For example, Jenkins et al. (2005) and Nicholson (2008) found that a more AEJ equator-oriented position often corresponds to drought conditions over the Sahel, while a strong TEJ often leads to a wetter climate. A modeling study of Sylla et al. (2010) showed

✉ Moctar Camara
mocamara@univ-zig.sn

¹ Laboratoire d'Océanographie, Des Sciences de L'Environnement Et du Climat (LOSEC), Université Assane SECK de Ziguinchor, BP 523, Ziguinchor, Senegal

² Université Grenoble Alpes, IRD, CNRS, Grenoble INP, IGE, 38000 Grenoble, France

that AEWs exhibit less activity, while the TEJ becomes weaker and the AEJ is stronger and migrates southward during dry years. Nicholson and Grist (2001) also showed that the AEJ is located northward in the Sahel region (West African region lying between 11 and 18° N) during wet years. They concluded that the latitudinal position of the AEJ influences Sahel rainfall more than its intensity. Akinsanola and Zhou (2020) found that the atmospheric circulation controlling the WASM exhibits a contrast between these years and confirmed previous works. A weaker (stronger) AEJ (TEJ) is observed during the wet years. Besides, Okoro et al. (2018) found that the geopotential height at 700 hPa has predominantly positive (negative) anomalies in dry (wet) years.

These previous studies focused mainly on the atmospheric characteristics during dry and wet years. Few studies focusing on the intra-seasonal variability of the atmospheric circulation of the WASM during wet and dry spells exist in the literature.

Efon et al. (2016) studied the cloud properties during active and break periods in West Africa and reveal that upper-air clouds are more prevalent during breaks than those during active periods. Besides, the active periods have a lower ice concentration than the break periods. They also observed that the cloud liquid water has more radiative forcing during active periods than during break periods, while ice-phase clouds provide more cooling effects during break periods. Recently, Osei et al. (2021) characterized wet and dry spells and the associated atmospheric circulation at a catchment in Ghana (West African country) and found that the occurrence of wet spells is favored by an anticyclonic circulation at mid-levels coupled with low-level southerlies during the June–July–August period.

In other regions like in southeast India, Mohan and Rao (2012) found considerable differences in temperature and moisture fields at the surface between wet and dry spells. They also found significant variability in the atmospheric boundary layer (ABL) line heights, level of condensation and neutral buoyancy, and the potential convective energy available between the wet and dry spells. Their studies also indicate that the thermal structure, the available energy, and their forcing differ from a sequence to another one. Mohan and Rao (2016) in their study on the atmospheric dynamics over southeast India showed a significant difference in the zonal wind between wet and dry sequences in the lower-level jet (LLJ) at 850 hPa. Strong winds are found during dry sequences and low winds during wet sequences over southeast India. According to the same authors, the longitudinal extension of the TEJ (at 200 hPa) is larger during the dry episodes than that during the wet episodes.

Therefore, the present study aims to understand the synoptic variability associated with dry and wet spells, with a particular emphasis on wind circulation and thermodynamic conditions during the summer period (July to September) in West Africa. Data and methods used in this study are described in Sect. 2. The spatial and diurnal variations of synoptic variables during wet and dry spells are discussed in Sect. 3. Section 4 is dedicated to the conclusion and the perspectives.

2 Data and methods

This study focuses on the differences in the wind circulation between wet and dry episodes of the West African monsoon circulation, during the summer season (from July to September). We used two sets of data: the rainfall data from the Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS) described by Funk et al. (2014), with a spatial resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. They are built from a combination of satellite observations and in situ station data. CHIRPS data aimed to support the Famine Early Warning Systems Network of the United States Agency for International Development (FEWS NET). CHIRPS rainfall data was successfully validated using various rainfall observation data (Badr et al. 2016; Herold et al. 2017; Bichet and Diedhiou 2018). The results also show a good performance in drought monitoring. These data are used to detect wet and dry spells.

The Era-Interim reanalysis data (wind, geopotential height, humidity) with a spatial resolution of $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ is mainly used to study the dynamic and thermodynamic conditions associated with these wet and dry spells from 1988 to 2010 at 00:00, 06:00, 12:00, and 18:00 (Simmons et al. 2007; Uppala et al. 2008).

Wet and dry spells are detected using the methodology extensively described in Mohan and Rao (2012, 2016). Figure 1 shows the mean summer rainfall over the Western Sahel during the period 1988–2010 (Fig. 1a) and the seasonal cycle of the summer rainfall averaged over the Western Sahel during a particular year (1996) with the cyan bars representing the daily rainfall (R) for 1996. The black solid line refers to the variation of climatological average rainfall in the period 1988–2010 over the western Sahel, while the blue (red) solid line represents $clim + \sigma$ ($clim - \sigma$) where $clim$ is the daily climatological mean rainfall in the period 1988–2010 and σ is the standard deviation (Fig. 1b). Dry and wet days are defined as follows:

Chapitre 4 : Variabilité synoptique associée aux séquences sèches et humides au Sahel Ouest

Synoptic variability associated with wet and dry spells in the Western Sahel

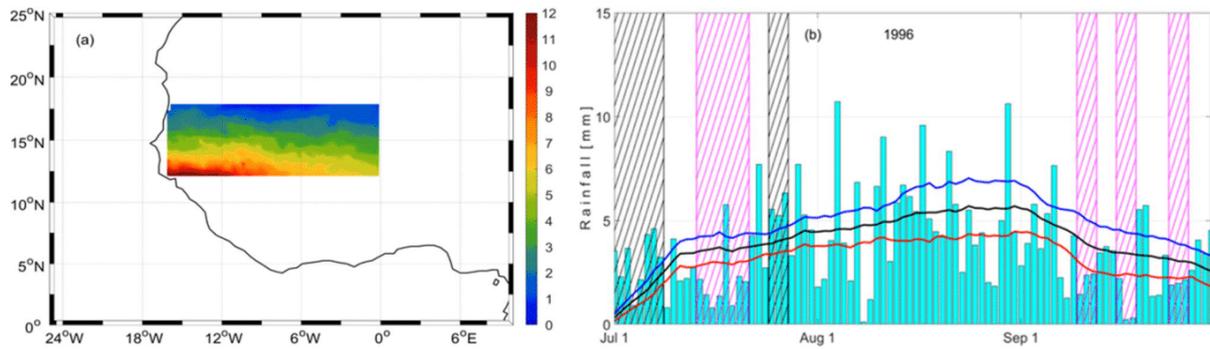


Fig. 1 **a** Mean summer rainfall over the Western Sahel and **b** seasonal cycle of the summer rainfall averaged over the Western Sahel during a particular year (1996): the cyan bars represent the daily average rainfall, while the hatched magenta and black bars represent the

dry and wet spells, respectively. The black solid line refers to the variation of climatological average rainfall (*clim*) in the 1988–2010 period, while the blue (red) solid line represents $clim + \sigma$ ($clim - \sigma$), respectively. σ is the standard deviation

If $R \geq clim + \sigma$, then we have a wet day.

If $R < clim - \sigma$, then we detected a dry day.

Wet (dry) spells are sequences of consecutive wet (dry) days that last at least 3 days.

Finally, for each year, wet and dry spells are identified and atmospheric conditions are averaged over all wet (dry) sequences that occurred from 1988 to 2010 to construct the composite of wet (dry) spells.

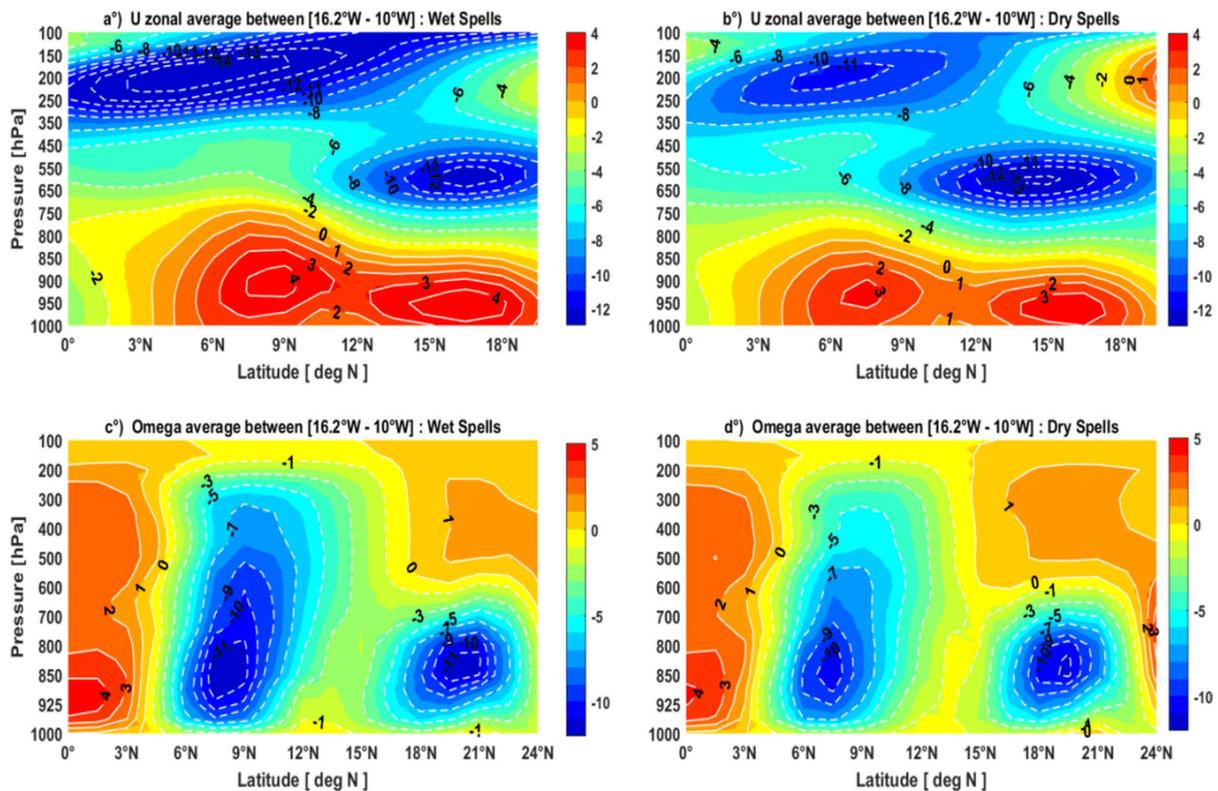


Fig. 2 Vertical cross section of the mean summer (JAS) zonal wind and vertical wind (omega) averaged between 16.2°W and 10°W during wet (**a**, **c**) and dry (**b**, **d**) spells. Units are m.s for the zonal wind and Pa.s (*100) for omega

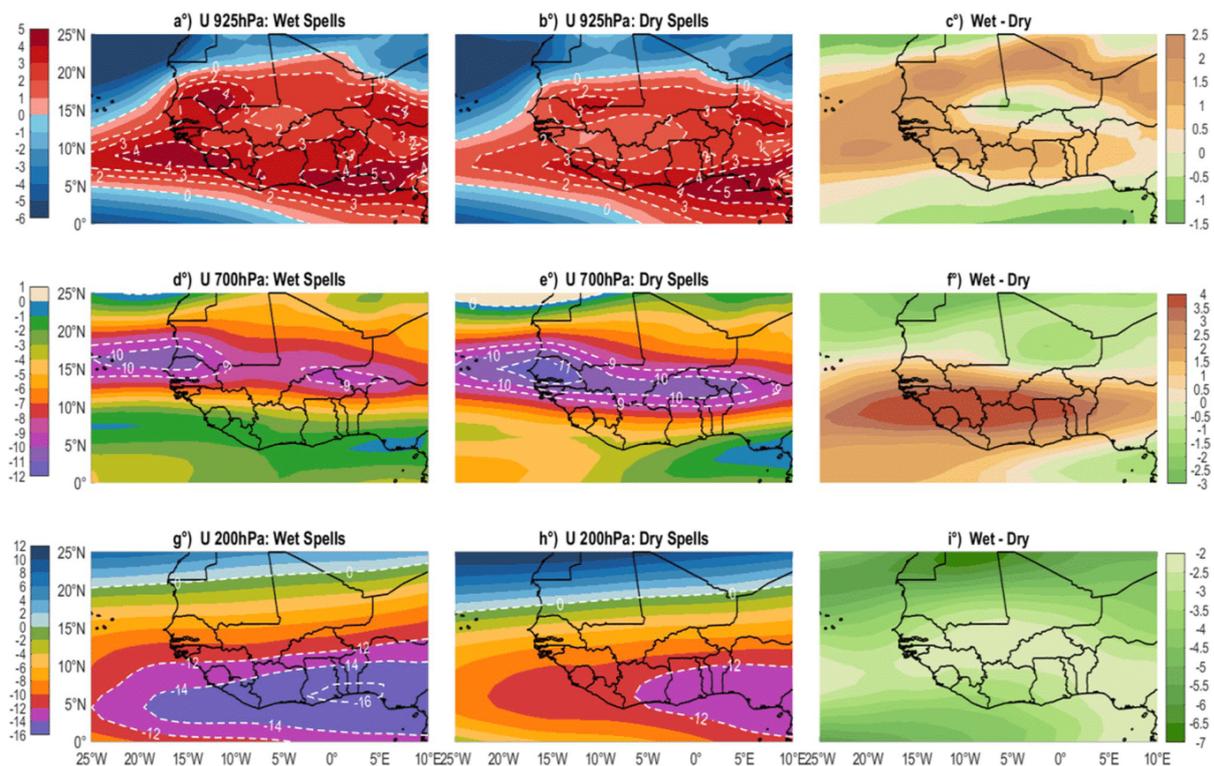


Fig. 3 Spatial distribution of the mean summer (JAS) zonal wind at 925 hPa (top panels), at 700 hPa (middle panels), and at 200 hPa (bottom panels) for wet spells (a, d, g), dry spells (b, e, h), and the difference between the spells (c, f, i)

3 Results and discussion

3.1 Vertical profiles of the mean wind circulation during wet and dry spells

The intra-seasonal variability of wind circulation is analyzed in the aim to provide some answers on the large-scale differences associated with wet and dry spells. This study examines the vertical structures of the zonal wind (low-level monsoon wind, mid-level AEJ, and upper-level TEJ) and the vertical velocity. The LLJ, commonly called the monsoon flux, is a southwesterly flow that extends between 2 and 20° N from 1000 to 800 hPa and brings humidity in West Africa during the boreal summer (Diallo et al. 2010). At mid-levels, the AEJ, a regional-scale jet, is present between 500 and 700 hPa with a maximum speed of 15 m/s located around 15° N over the Sahel. At the upper levels, the TEJ is a jet that settles in the boreal summer in the upper troposphere at 200 hPa around 7° N. The dynamic structures presented in this paragraph cover the JAS season which corresponds to the peak of the WASM rainfall averaged in the period 1988–2010.

Figure 2a and b show that the characteristics of the West African monsoon main wind axis (monsoon flow, AEJ, and

TEJ) are visible during both spells. Two maxima of the LLJ are observed. The first maximum is located between 6 and 10° N (over Guinea Coast) and the second maximum lies between 15 and 18° N (over the Sahel). However, there are differences in the intensity and extension of the wind fields between both spells. The LLJ is higher during wet spells (4 m s^{-1}) than that during dry spells (3 m s^{-1}). The presence of the second maximum (i.e., 4 m s^{-1}) in the Sahel during wet spells corresponds to the northward migration of the monsoon flow. In the middle layers, a more northward position of the AEJ is observed during wet periods. Besides, the AEJ intensity is greater during the dry spells (13 m s^{-1}). The jet is located in the same latitude as in wet spells. The weakening and northward shift of the AEJ are crucial for an increased monsoon flow over the Sahel region (Akinsanola and Zhou, 2020).

When considering the upper levels, the intensity of the TEJ is stronger during the wet spells (up to 13 m s^{-1}) than that during the dry spells between 6 and 9° N. These characteristics are similar to those diagnosed by Grist and Nicholson (2001) and Kanamitsu and Krishnamurti (1978) during wet and dry years.

Figure 2c and d depict the vertical cross section of the mean JAS vertical velocity for the wet and dry spells. Two

Chapitre 4 : Variabilité synoptique associée aux séquences sèches et humides au Sahel Ouest

Synoptic variability associated with wet and dry spells in the Western Sahel

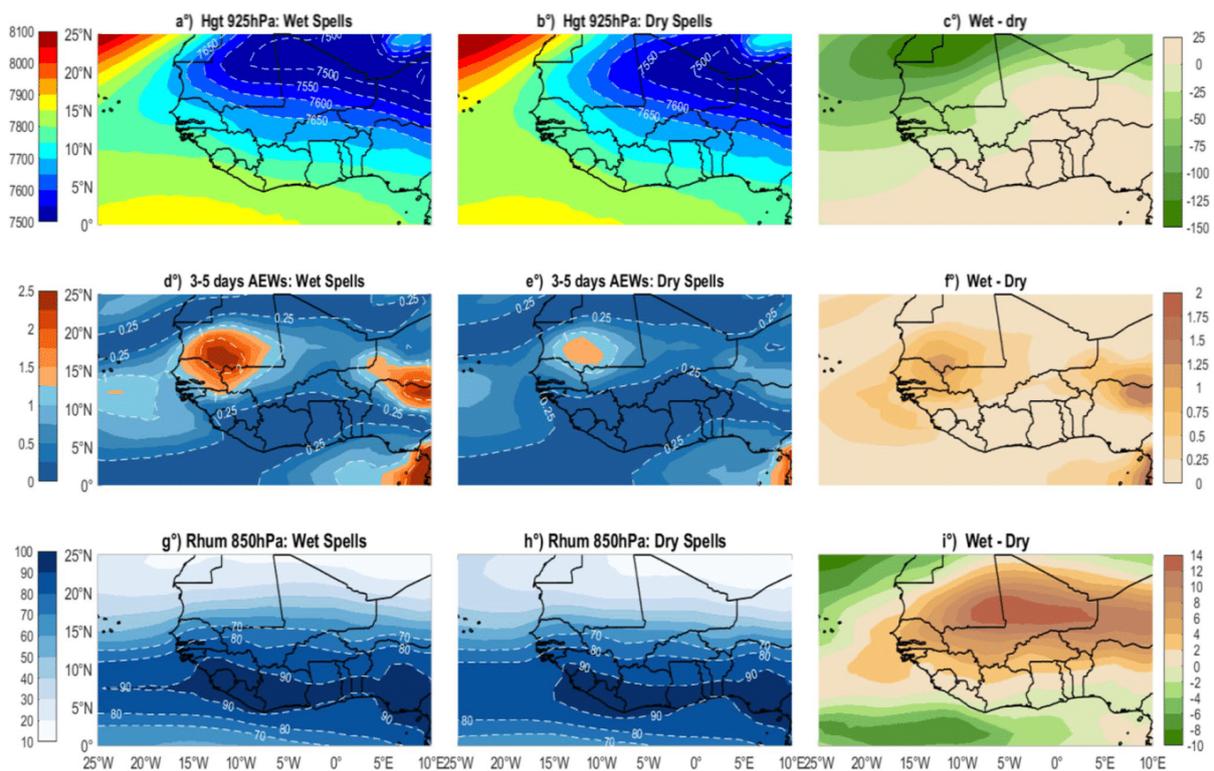


Fig. 4 Spatial distribution of the summer mean (JAS) geopotential height (top panels), the activity of 3–5-day AEWs (middle panels), and the relative humidity (bottom panels) for wet spells (**a, d, g**), dry spells (**b, e, h**), and the difference between the spells (**c, f, i**)

regions of upward movement are present during both spells. The first region of upward movement is observed between 6 and 9° N (in the Gulf of Guinea) and the second one is found in the North of the Sahel between 18 and 22° N. According to Raj et al. (2018), the first zone of upward movement located in the Guinea region is linked to the wet convection on the monsoon rain band, while the second zone is linked to dry convection on the Sahara heat low (SHL). The Saharan heat low is among the main drivers of the West African monsoon precipitation (Sultan and Janicot, 2003; Lavaysse et al. 2009) in the Sahel region during boreal summer. An intensification of the SHL tends to strengthen the monsoon flow and the probability of occurrence of moist convection (Parker et al. 2005). When comparing both spells, it appears that the Saharan heat low is stronger during the wet spells. Moreover, the core of the Guinea upward movement is higher during wet periods at the middle and upper levels.

3.2 Spatial characteristics of synoptic variables during wet and dry spells

This section discusses the spatial structures of low to upper levels of the atmospheric features associated with dry and

wet spells. Composites of zonal wind at different levels during wet and dry spells and the difference between both periods are then estimated to focus on monsoon flow, the AEJ, and the TEJ spatial characteristics (Fig. 3). Figure 3a–c show the mean zonal wind during wet spells and dry spells and the difference between these two periods at the lower level (at 925 hPa). The two regions of the maximum of the monsoon flow (i.e., Sahel and Guinea Coast) are visible in both spells. However, the core of the monsoon flow is located more northerly during wet spells. The difference between both periods is presented in Fig. 3c. A band of large positive wind anomaly is observed over the Western and Northern Sahel, and over Guinea Coast. This significant wind anomaly is mainly due to the presence of a stronger monsoon flow during wet spells over these zones. This northward propagation of the monsoon flux over the Sahel region may bring the necessary humidity for the development of deep convection and then a rainfall increase.

Figure 3d–f represent the spatial variation of the mean zonal wind at 700 hPa during both spells and the difference between them. During both spells, the AEJ is located over the Sahelian region. The longitudinal extension of the AEJ during dry spells (Fig. 3e) appears to be greater than that

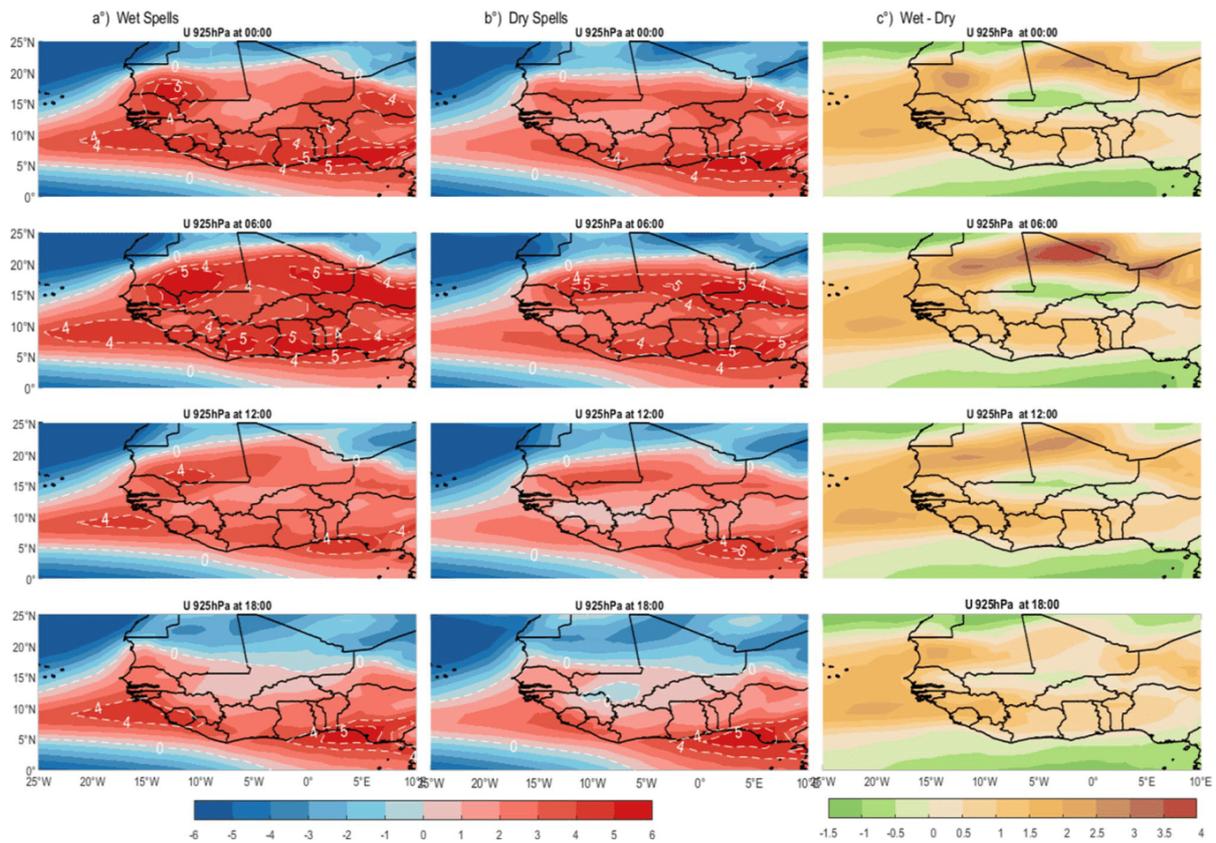


Fig. 5 The spatial variation of the mean summer (JAS) zonal wind at 925 hPa during wet spells (a), dry spells (b), and the difference between the spells (c) at 00:00, 06:00, 12:00, and 18:00

of wet spells (Fig. 3d). For example, the contour of 9 m s^{-1} extends between 24° W and 10° E during dry spells, while it is split into two branches during the wet period. Moreover, this jet is located more southerly during dry spells over the continent. The difference between the spells (Fig. 3f) shows a band of strong positive anomalies (i.e., stronger winds during dry spells) south of 15° N and a band of negative anomalies (i.e., weaker winds during wet spells) north of 15° N . This suggests that the AEJ intensity is overall weaker during wet periods in the Sahel region. Wet (dry) spells are associated with an increased (decreased) speed and southward (northward) migration of the AEJ as in wet (dry) years, respectively (Akinsanola and Zhou, 2020; Grist and Nicholson 2001; Sylla et al., 2010).

Figure 3g–i show the spatial variability of the mean zonal wind at 200 hPa during dry and wet spells and the difference between both periods. Strong wind intensities corresponding to the TEJ signal are obtained from the equator to 10° N (south of Sahel) during both spells, with intensity varying up to 16 m s^{-1} during wet spells. The longitudinal extension of the TEJ during wet spells is greater (Fig. 3g) than that of the

dry spells (Fig. 3h); this may be highlighted by the contours 16 m s^{-1} and 14 m s^{-1} . These contours are not observed during dry spells. The difference between the spells is represented in Fig. 3i. Negative values are located across the continent suggesting that the TEJ intensity is stronger during wet periods. The strong intensity of the TEJ may favor a rainfall increase over the Sahel region during wet spells. These characteristics diagnosed for the monsoon flow, the AEJ, and the TEJ are similar to those observed by Grist and Nicholson (2001) when comparing dry and wet years in the Sahel.

Figure 4a–c show the mean geopotential height at 925 hPa during wet spells (Fig. 4a), dry spells (Fig. 4b), and the difference in both spells (Fig. 4c). During both spells, lower values of geopotential height are observed in the Sahelian band. The difference between the spells is illustrated in Fig. 4c. Strong negative geopotential values (up to -150%) are observed over the Western and Northern Sahel (i.e., lower pressure during wet spells than during dry spells), suggesting that the atmosphere is more unstable during the wet periods. Our results are consistent with those of

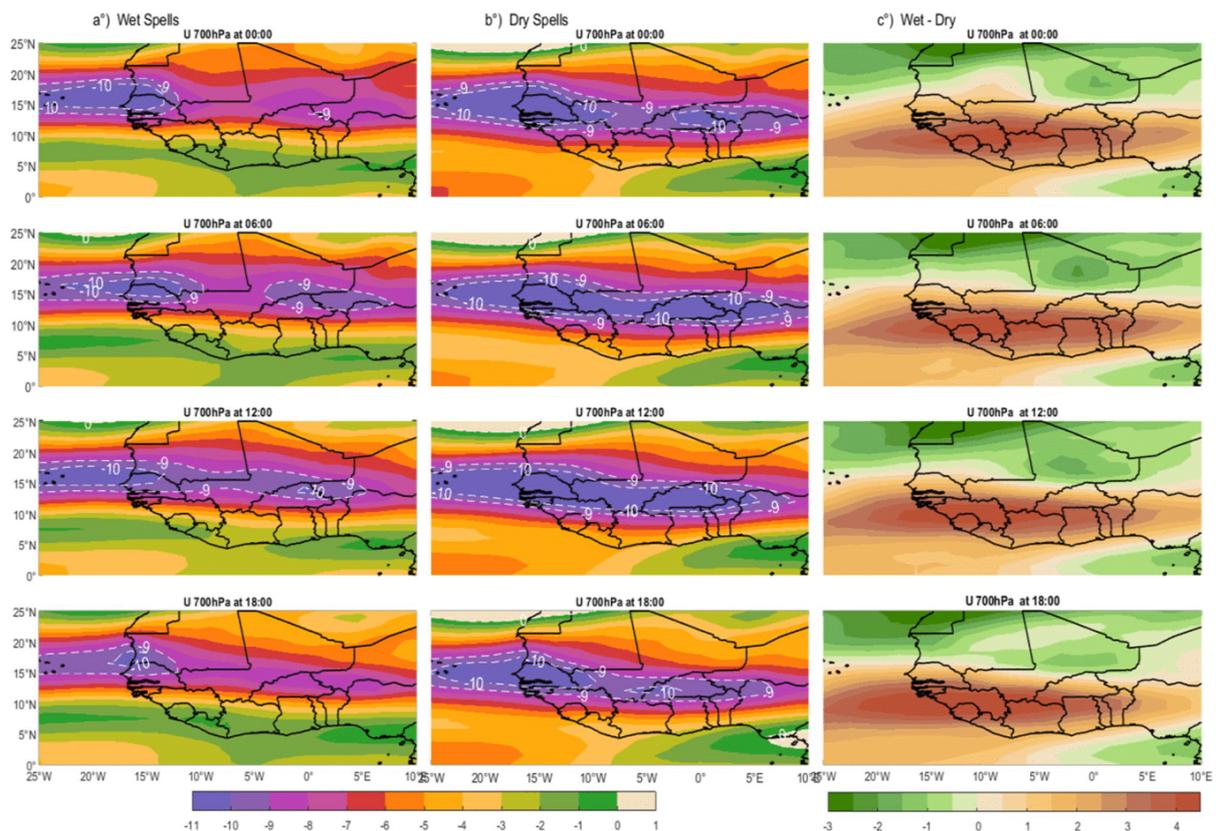


Fig. 6 Same as Fig. 5, but for the zonal wind at 700 hPa

Okoro et al. (2018). These authors showed that the 700-hPa geopotential height exhibits positive (negative) anomalies during dry (wet) years.

The spatial variability of the activity of 3 to 5 days of African easterly waves characterized by the variance of the meridional wind at 700 hPa filtered between 3 and 5 days is shown in Fig. 4 for wet spells (Fig. 4d), dry spells (Fig. 4e), and the difference between both spells (Fig. 4f). According to Diedhiou et al (1999), Thorncroft and Hodges (2001) and Grist et al. (2002), these waves are indispensable factors of climatic variability in West Africa during the rainy season. Strong AEW activity is observed north of the ITCZ between 12 and 15° N (over the Sahel) region, and a weaker signal is located over Guinea Coast during both spells. Nevertheless, there are remarkable differences between the spells. Figure 4i shows that the activity of the African easterly wave is stronger during wet periods across the continent, mainly in the Sahelian regions. These results are similar to those diagnosed by Grist et al. (2002) during wet and dry years.

The relative humidity at the low levels (850 hPa) is presented in Fig. 4g–i for wet spells, dry spells, and the difference between the spells, respectively. We observed a strong relative humidity over Guinea Coast between the latitudes 5 and 10° N during both spells. In this latitudinal band, the highest values are recorded with more than 90%. The difference between the spells (Fig. 4i) is stronger in the Sahel region. The relative humidity increases (decreases) during wet (dry) spells, especially in the north-center part of that region. The increase of the relative humidity may favor the occurrence of stronger rainfall over the Sahel during wet spells than dry sequences.

3.3 Diurnal variation of wind circulation and the activity of AEWs

To study the diurnal variation of the monsoon flux, the AEJ, the TEJ, and the AEWs between wet and dry spells, we calculated the zonal wind and the variance of the 700-hPa meridional wind filtered between 3 and 5 days at four synoptic hours (00:00, 06:00, 12:00, and 18:00),

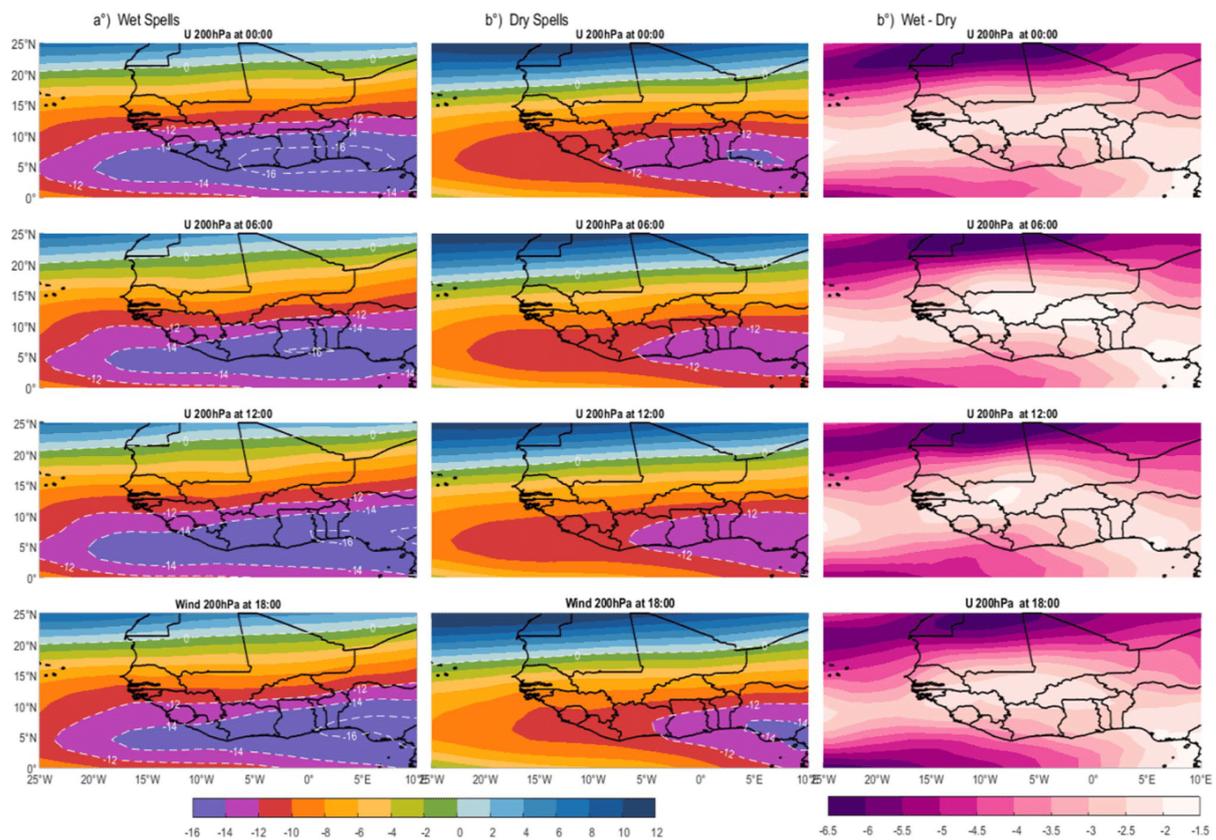


Fig. 7 Same as Fig. 5, but for the zonal wind at 200 hPa

using data from the Era-Interim reanalysis. Figure 5 shows the spatial and diurnal variations of the zonal wind at 925 hPa during the wet spells (Fig. 5a) and the difference between wet and dry spells (Fig. 5b). The strongest wind intensities are observed at 06:00 and the low wind values at 18:00 during wet spells suggesting that the monsoon flow peaks early in the morning. The difference between wet spells and dry spells shows that the intensity of the monsoon flow is greater during the wet spells than that during the dry spells for all synoptic hours (Fig. 5b).

Figure 6 represents the diurnal variability of the zonal wind at 700 hPa during the wet spells (Fig. 6a) and the difference between wet and dry spells (Fig. 6b). A strengthening of the AEJ is observed at 12:00 compared to that at the other synoptic hours in the Sahel region. The difference between the spells (Fig. 6b) reveals that the AEJ is weak (strong) south (north) of 15° N during wet spells for all synoptic hours.

Figure 7 shows the spatial and diurnal variations of the zonal wind at 200 hPa during the wet spells (Fig. 7a) and the difference between wet and dry spells (Fig. 7b). A strengthening of the TEJ is observed at 00:00 in Guinea Coast. For example, the longitudinal extension of the contour 16 m s⁻¹ is much larger at 00:00 compared to that at other synoptic hours. When compared to dry sequences, the intensity of the TEJ is stronger during wet spells for all synoptic hours.

The last part of this analysis focuses on the diurnal study of the African easterly wave characteristics. Figure 8 shows the diurnal variation of the activity of 3–5-day AEWs during wet spells (Fig. 8a), dry spells (Fig. 8b), and the difference between wet and dry spells (Fig. 8c). A strong activity of the African easterly waves is observed at 00:00 and a weak signature of these synoptic disturbances at 12:00 over the Sahel during both spells (Fig. 8a, b). The activity of the AEWs is stronger during wet spells for all synoptic hours, especially at 00:00 over the Western Sahel (Fig. 8c). The weaker activity of the AEWs during dry spells is consistent with the study of

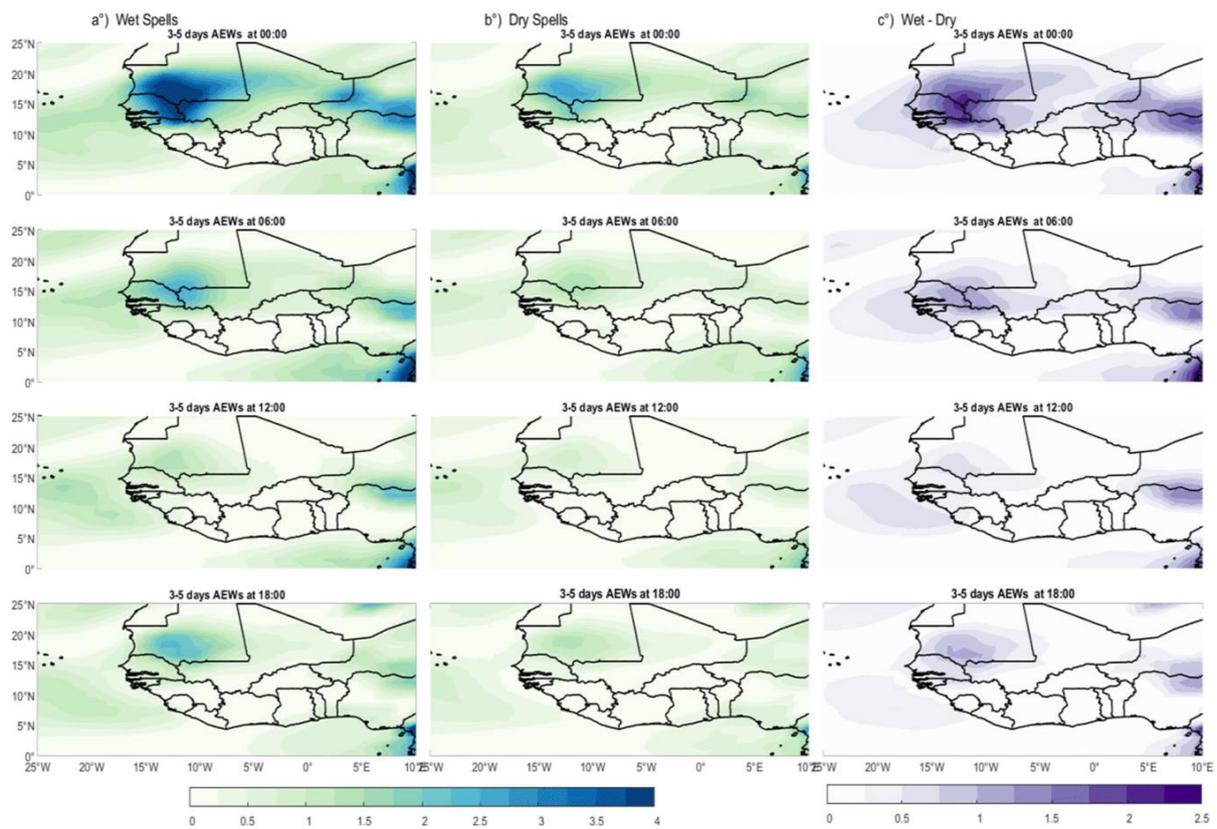


Fig. 8 The spatial and diurnal variations of the variance of the meridional wind at 700 hPa filtered between 3 and 5 days for wet spells (a), dry spells (b), and the difference between wet and dry spells (c) at 00:00, 06:00, 12:00, and 18:00

Sylla et al. (2010) who showed that the AEW activity decreases during dry years.

4 Conclusion and perspectives

The results of this work show a clear contrast between wet and dry spells on atmosphere circulation. In wet (dry) spells, the TEJ at 200 hPa and the lower westerly flow at 925 hPa exhibit higher (weaker) values, which coincide with weaker (stronger) and northward (south) displacement of the AEJ at 700 hPa. When considering the vertical profile of the vertical wind, it exhibits an intensification of deep convection in the Guinea region and the dry convection over the Sahel regions during wet spells. The latter suggests the presence of a deeper Saharan heat low. Lower pressure values are also observed in the Sahel region during wet spells than during dry spells, as well as stronger AEW activity. The relative humidity difference between the spells is stronger in the Sahel region during wet spells than during dry spells.

All these factors are known to be favorable for the development of deep convection and an enhancement of the rainfall.

When considering the diurnal variability, a strong monsoon flow is observed at 06:00 and low wind values at 18:00 over the Sahel and the Guinea Coast during both spells. Also, the amplitude of the intensity of the monsoon flow is stronger during wet spells. At mid-levels, an increase of the AEJ intensity is diagnosed at 12:00. When considering the difference between the spells, AEJ is weak (strong) south (north) of 15° N during wet spells for all synoptic hours. At upper levels, the highest intensity of TEJ is observed at 00:00. However, the longitudinal extension of the TEJ is larger during wet spells than that during dry spells.

The analysis of the AEW characteristics shows a strong activity at 00:00 over the Sahel regions during both spells. The stronger AEW activity is observed during wet spells. These results show that the jets' configurations as well as the AEW activity are consistent with the development of deep convection during wet spells, especially during nighttime.

The analysis of the synoptic conditions associated with these spells shows that the meteorological features

detected during wet (dry) spells are consistent with those of wet (dry) years, respectively. This may suggest that the increase in wet (dry) spells may favor the occurrence of wet (dry) years, respectively.

The causal mechanisms of the observed differences need to be further developed to better understand the variation in atmospheric circulations over West Africa during the summer monsoon. Besides, an analysis of the evolution of dry and wet spells as well as associated mechanisms should be done for the future under RCP scenarios.

Acknowledgements The authors would like to thank the Assane SECK University of Ziguinchor for its support.

Author contribution Jules Basse and Moctar Camara performed the design/conceptualization of the paper. J.B. processed the data. All the authors analyzed and discussed the results and contributed to the manuscript.

Funding The research leading to this publication is co-funded by the NERC/DFID “Future Climate for Africa” program under the AMMA-2050 project, grant number NE/M019969/1, by the IRD (Institut de Recherche pour le Développement; France) grant number “UMR IGE Imputation 252RA5,” and by the “Fond d’Impulsion de la Recherche Scientifique et Technologique (FIRST)” program of MESRI-Senegal.

Data availability Data used in this study (CHIRPS and Era-Interim reanalysis) are freely available in the Web.

Code availability We used the Matlab software.

Declarations

Ethics approval Not applicable.

Consent to participate Not applicable.

Consent for publication Not applicable.

Competing interests The authors declare no competing interests.

References

- Akinsanola AA, Zhou W (2020) Understanding the variability of West African summer monsoon rainfall: contrasting tropospheric features and monsoon index. *Atmosphere* 11:309. <https://doi.org/10.3390/atmos11030309>
- Badr HS, Dezfuli AK, Zaitchik BF, Peters-Lidard CD (2016) Regionalizing Africa: patterns of precipitation variability in observations and global climate models. *J Clim* 29:9027–9043
- Bichet A, Diedhiou A (2018) West African Sahel has become wetter during the last 30 years, but dry spells are shorter and more frequent. *Clim Res* 75:155–162
- Diallo I, Camara M, Sylla M, Gaye AT (2010) Représentation haute résolution du système de mousson ouest africain avec un modèle

- climatique régional. *Journal Des Sciences Pour L’ingénieur* 12:75–85
- Diedhiou A, Janicot S, Viltard A, De Felice P, Laurent H (1999) Easterly wave regimes and associated convection over West Africa and tropical Atlantic: results from the NCEP/NCAR and ECMWF reanalysis. *Clim Dyn* 15:795–822
- Efon E, Lenouo A, Monkam D, Manatsa D (2016) Cloud properties during active and break spells of the West African summer monsoon from Cloud Sat-CALIPSO measurements. *J Atmos Solar Terr Phys* 145(2016):1–11
- Funk CC, Peterson PJ, Landsfeld MF et al. (2014) A quasi-global precipitation time series for drought monitoring. *U.S. Geological Survey*, 832 (4). 110.3133/ds832.
- Grist JP, Nicholson SE (2001) A study of the dynamic factors influencing the rainfall variability in the West African Sahel. *Journal of Climate* 14(7):1337–1359. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014%3c1337:ASOTDF%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014%3c1337:ASOTDF%3e2.0.CO;2)
- Grist JP, Nicholson SE, Barcilon AI (2002) Easterly waves over Africa. Part II: observed and modeled contrasts between wet and dry years. *Mon Weather Rev* 130:212–225
- Herold N, Behrangi A, Alexander LV (2017) Large uncertainties in observed daily precipitation extremes over land. *J Geophys Res Atmos* 122:668–681
- Jenkins GS, Gaye AT, Sylla B (2005) Late 20th Century attribution of drying trends in the Sahel from the Regional Climate Model (RegCM3). *Geophys Res Lett* 32:L22705-GL024225
- Kanamitsu M, Krishnamurti TN (1978) Northern summer tropical circulations during drought and normal rainfall months. *Mon Wea Rev* 106:331–347. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1978\)106%3c0331:NSTCDD%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1978)106%3c0331:NSTCDD%3e2.0.CO;2)
- Lavaysse C, Flamant C, Janicot S et al (2009) Seasonal evolution of the West African heat low: a climatological perspective. *Clim Dyn* 33(2–3):313–330
- Mohan TS, Rao TN (2012) Variability of the thermal structure of the atmosphere during wet and dry spells over southeast India. *Q J R Meteorol Soc* 138:1839–1851
- Mohan TS, Rao TN (2016) Differences in the mean wind and its diurnal variation between wet and dry spells of the monsoon over southeast India. *J Geophys Res Atmos* 121:6993–7006. <https://doi.org/10.1002/2015JD024704>
- Nicholson SE, Grist JP (2001) A conceptual model for understanding rainfall variability in the West African Sahel on interannual and interdecadal timescales. *Int J Climatol* 21:1733–1757. <https://doi.org/10.1002/joc.648>
- Nicholson SE (2008) On the factor modulating the intensity of the tropical rainbelt over West Africa. *Int J Climatol*. <https://doi.org/10.1002/joc.1702>
- Okoro UK, Chen W, Nath D (2018) Recent variations in geopotential height associated with West African monsoon variability. *Meteorol Atmos Phys*. <https://doi.org/10.1007/s00703-018-0593-6>
- Osei MA, Amekudzi LK, Quansah E (2021) Characterisation of wet and dry spells and associated atmospheric dynamics at the Pra River catchment of Ghana, West Africa. *J Hydrol Reg Stud* 34:100801
- Parker DJ, Burton RR, Diongue-Niang A et al (2005) The diurnal cycle of the West African monsoon circulation. *Q J R Meteorol Soc* 131(611):2839–2860
- Raj J, Bangalath HK and Stenichikov G (2018) West African Monsoon: current state and future projections in a high-resolution AGCM. *Clim Dyn* 52:6441–6461. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4522-7>

Chapitre 4 : Variabilité synoptique associée aux séquences sèches et humides au Sahel Ouest

Synoptic variability associated with wet and dry spells in the Western Sahel

- Simmons A, Uppala S, Dee D, Kobayashi S (2007) ERA-Interim: new ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. ECMWF Newsletter 110:25–35
- Sultan B, Janicot S (2003) The West African monsoon dynamics. Part II: the “preonset” and onset” of the Summer Monsoon. *J Clim* 16:3407–3427. <https://doi.org/10.1175/1520-0442>
- Sylla MB, Aquila AD, Ruti PM, Giorgi F (2010) Simulation of the intraseasonal and the interannual variability of rainfall over West Africa with RegCM3 during the monsoon period. *Int J Climatol* 30:1865–1883. <https://doi.org/10.1002/joc.2029>
- Thorncroft C, Hodges K (2001) African easterly wave variability and its relationship to Atlantic tropical cyclone activity. *J Climate* 14:1166–1179
- Uppala SM, Dee DP, Kobayashi S, Simmons AJ (2008) Evolution of reanalysis at ECMWF. In Proceedings of Third WCRP International Conference on Reanalysis, 28 January-1 February 2008, Tokyo, Japan.

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Chapitre 5

Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

Sommaire

5.1 Variabilité spatiale des précipitations en été boréal.....	74
5.2 Variabilité spatiale des probabilités initiales, de transition et des séquences sèches et humides en été boréal.....	75
5.3 Changements régionaux moyens des précipitations et des probabilités des séquences sèches et humides.....	84
5.4 Variabilité interannuelle des probabilités initiales, de transition et des séquences sèches et humides en été boréal.....	86
5.5 Incertitudes sur les probabilités des séquences sèches et humides.....	91
5.6 Variabilité spatiale des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides au Sénégal.....	97
5.7 Evolution temporelle des précipitations et des probabilités des séquences sèches et humides au Sénégal.....	104

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

Ce chapitre étudie les changements futurs sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 des probabilités de jours secs et humides telles que les probabilités d'un seul jour sec/humide, de transition d'un jour (sec/humide) à un jour (sec/humide) et d'une succession de jours (secs/humides). A cet effet, le processus de chaîne de Markov a été appliqué sur les sorties de quatre modèles climatiques régionaux (RCM) de l'expérience CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling EXperiment). Les résultats présentés dans ce chapitre concernent la moyenne des modèles qui présente une performance meilleure que les modèles pris individuellement.

5.1 Variabilité spatiale des précipitations en été boréal

Les précipitations modélisées pour la période historique pendant la saison juillet-août-septembre (JAS), et leurs changements projetés dans un futur proche et lointain selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sont présentés sur la figure 5.1.

La climatologie historique de la moyenne des modèles (Figure 5.1a) montre une variation nord-sud des précipitations avec un maximum situé sur les régions orographiques telles que les montagnes du Fouta Djallon, le plateau de Jos et les monts Cameroun (frontière Nigéria/Cameroun). Les changements futurs sur les précipitations moyennes sont rapportés sur la figure 5.1 (b et c), respectivement pour les scénarios RCP4.5 et RCP.8.5 durant le futur proche (2021-2050). En général, la plupart des régions sahéliennes connaîtra une diminution des précipitations moyennes d'environ -25% sous les deux scénarios par rapport à la valeur moyenne de la période historique. Par contre, une augmentation est prévue dans les régions guinéennes d'environ 25% selon les deux scénarios. Les changements des précipitations dans le futur lointain (Figure 5.1d, e) montrent une diminution (augmentation) de plus de -30% (30%) durant le futur proche dans les régions sahéliennes (régions guinéennes). Ces résultats obtenus sur les régions guinéennes sont conformes aux études de Yapo et al. (2020) en Côte d'Ivoire. Ces études ont montré une augmentation des intensités de précipitations sous l'effet du changement climatique. De plus la diminution des précipitations moyennes au Sahel est en accord avec les résultats de Sarr et Camara (2017) et de Diba et al. (2021).

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

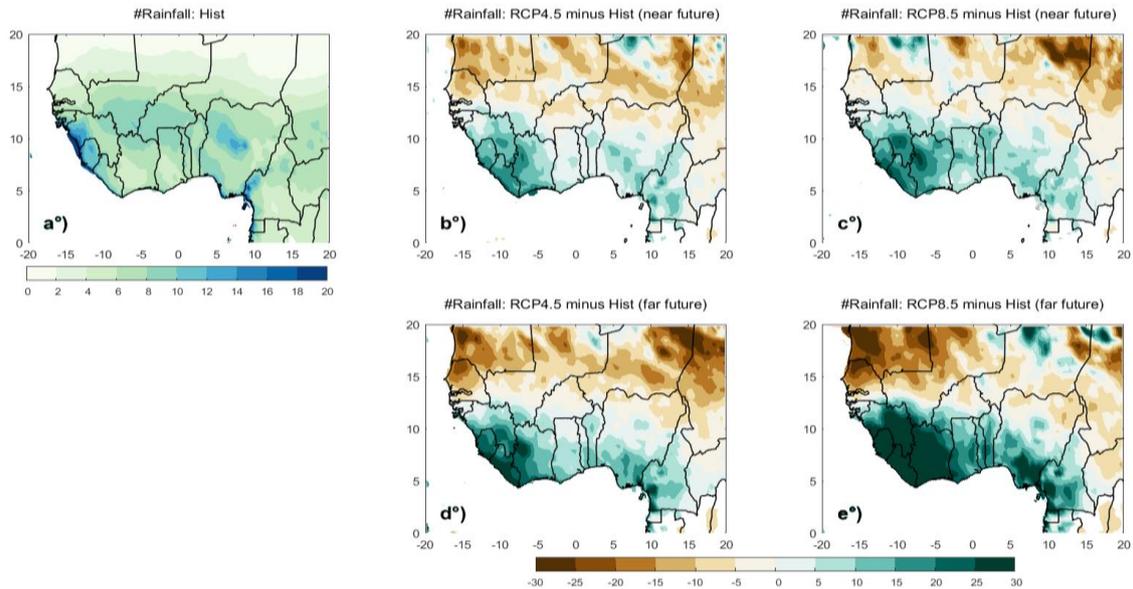


Figure 5.1 : Variabilité des précipitations pour la période historique (a) et changement dans le futur proche (b et c) et dans le futur lointain (d et e) pour les scénarios RCP4.5 et du RCP8.5 par rapport à la période historique.

5.2 Variabilité spatiale des probabilités initiales, de transition et des séquences sèches et humides en été boréal

Les changements sur les probabilités d'avoir un jour sec (P_0) et un jour humide (P_1) sont présentés sur la figure 5.2 dans un futur proche (2021-2050). La moyenne d'ensemble des modèles prévoit une augmentation de probabilités P_0 sur toutes les régions sahéniennes et une diminution sur les régions guinéennes sous les deux scénarios (Figure 5.2b, c) par rapport à la période de référence (1976-2005). Ces changements sont plus prononcés sous le scénario RCP8.5 (jusqu'à 15 %) au Sahel et sous le scénario RCP4.5 (~30 %) sur les côtes guinéennes. Pour les probabilités P_1 (Figure 5.2e, f), une diminution sera notée sur les régions sahéniennes, en particulier sur le Nord pour les deux scénarios. Cette diminution est plus prononcée sous le scénario RCP8.5, en particulier au Nord du Sénégal, sur la Mauritanie et au Nord du Mali. Les changements de probabilités P_0 dans le futur lointain (2071-2100) (Figure 5.3b, c) montrent une augmentation (diminution) généralement plus importante que dans le futur proche sur les régions sahéniennes (régions guinéennes). Comme dans le cas des probabilités P_0 , les probabilités P_1 (Figure 5.3e, f) montrent une forte diminution (augmentation) comparées au futur proche dans les régions sahéniennes (Côte de Guinée). L'augmentation de probabilités P_0

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

sur les régions sahéliennes sera associée à une diminution des précipitations moyennes tandis que la diminution des probabilités P_1 sur les côtes guinéennes sera associée à une augmentation des précipitations moyennes. Ces résultats montrent que la variabilité des probabilités d'avoir un jour sec ou humide est liée à celle des précipitations moyennes saisonnières.

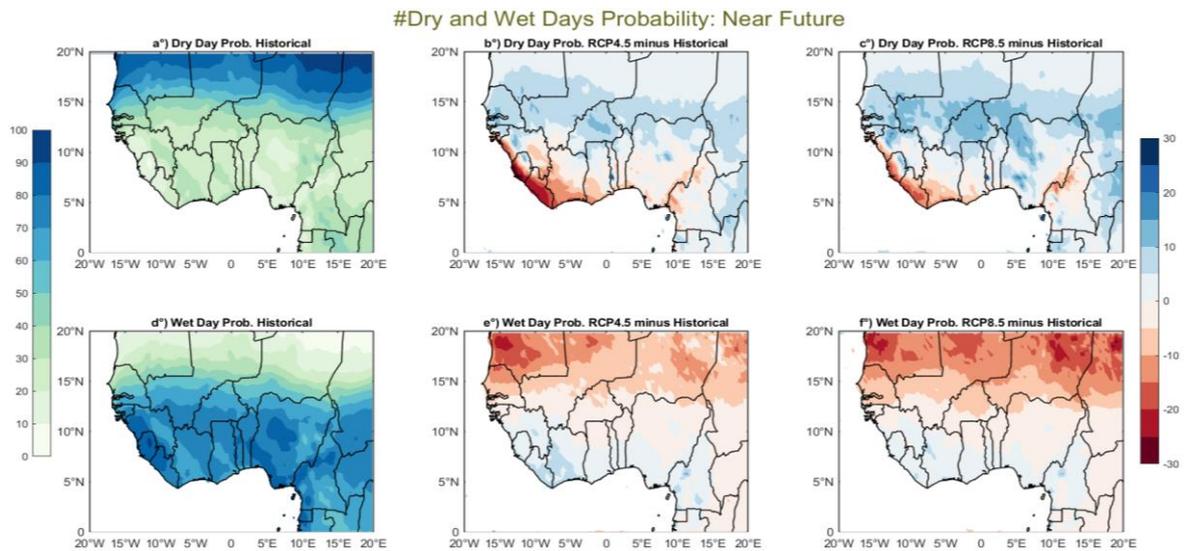


Figure 5.2: Probabilités de jours secs (en haut) et de jours humides (en bas) pour la période historique (a, d), pour le scénario RCP4.5 moins la période historique (b, e) et pour le scénario RCP8.5 moins la période historique (c, f) pendant le futur proche (2021-2050). Les changements sont estimés en pourcentage.

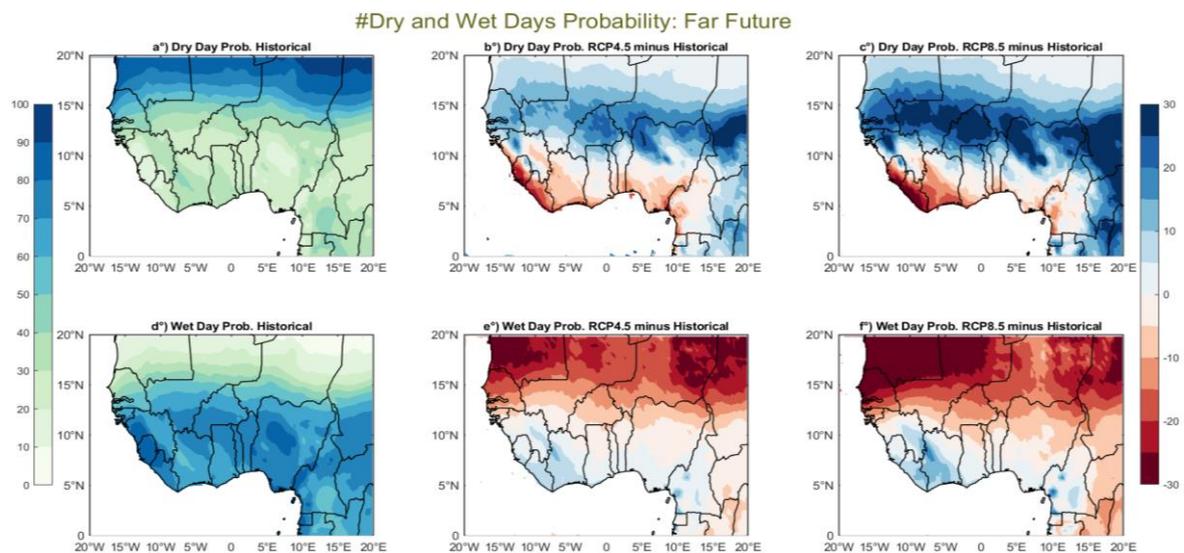


Figure 5.3 : Identique à la figure 5.2, mais pendant le futur lointain (2071-2100).

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

Les différences relatives des probabilités de transition (P_{00} , P_{01}) entre la période historique et le futur proche (2021-2050) sont présentées sur la figure 5.4. Nous constatons que les modèles prévoient en moyenne une augmentation de probabilités P_{00} dans les parties nord de l'Afrique de l'Ouest, en particulier dans les régions sahéliennes et une diminution dans le sud (c'est-à-dire la côte guinéenne) sous les deux scénarios (Figure 5.4b, c) par rapport à la période de référence. L'augmentation dans les régions sahéliennes et la diminution sur la côte guinéenne sont plus remarquables sous le scénario RCP8.5. Si l'on considère les probabilités P_{01} , illustrées sur la figure 5.4 (e, f), la moyenne d'ensemble des modèles montre une diminution dans les parties nord de l'Afrique de l'Ouest sous les deux scénarios par rapport à la période de référence. Cependant, l'augmentation sera notée dans le sud de l'Afrique de l'Ouest en particulier sur la Côte de Guinée sous les deux scénarios. Par conséquent, les changements futurs sont plus prononcés au Sahel avec le scénario RCP8.5 et sur la côte guinéenne avec le scénario RCP4.5. Les changements dans le futur lointain (Figure 5.5) sont généralement plus importants que durant le futur proche dans les régions sahéliennes, jusqu'à 15% et 20% sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, respectivement.

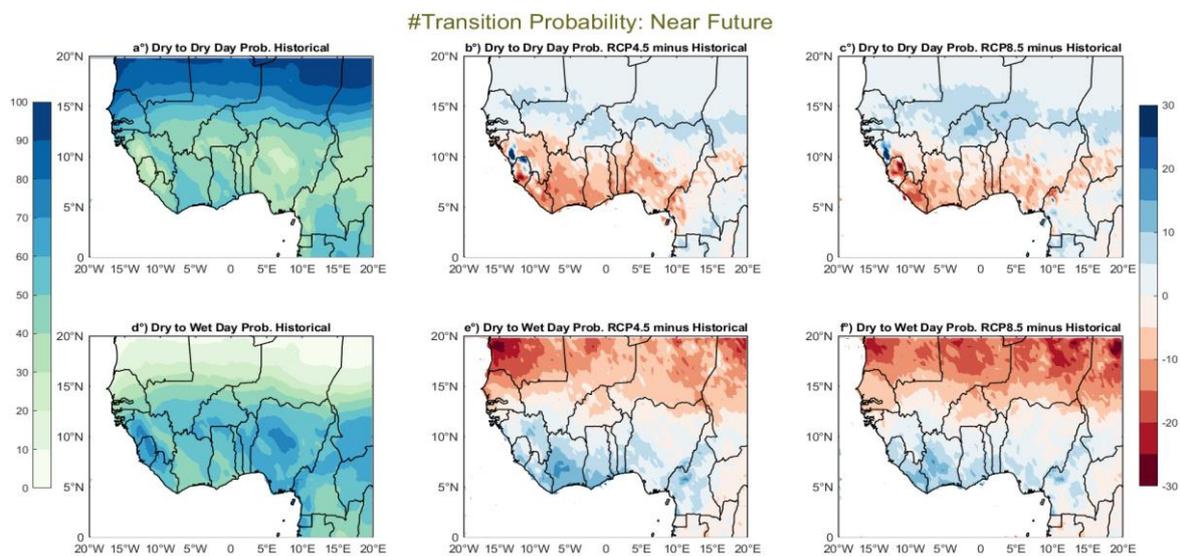


Figure 5.4 : Identique à la figure 5.2, mais pour les probabilités de jour sec à sec (en haut) et les probabilités de jour sec à humide (en bas) pendant le futur proche (2021-2050).

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

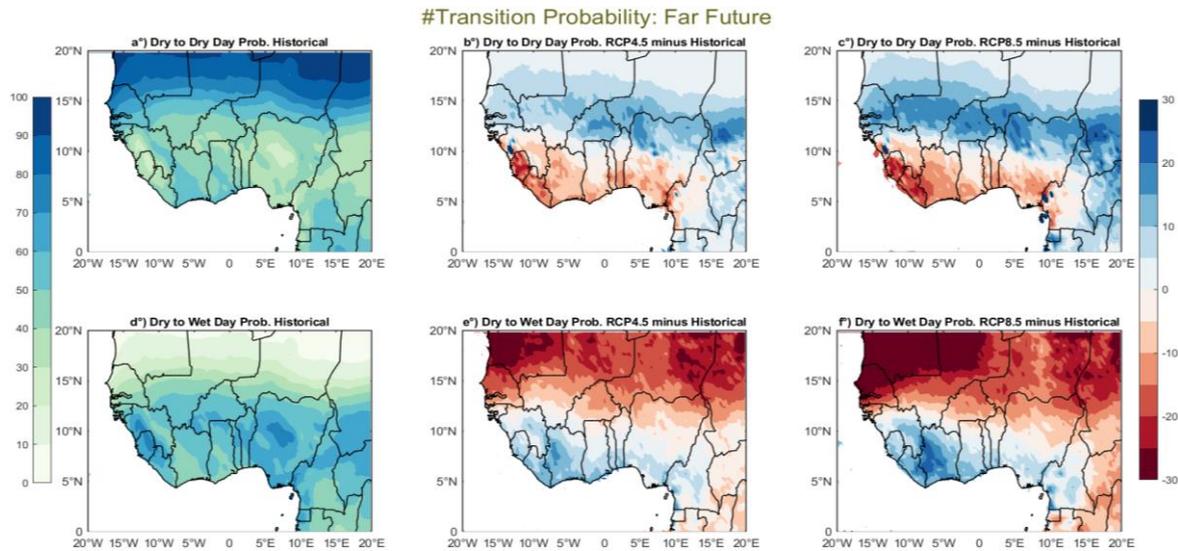


Figure 5.5: Identique à la figure 5.2, mais pour les probabilités de jour sec à sec (en haut) et les probabilités de jour sec à humide (en bas) pendant le futur lointain (2071-2100).

Les probabilités d'avoir un jour humide précédé d'un jour humide (P_{11}) (haut) et un jour sec précédé d'un jour humide (P_{10}) (bas) sont représentées sur les figures 5.6 et 5.7, respectivement pendant le futur proche et le futur lointain. Comme le montre la figure 5.6 (a, d), l'Afrique de l'Ouest est caractérisée par des fortes (faibles) probabilités d'avoir un jour humide suivi d'un jour humide (jour humide suivi d'un jour sec) au niveau de la ZCIT, en particulier sur les régions montagneuses. Ces résultats de la moyenne d'ensemble des modèles sont similaires aux résultats observés par Basse et al. (2021) sur les mêmes zones; ce qui atteste de la bonne qualité de ces simulations.

Les changements sur les probabilités P_{11} dans le futur proche de la moyenne d'ensemble des modèles selon les scénarios RCP4.5 (Figure 5.6b) et RCP8.5 (Figure 5.6c), sont caractérisés par une diminution au nord de l'Afrique de l'Ouest. La diminution est plus prononcée sous le scénario RCP8.5 (jusqu'à -20%). Par contre, une augmentation (jusqu'à 5%) est prévue au sud de l'Afrique de l'Ouest, en particulier au sud de la Guinée Conakry, au Libéria, au Sierra Léone et sur la Côte d'Ivoire. Concernant les probabilités P_{10} , la moyenne d'ensemble des modèles prévoit une augmentation au nord et une diminution au sud de l'Afrique de l'Ouest selon les deux scénarios. L'augmentation au nord est plus prononcée sous le scénario RCP8.5 (Figure 5.6f) et la diminution au sud sous le scénario RCP4.5 (Figure 5.6e). Les changements de probabilités P_{11} durant le futur lointain (2071-2100) sont rapportés sur la figure 5.7 (b, c) pour les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5. En général, en considérant les deux scénarios, nous

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

observons une diminution des probabilités P_{11} pouvant aller jusqu'à -15% pour le scénario RCP4.5 et à plus de -20% pour le RCP8.5 sur la majeure partie de l'Afrique de l'Ouest, excepté au sud des pays tels que la Guinée, la Côte d'Ivoire et le Nigeria, et sur l'ensemble de la Sierra Leone et du Liberia où une augmentation de l'ordre de 5% sous le scénario RCP4.5 et jusqu'à 10% sous le scénario RCP8.5 est simulée. Ces modifications de probabilités P_{11} sont plus importantes dans le futur lointain que pendant le futur proche.

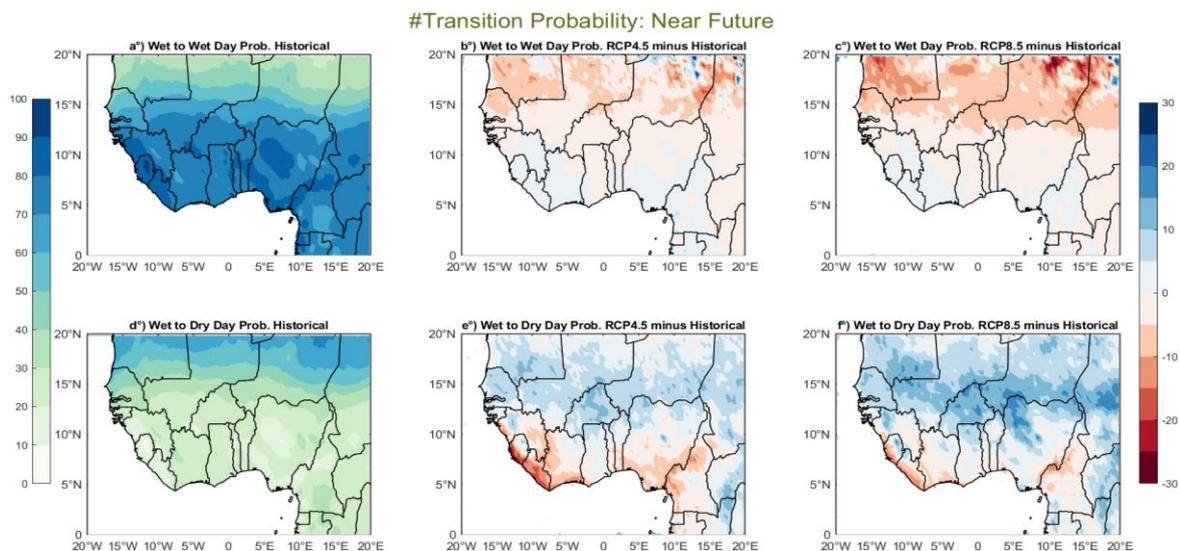
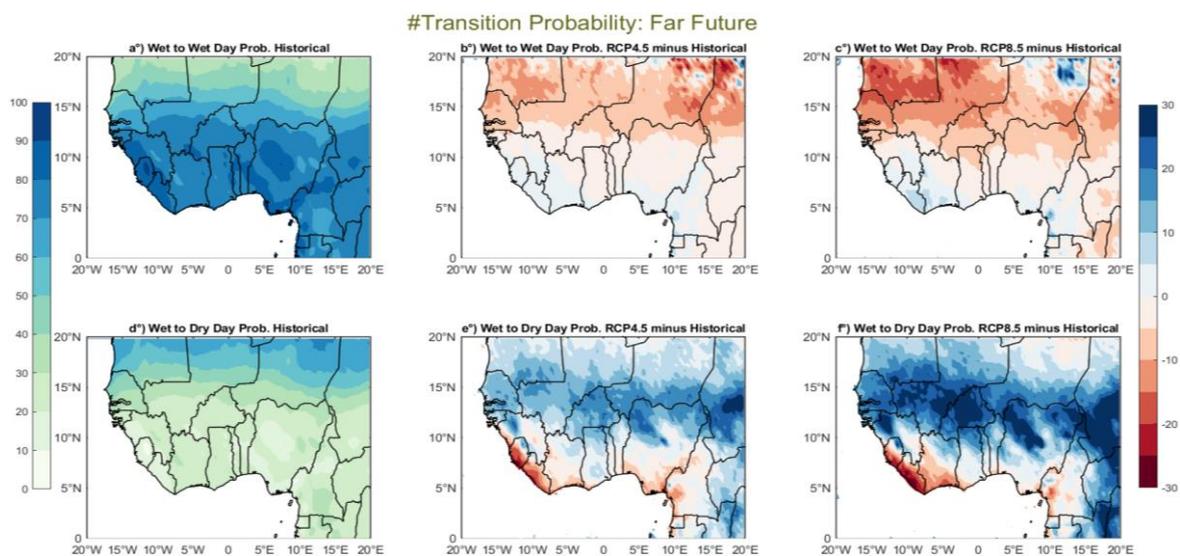


Figure 5.6 : Identique à la figure 5.2, mais pour les probabilités de jour humide à humide (en haut) et les probabilités de jour humide à sec (en bas) pendant le futur proche (2021-2050).



Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

Figure 5.7 : Identique à la figure 5.2, mais pour les probabilités de jour humide à humide (en haut) et les probabilités de jour humide à sec (en bas) pendant le futur lointain (2071-2100).

S'agissant des probabilités d'avoir un jour sec précédé d'un jour humide (P_{10}), un scénario inverse est observé par rapport aux probabilités P_{11} . Une augmentation jusqu'à 20% selon le scénario RCP4.5 et de plus de 30% selon le scénario RCP8.5 dans certaines endroits, est prévue sur presque toute l'Afrique de l'Ouest. Par contre, certaines parties du sud connaîtront une diminution (jusqu'à -30%) de probabilités P_{10} .

Les changements moyens des jours consécutifs secs de différentes durées des simulations historiques (1970-2005) ainsi que les changements dans le futur proche (2021-2050) sont évalués et les résultats sont présentés sur la figure 5.8. La région de l'Afrique de l'Ouest présente de faibles probabilités de séquences sèches de 7 jours situées au niveau de la zone de convergence intertropicale (ZCIT), en particulier dans les régions orographiques telles que les hauts plateaux du Fouta Djallon, le Jos et les montagnes du Cameroun (Figure 5.8a). Les probabilités des séquences sèches de 10 jours de la moyenne d'ensemble des modèles (Figure 5.8d) est similaire à celle des séquences sèches de 7 jours mais avec des valeurs de probabilités plus faibles sur presque toute l'Afrique de l'Ouest. Les changements de la variabilité spatiale des probabilités de séquences sèches de 7 jours (Figure 5.8b-c) et de 10 jours (Figure 5.8e-f) dans le futur proche sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 ont été ainsi évalués. Dans le cadre du réchauffement climatique, la moyenne d'ensemble des modèles prévoit une augmentation de probabilités de jours secs consécutifs sur les régions sahéniennes sous les deux scénarios mais l'ampleur des changements et leur extension spatiale sont plus importantes sous le scénario RCP8.5 (jusqu'à 100% pour 7 jours et à plus 100% pour 10 jours). Cependant, une diminution de l'ordre de -25 à -75% de probabilités d'occurrence de 7 jours consécutifs secs et jusqu'à 100% de probabilités de 10 jours consécutifs secs se produit sur le Golfe de Guinée pour les deux scénarios de réchauffement climatique. Cette situation reste identique à l'horizon 2100 (Figure 5.9), où la saison de mousson est caractérisée par une augmentation plus prononcée par rapport à l'horizon 2050 des probabilités des séquences sèches au Sahel. Par contre, une diminution de ces séquences est prévue à l'horizon 2100 sur le Golfe de Guinée.

Cependant, nos résultats confirment ceux de Sarr et Camara (2017) qui ont prévu une augmentation de la durée maximale des séquences sèches sur le Sahel. De plus, nos résultats sont également en accord avec ceux de Yapo et al. (2020), où une diminution de jours

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

consécutifs secs est prévue sur la Côte d'Ivoire (pays du Golfe de Guinée) pendant la saison de mousson d'été (JAS).

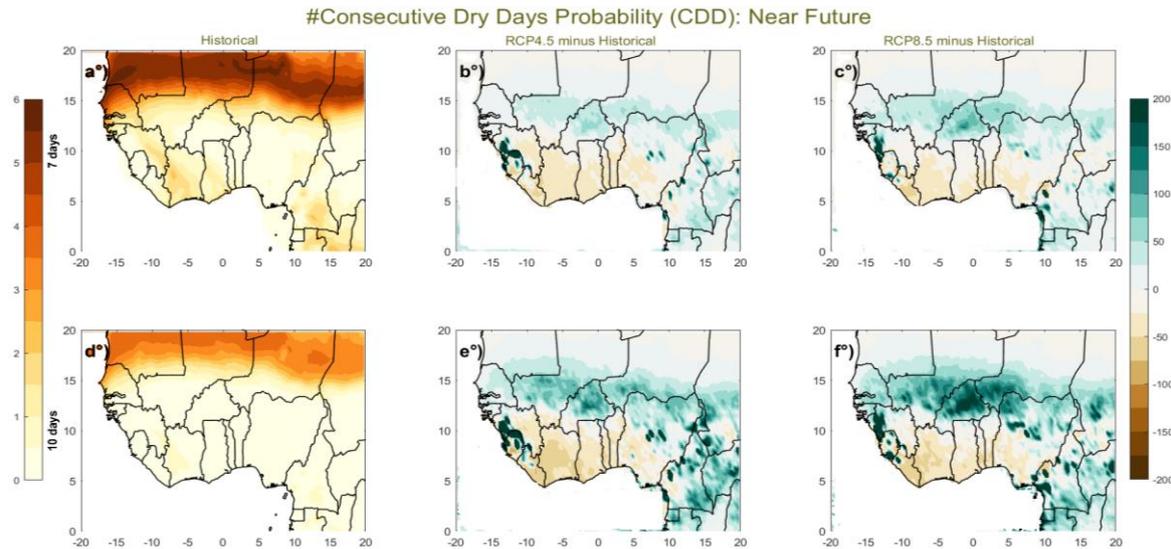


Figure 5.8 : Identique à la figure 5.2, mais pour les probabilités de 7 jours secs consécutifs (en haut) et pour les probabilités de 10 jours secs consécutifs (en bas) pendant le futur proche (2021-2050).

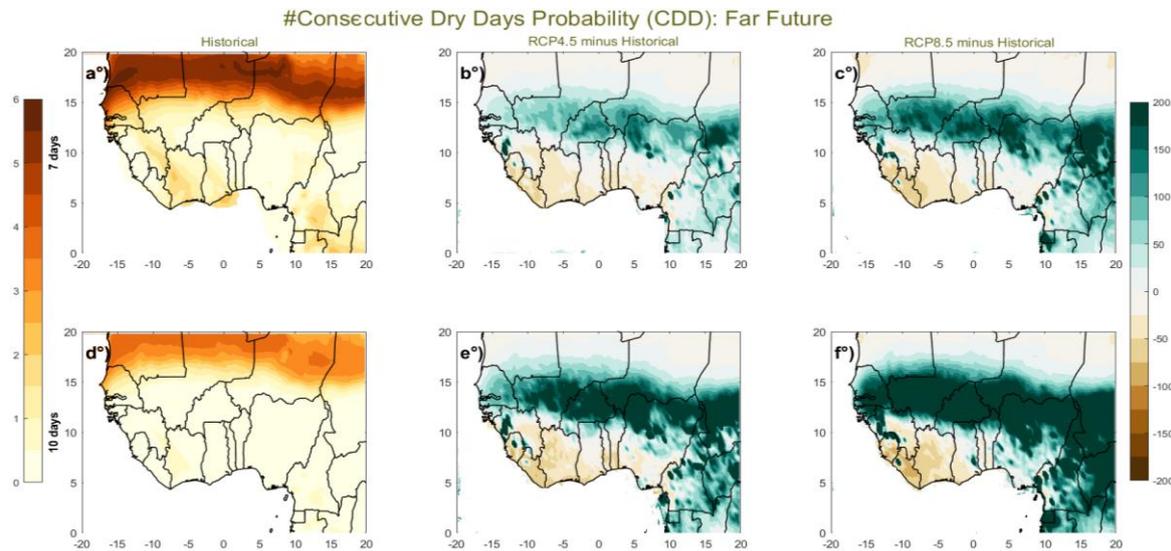


Figure 5.9 : Identique à la figure 5.2, mais pour les probabilités de 7 jours secs consécutifs (en haut) et pour les probabilités de 10 jours secs consécutifs (en bas) pendant le futur lointain (2071-2100).

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

Comme dans le cas des jours secs consécutifs, les probabilités des séquences humides de différentes durées au cours de la période historique de la moyenne d'ensemble des modèles sont présentées sur la figure 5.10 (a et d). Comme le montre la figure 5.10a, la moyenne d'ensemble des modèles montre des probabilités plus élevées d'avoir 7 jours humides consécutifs, situés dans la ZCIT et de faibles probabilités dans le Nord du Sahel. Les probabilités de jours humides consécutifs diminuent quand la durée devient plus longue (Figure 10d) et sont situées dans les régions orographiques, telles que le Fouta Djallon, le Jos et le Mont Cameroun. Ces régions où la variabilité des probabilités de jours humides consécutifs est plus élevée sont également caractérisées par des précipitations moyennes plus importantes et plus intenses pendant la saison de mousson en Afrique de l'Ouest (Basse et al., 2021).

Les changements de probabilités de 7 jours consécutifs humides dans le futur proche sont illustrés sur la figure 10 (b et c) pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Une diminution de probabilités de 7 jours consécutifs humides est prévue dans les régions sahéliennes de l'ordre de -10 à -40%. Cependant, la diminution est plus visible sous le scénario RCP8.5. Ces changements sont également observés sur les probabilités de 10 jours consécutifs humides (Figure 10e-f) où une forte diminution (jusqu'à -70%) est prévue sur le Sahel et sous le scénario RCP8.5. Néanmoins, une augmentation est prévue dans certaines régions du Golfe de Guinée (Guinée Conakry, Libéria, Côte d'Ivoire). Ainsi, les changements dans le futur lointain de probabilités d'avoir 7 jours consécutifs humides (Figure 5.11b, c) et 10 jours consécutifs humides (Figure 5.11e, f), montrent une diminution généralement plus importante et sous le scénario RCP8.5 (de l'ordre de -10 à -60% et -20 à -90% pour les séquences de 7 et 10 jours humides consécutifs, respectivement) dans les sous-régions sahéliennes par rapport au futur proche. Cependant, une augmentation de probabilités de jours humides consécutifs apparaît sur la côte guinéenne, en particulier au sud des régions telles que la Côte d'Ivoire, la Guinée Conakry et le Liberia et plus prononcée sous le scénario RCP8.5.

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

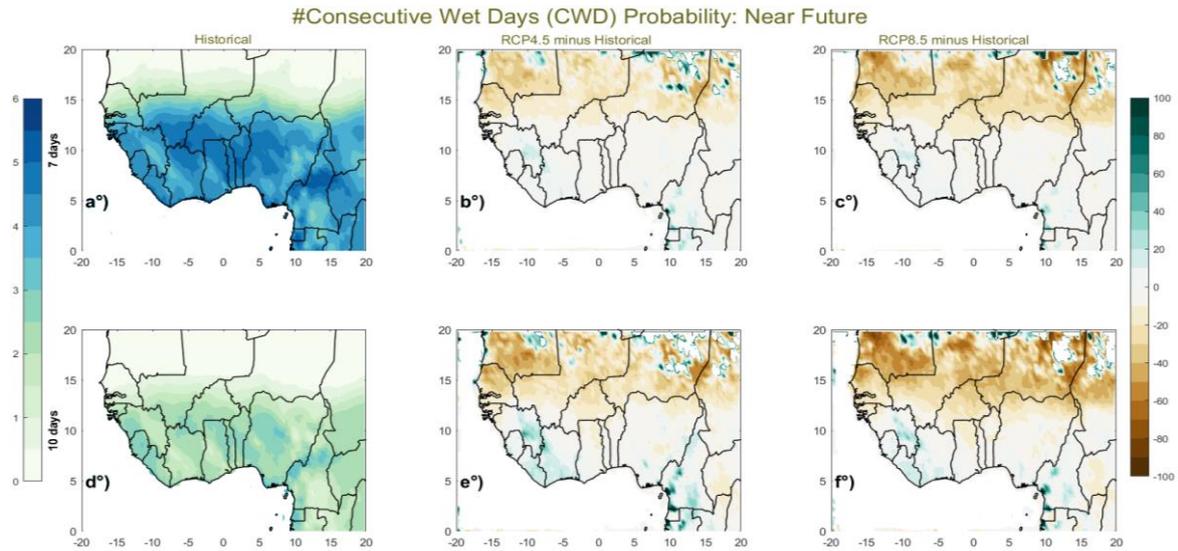


Figure 5.10 : Identique à la figure 5.2, mais pour la probabilité de 7 jours humides consécutifs (en haut) et pour la probabilité de 10 jours humides consécutifs (en bas) pendant le futur proche (2021-2050).

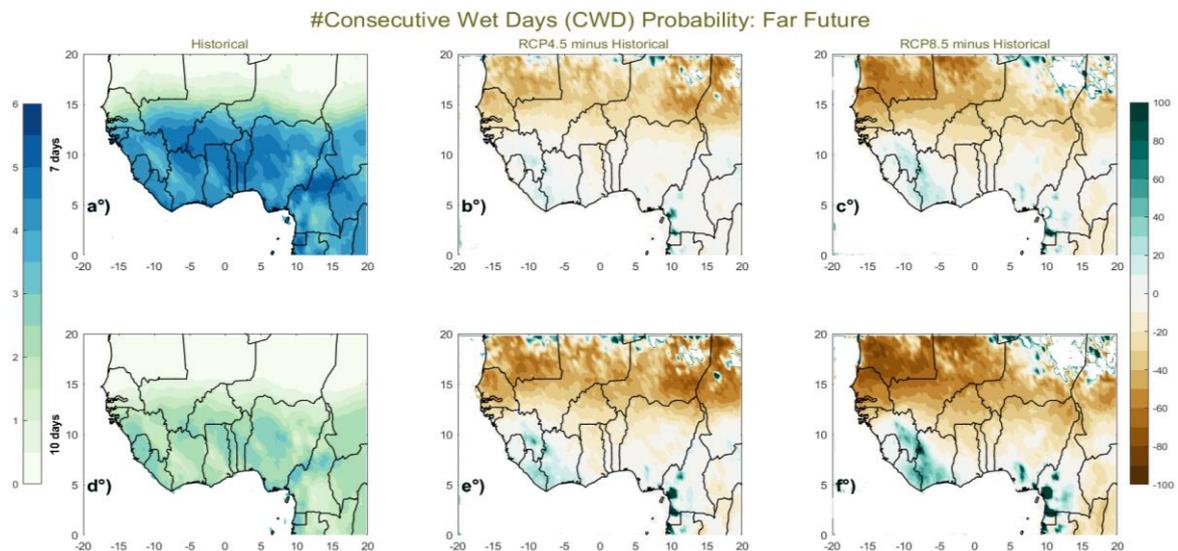


Figure 5.11 : Identique à la figure 5.2, mais pour les probabilités de 7 jours humides consécutifs (en haut) et pour les probabilités de 10 jours humides consécutifs (en bas) pendant le futur lointain (2071-2100).

5.3 Changements régionaux moyens des précipitations et des probabilités des séquences sèches et humides en été boréal

Les valeurs quantitatives pendant la saison estivale (JAS) sur les différentes sous-régions de l'Afrique de l'Ouest (c'est-à-dire le Sahel Ouest, le Sahel Central, la zone Soudanienne et le Golfe de Guinée) sont rapportées dans le tableau 5.1 pour les indices de précipitation, les probabilités de 7 jours consécutifs secs/humides et 10 jours consécutifs secs/humides. Comme l'indique le tableau 5.1, la moyenne des modèles prévoit une diminution des précipitations dans les régions sahéliennes (Sahel Ouest et Central) avec des minima d'environ -13.22% dans le Sahel Ouest pendant le futur lointain (2071-2100) sous le scénario RCP8.5 et d'environ -6.04% au Sahel Central pendant le futur proche (2021-2050) sous le scénario RCP4.5. Par contre, une augmentation des précipitations est prévue dans la zone Soudanienne et dans le Golfe de Guinée avec des maxima atteignant environ 10.94% et 26.07% dans le Golfe de Guinée pendant le futur proche et pendant le futur lointain, respectivement, et selon le scénario RCP8.5.

S'agissant des probabilités des séquences sèches, il est prévu une augmentation dans le Sahel Ouest, le Sahel Central et dans la zone Soudanienne pour toutes les catégories considérées (i.e, 7 et 10 jours) avec des maxima observés dans le Sahel Central. Les maxima pour les séquences sèches de 7 (10) jours atteignent environ 34.52% (76.91%) et 82.35% (223.04%) pendant le futur proche et lointain, respectivement, et selon le scénario RCP8.5. Par contre, une diminution des probabilités des séquences sèches est prévue dans le Golfe de Guinée. Dans cette zone, les minima de probabilités des séquences sèches de 7 (10) jours atteignent -33.33% (-40.93%) et -27.42% (-34.10%) dans le futur proche et lointain, respectivement, et sous le scénario RCP4.5. De plus, une diminution des probabilités des séquences humides est prévue au Sahel Ouest, Sahel Central et sur la zone Soudanienne. Cette diminution est beaucoup plus forte dans les régions sahéliennes avec des minima de séquences humides de 7 (10) jours atteignant -24.01% (-34.68%), respectivement, au Sahel Central pendant le futur proche et -43.75% (-57.68%) au Sahel Ouest pendant le futur lointain sous le scénario RCP8.5. Cette diminution des probabilités des séquences pluvieuses est cohérente avec la baisse des précipitations dans ces zones sahéliennes. De faibles changements sont prévus dans le Golfe de Guinée.

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

Tableau 5.1: Changements futurs (%) par rapport à la période de référence 1976-2005 dans les différentes sous-régions d'Afrique de l'Ouest.

Périodes	2021-2050		2071-2100	
Scénarios	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Précipitations				
Sahel Ouest	-5.71	-1.44	-10.04	-13.22
Sahel Central	-6.04	-3.00	-7.46	-6.55
Zone Soudanienne	1.71	5.67	3.13	8.28
Golfe de Guinée	7.51	10.94	12.58	26.07
Séquences sèches de 7 jours				
Sahel Ouest	11.63	15.55	25.90	47.17
Sahel Central	24.40	34.52	56.65	82.35
Zone Soudanienne	2.66	15.52	49.77	81.23
Golfe de Guinée	-33.33	-27.18	-27.42	-25.61
Séquences sèches de 10 jours				
Sahel Ouest	27.24	34.73	60.61	126.53
Sahel Central	51.18	76.91	133.91	223.04
Zone Soudanienne	19.75	43.71	120.10	215.20
Golfe de Guinée	-40.93	-35.03	-34.10	-20.60
Séquences humides de 7 jours				
Sahel Ouest	-14.64	-23.23	-29.33	-43.75
Sahel Central	-14.54	-24.01	-28.36	-35.51
Zone Soudanienne	-3.41	-5.92	-8.22	-13.77
Golfe de Guinée	0.37	-0.25	-0.15	1.43
Séquences humides de 10 jours				
Sahel Ouest	-17.90	-31.50	-40.49	-57.68
Sahel Central	-20.54	-34.68	-41.31	-47.22
Zone Soudanienne	-6.07	-11.01	-15.33	-24.53
Golfe de Guinée	3.16	0.71	1.94	6.38

5.4 Évolution temporelle des probabilités initiales, de transition et des séquences sèches et humides en été boréal

L'analyse de l'évolution temporelle est faite pendant la saison de mousson (JAS) pour différentes probabilités de la période historique (1976-2005) à la période future (2006-2100) sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. L'évolution future des anomalies par rapport à la période de référence est faite pour les différentes sous-régions de l'Afrique de l'Ouest (voire chapitre 2).

Les résultats des projections futures des précipitations annuelles des différentes sous-régions ouest africaines à l'horizon 2100 sont d'abord illustrés sur la figure 5.12 et montrent une accentuation de la variabilité pluviométrique. Une légère tendance à la baisse est prévue sur le Sahel Ouest et sur le Sahel Central (Figure 5.12a et b, respectivement) selon les deux scénarios. Dans la zone Soudanienne (Figure 5.12c) et au niveau du Golfe de Guinée (Figure 5.12d), une tendance à la hausse est prévue selon les deux scénarios. Le scénario RCP8.5, est bien évidemment beaucoup plus alarmant avec une augmentation plus forte pouvant atteindre 4.5 mm dans la zone Soudanienne et 7 mm au niveau du Golfe de Guinée à l'horizon 2100. Cette divergence entre les scénarios au niveau du Golfe de Guinée n'est pas spécifique à notre étude car Yapo et al. (2020) ont montré cette différence sur l'indice d'intensité journalière de précipitations en Côte d'Ivoire. Ces résultats doivent toutefois être considérés avec prudence car si la communauté scientifique est majoritairement convaincue de la tendance au réchauffement du climat, elle est beaucoup plus divisée sur la diminution et l'augmentation des précipitations dans certains endroits. Certains experts jugent que les données d'observation actuelles sur la région ouest africaine sont trop rares et incomplètes pour permettre de dégager une tendance à l'augmentation ou à la diminution des précipitations dans une sous-région donnée dans le futur.

Les projections futures des anomalies de probabilités d'avoir un jour sec (P_0) dans les quatre zones de l'Afrique de l'Ouest (Figure 5.13) montrent toutes des tendances à la hausse, que ce soit pour le scénario de réchauffement RCP4.5 ou celui de RCP8.5 sur toutes les régions, excepté le Golfe de Guinée (Figure 5.13d), où une légère tendance à la baisse est prévue selon les deux scénarios. La tendance à la hausse suivrait initialement une pente légère jusqu'en 2050, date à laquelle l'augmentation de probabilités P_0 sera plus élevée et sous le scénario RCP8.5. Cependant, nous observons des tendances inverses en ce qui concerne les anomalies de probabilités d'avoir un jour humide (P_1) (non montré) par rapport aux anomalies des probabilités d'avoir un jour sec sur toutes les sous-régions sélectionnées sous les deux scénarios.

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

De la même manière, les anomalies de probabilités d'avoir un jour sec précédé d'un jour sec (P_{00}) (Figure 5.14) ainsi que les probabilités d'avoir un jour sec précédé d'un jour humide (P_{10}) (Figure 5.15) augmenteraient sur toutes les régions, à l'exception du Golfe de Guinée où la diminution est plus prononcée sous le scénario RCP8.5. L'augmentation sera plus prononcée sous le scénario RCP8.5, plus particulièrement sur le Sahel Ouest à l'horizon 2100. Par contre, les projections futures des anomalies de probabilités d'avoir un jour humide précédé d'un jour humide (P_{11}) et d'avoir un jour sec précédé d'un jour humide (P_{10}) (non montrées) prévoiraient des tendances inverses sur chaque zone comparées aux anomalies des probabilités P_{00} et P_{01} . Ces résultats montrent que la persistance d'avoir des jours secs serait fréquente plus particulièrement sur les régions sahéliennes, régions caractérisées par une diminution des précipitations dans le futur.

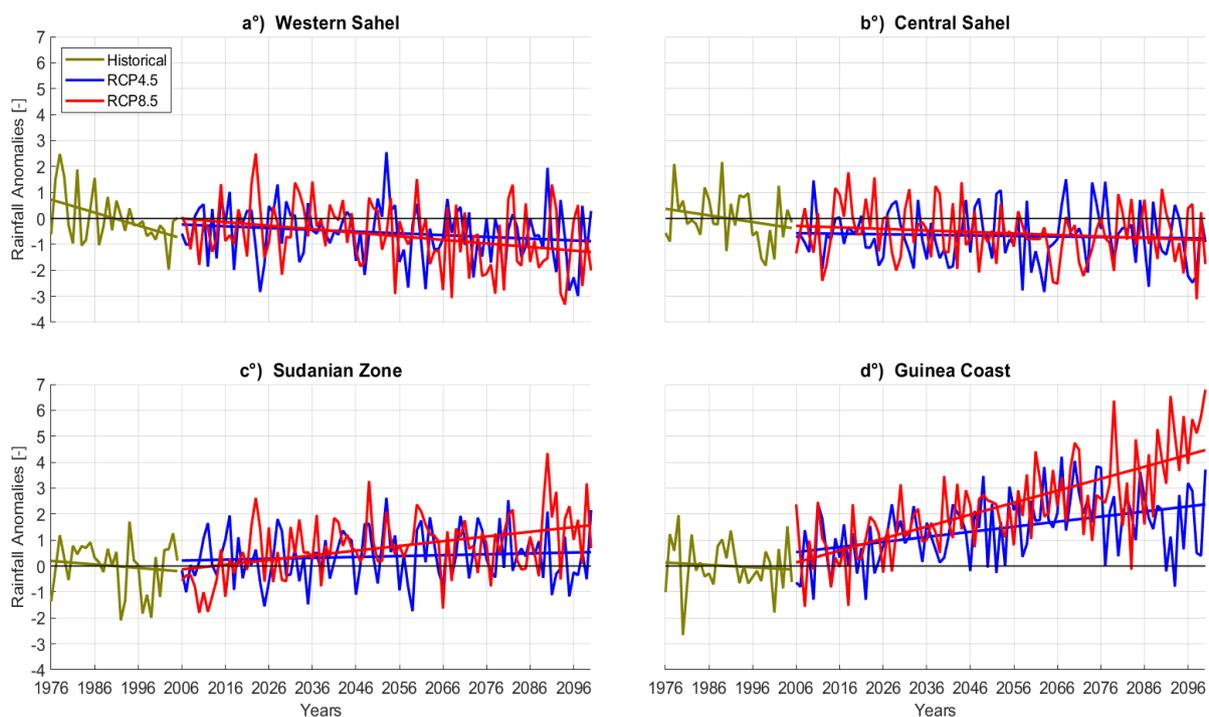


Figure 5.12: Évolution temporelle et tendances des anomalies de précipitations: a°) Sahel Ouest, b°) Sahel Central, c°) Zone Soudanienne et d°) Golfe de Guinée au cours de la saison des pluies (JAS) selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

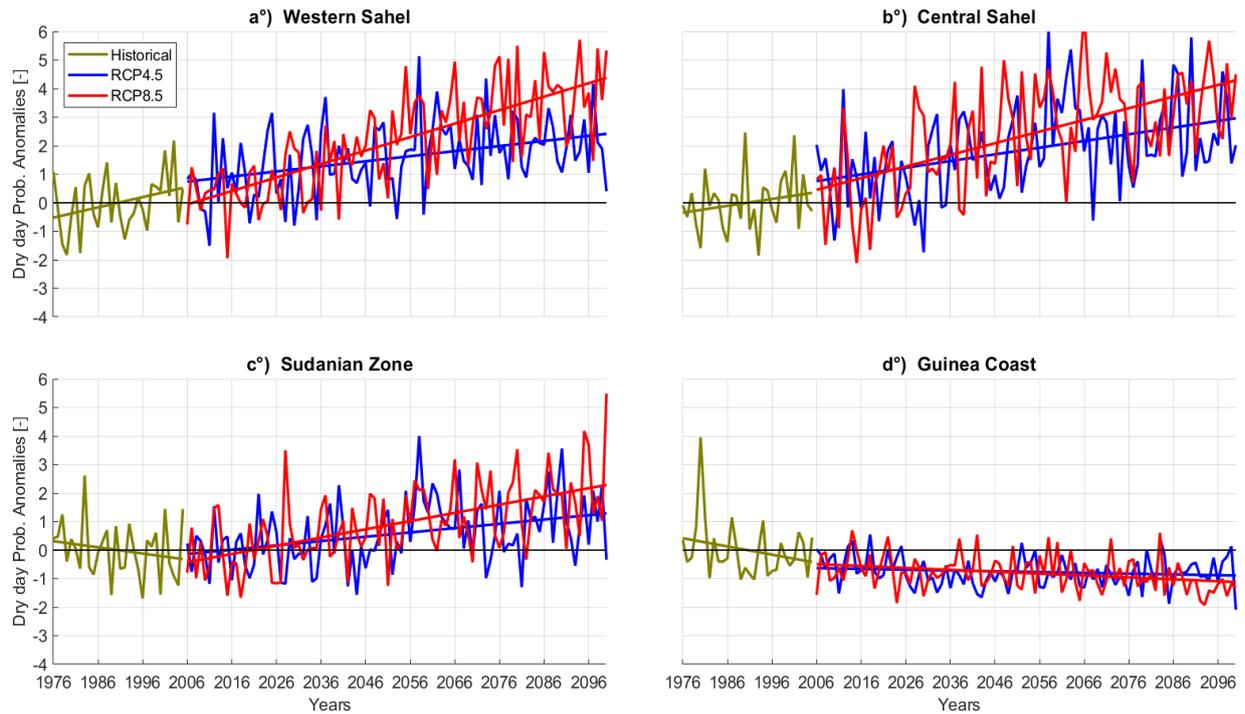


Figure 5.13 : Identique à la figure 5.12, mais pour les probabilités d'avoir un jour sec

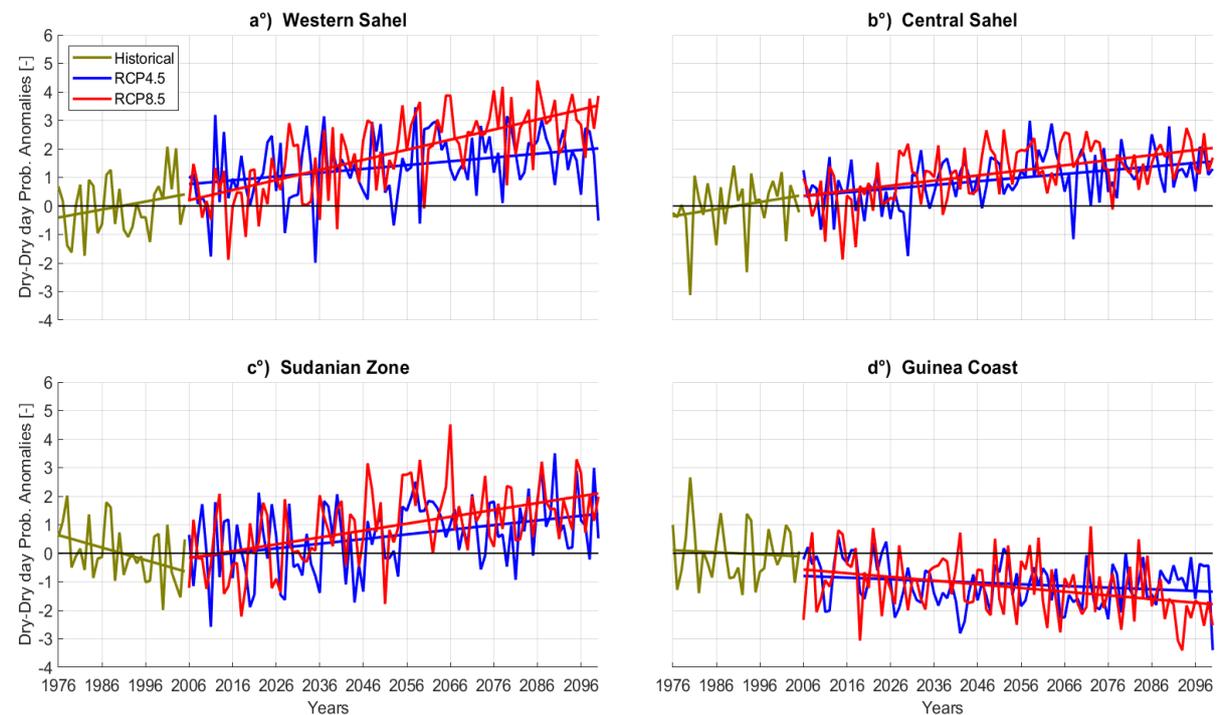


Figure 5.14 : Identique à la figure 5.12, mais pour les probabilités d'avoir un jour sec précédé d'un jour sec.

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

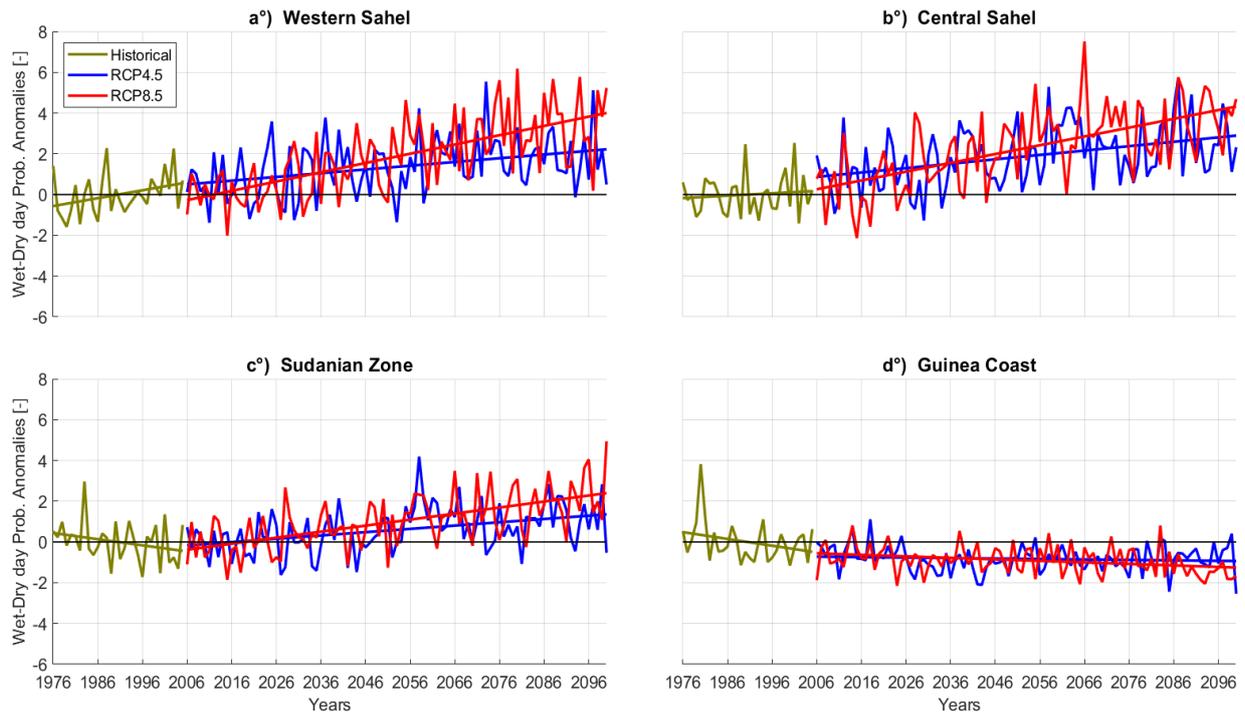


Figure 5.15 : Identique à la figure 5.12, mais pour les probabilités d’avoir un jour sec précédé d’un jour humide

Les projections futures des anomalies de probabilités de séquences sèches de 7 jours et de 10 jours sont représentées sur les figure 5.16 et figure 5.17, respectivement. Comme le montre la figure 5.16 (a et b), des tendances à la hausse des anomalies de probabilités de 7 jours secs consécutifs sont prévues dans le futur sur les régions sahéliennes selon les deux scénarios. La divergence entre les scénarios est plus visible sur le Sahel Ouest qu’au Sahel Central à l’horizon 2100. Dans la zone Soudanienne (Figure 5.16c), des tendances à l’augmentation sont prévues dans le futur pour les deux scénarios. L’augmentation est plus prononcée sur le scénario RCP8.5 pouvant atteindre 4%. Au niveau du Golfe de Guinée (Figure 5.16d), une tendance à la baisse de probabilités de 7 jours consécutifs secs est prévue dans la période future selon les deux scénarios. Cependant, les deux scénarios montrent une faible divergence à l’horizon 2100. Des tendances similaires à celles des séquences sèches de 7 jours sont constatées dans le cas des séquences sèches de 10 jours mais avec des fluctuations plus importantes que les séquences sèches de 7 jours.

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

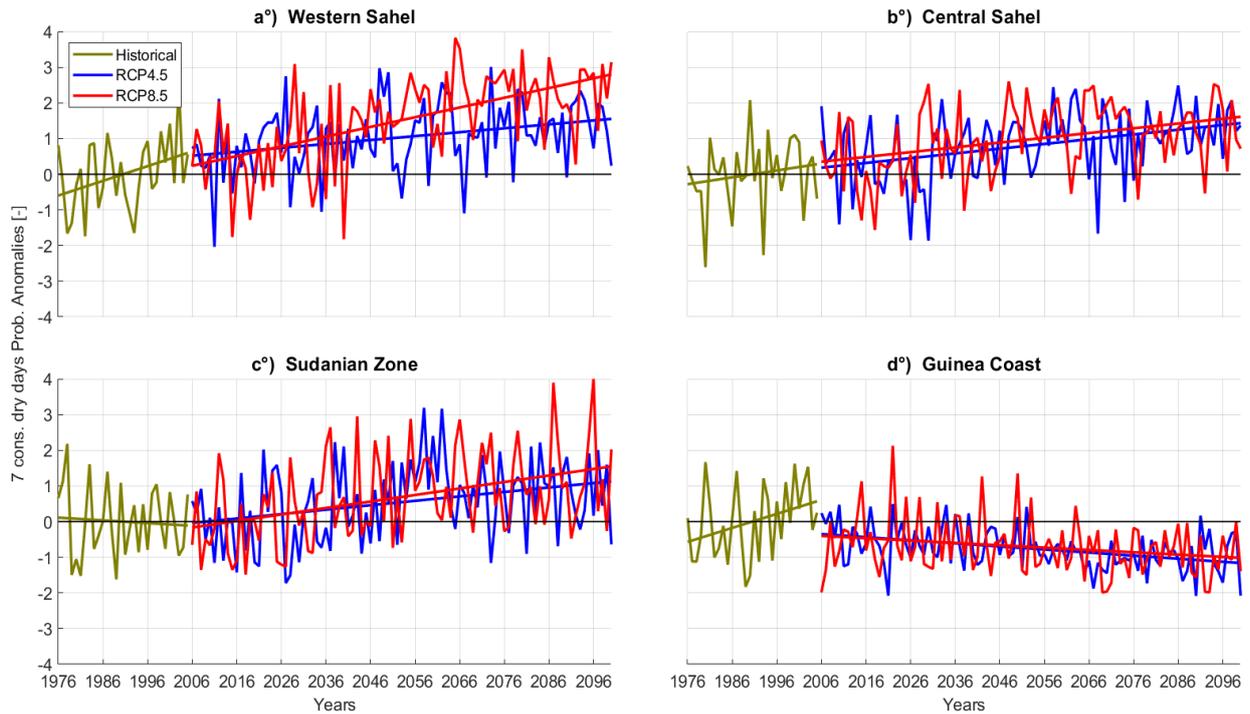


Figure 5.16 : Identique à la figure 5.12, mais pour les probabilités d'avoir 7 jours secs consécutifs.

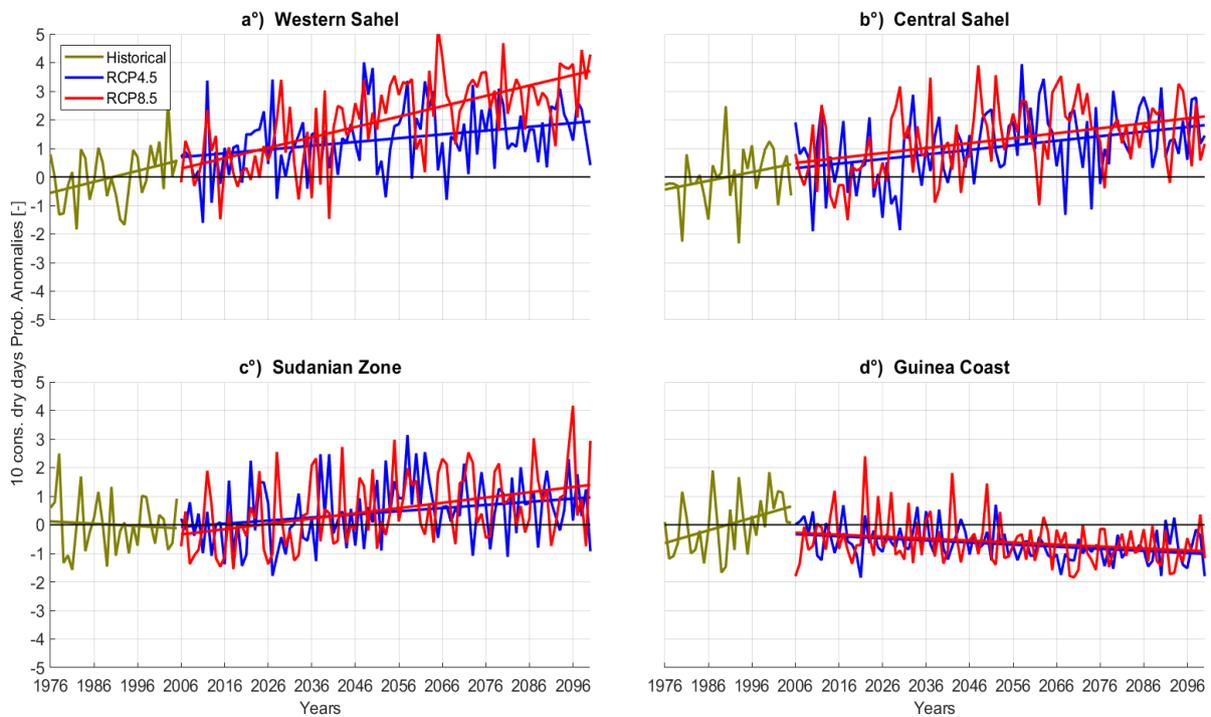


Figure 5.17 : Identique à la figure 5.12, mais pour les probabilités d'avoir 10 jours secs consécutifs.

5.5 Incertitudes sur les probabilités des séquences sèches et humides

Pour une évaluation plus quantitative et pour avoir une idée sur les changements projetés, les changements saisonniers moyens des séquences sèches (Figure 5.18 et 5.19) et humides (Figure 5.20 et 5.21) de la moyenne d'ensemble des modèles sont présentés sous la forme de graphiques de boîtes à moustaches pour les deux périodes futures, c'est-à-dire le futur proche (2021-2050) et le futur lointain (2071-2100), selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 pour chaque sous-région sélectionnée (Figure 1).

En ce qui concerne les probabilités des séquences sèches, la caractéristique la plus marquante est l'augmentation prévue dans les régions sahéliennes (Sahel Ouest et Sahel Central) et la diminution au niveau du Golfe de Guinée à la fois pour le futur proche (Figure 5.18) et le futur lointain (Figure 5.19) et pour les deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5) pendant la période estivale. L'ampleur des changements est plus importante pendant le futur lointain que pendant le futur proche et sous le scénario RCP8.5. Dans les régions sahéliennes, la médiane, les 25^è et 75^è percentiles sont positifs, ce qui indique que l'augmentation des séquences sèches est un résultat robuste. De même, au niveau du Golfe de Guinée, la médiane, les 25^è et 75^è percentiles sont négatifs, ce qui suggère que la diminution des séquences sèches est également un résultat robuste. De plus, les écarts interquartiles tendent à augmenter avec l'augmentation de la durée des séquences sèches. Dans la zone Soudanienne, les changements sont considérablement incertains pendant le futur proche (Figure 5.18c) au cours de la saison estivale, car les écarts interquartiles couvrent des valeurs tant négatives que positives selon les deux scénarios. Durant le futur lointain (Figure 5.19c), il est prévu une augmentation des séquences sèches selon les deux scénarios dans la zone Soudanienne, excepté les séquences sèches de 10 jours sous le scénario RCP8.5 car l'écart interquartile couvre à la fois des valeurs négatives et positives.

Pour les probabilités des séquences humides, la caractéristique la plus frappante est l'évolution négative prévue au Sahel Ouest pendant le futur proche (Figure 5.20a) et le futur lointain (Figure 5.21a) et selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 au cours de la saison estivale. Les changements sont plus importants pendant le futur lointain et selon le scénario RCP8.5. De plus, la médiane, les intervalles interquartiles, les 25^è et 75^è percentiles ainsi que les maxima et minima sont tous négatifs, ce qui implique que la diminution prévue des probabilités des séquences humides est substantiellement robuste. Au Sahel Central, il est prévu une diminution des séquences humides pendant les deux périodes et selon les deux scénarios, à l'exception des séquences humides de 7 jours pendant le futur proche et sous les deux scénarios (Figure 5.20b),

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

où les changements sont assez incertains car les écarts interquartiles couvrent à la fois des valeurs négatives et positives. Les changements sur les probabilités des séquences humides sont également assez incertains dans la zone Soudanienne, à l'exception des séquences humides de 7 jours pendant le futur lointain et selon le scénario RCP8.5 (Figure 5.21c). Dans le Golfe de Guinée, la caractéristique la plus visible est la diminution des séquences humides pendant le futur proche et sous les deux scénarios (Figure 5.20d). Pendant le futur lointain, des incertitudes non significatives sur les séquences humides sont seulement notées sous le scénario RCP4.5 (Figure 5.21d).

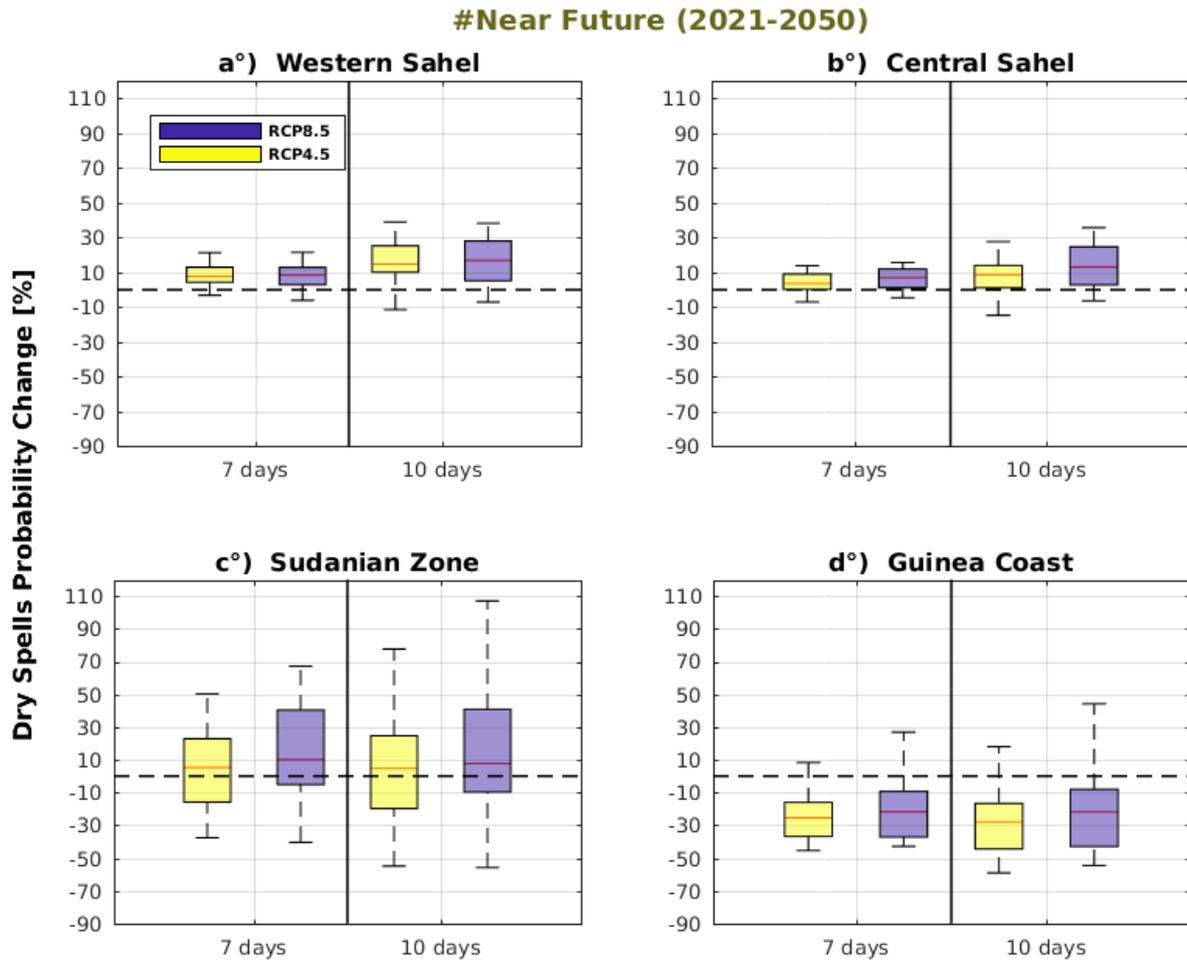


Figure 5.18 : Boîtes à moustaches des changements projetés sur les probabilités des séquences sèches pendant le futur proche: (a) Sahel Ouest, (b) Sahel Central, (c) Zone Soudanienne et (d) Golfe de Guinée.

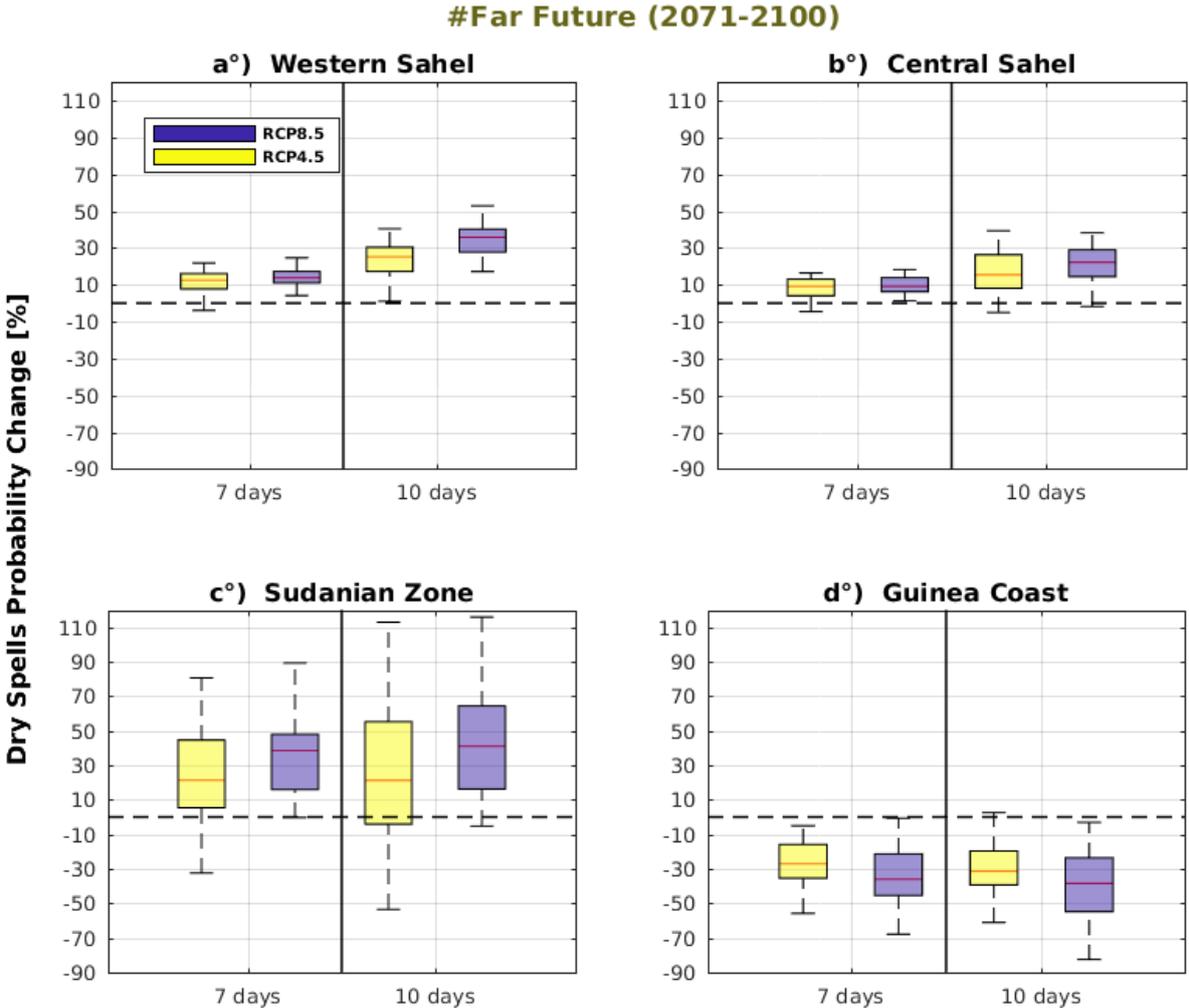


Figure 5.19 : Identique à la figure 5.18, mais pendant le futur lointain

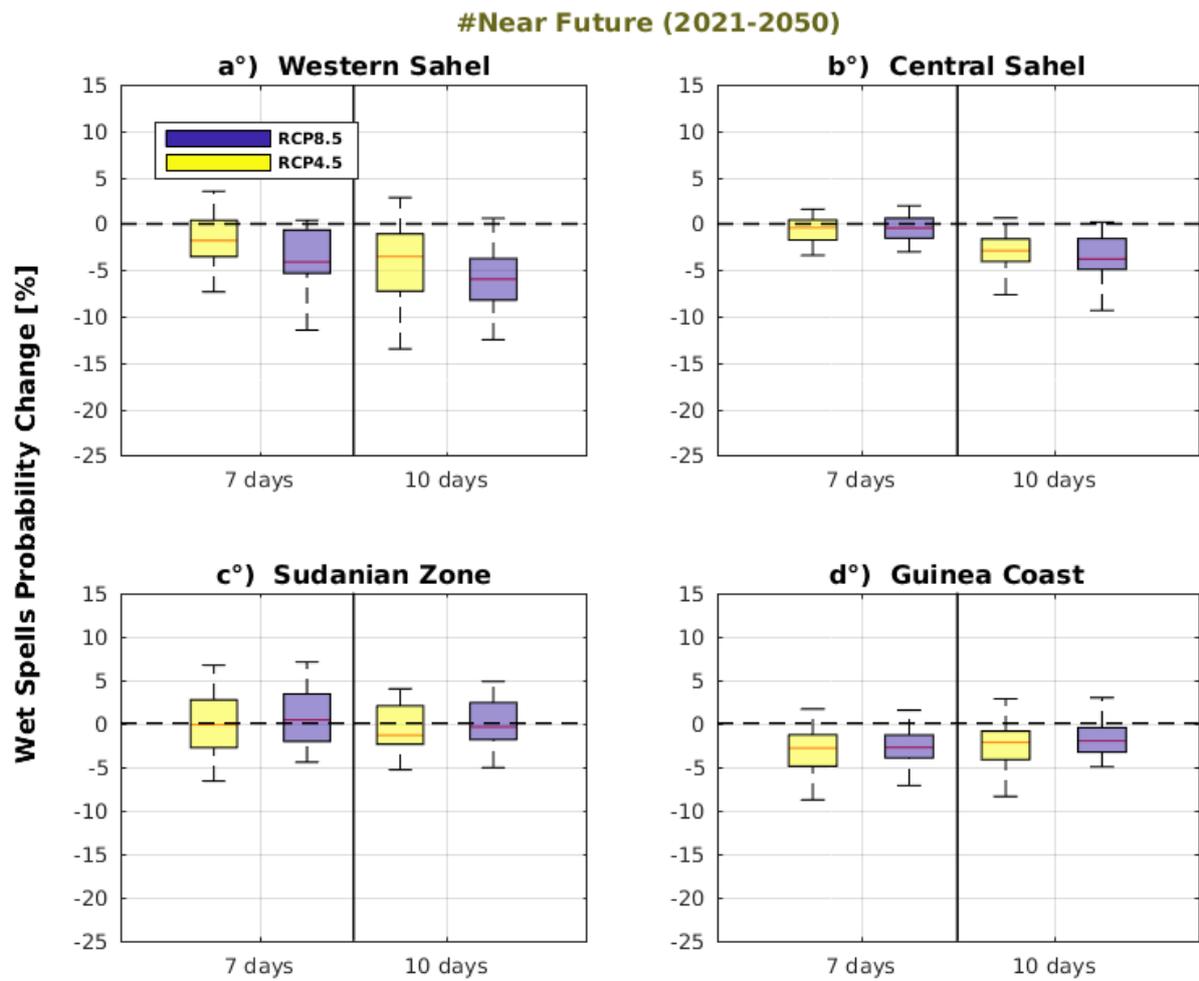


Figure 5.20 : Boîtes à moustaches des changements projetés sur les probabilités des séquences humides pendant le futur proche: (a) Sahel Ouest, (b) Sahel Central, (c) Zone Soudanienne et (d) Golfe de Guinée.

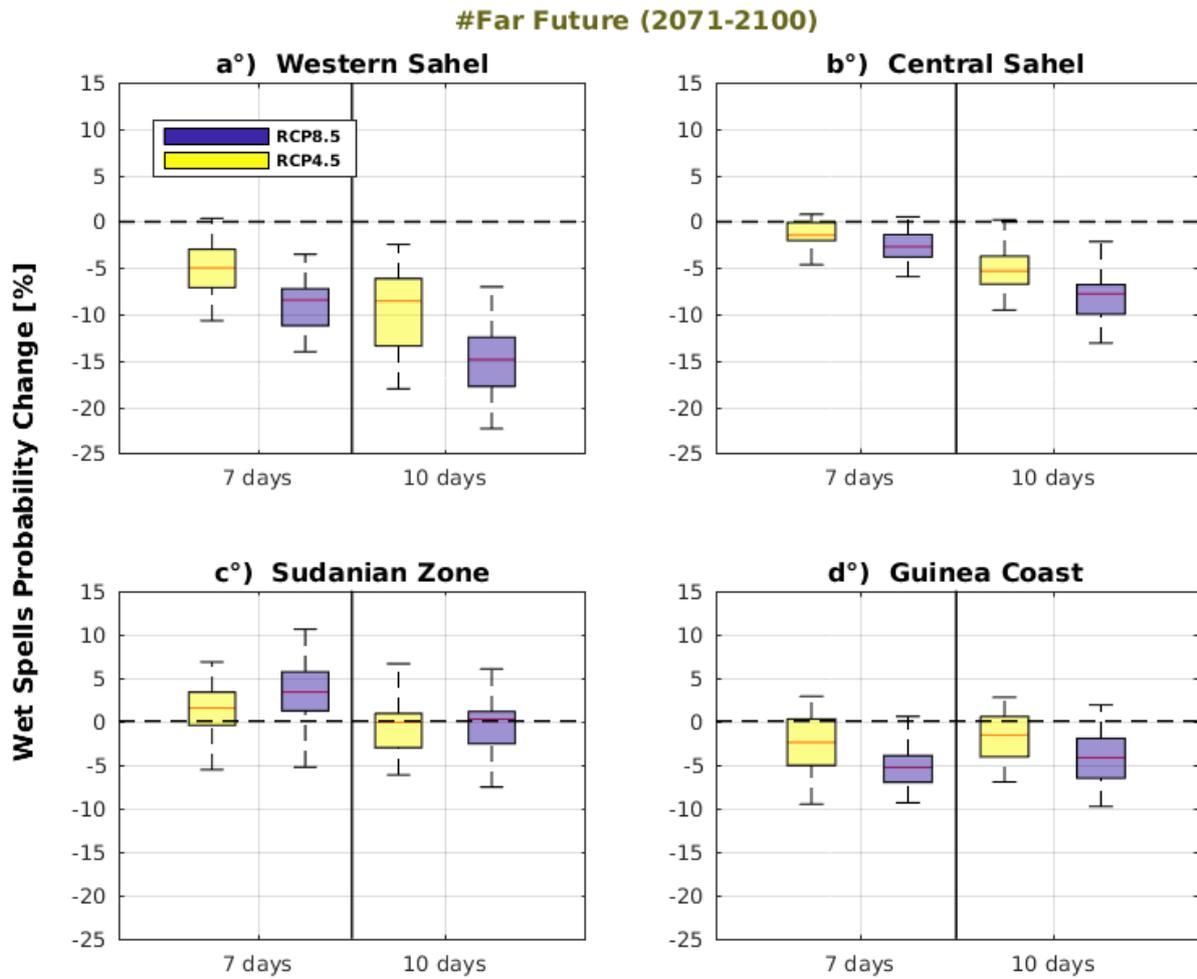


Figure 5.21: Identique à la figure 5.20, mais pendant le futur lointain

5.6 Variabilité spatiale des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides au Sénégal

La variabilité future des précipitations est présentée sur la figure 5.22. Il est prévu une diminution des précipitations moyennes au nord plus prononcée sous le scénario RCP4.5, jusqu'à -20% (Figure 5.22a) et une augmentation au sud-ouest (Ziguinchor) du Sénégal plus prononcée sous le scénario RCP8.5, jusqu'à 15% (Figure 5.22b) pendant le futur proche. La différence entre les scénarios (Figure 5.22c) montre que la diminution des précipitations moyennes saisonnières sera plus prononcée sous le scénario RCP4.5 dans la majeure partie du territoire sénégalais pendant le futur proche. Pendant le futur lointain, il est également prévu une diminution des précipitations dans la majeure partie du pays avec des baisses plus fortes au nord du pays et sous le scénario RCP8.5 de l'ordre de -35% (Figure 5.22e). La figure 5.22f qui affiche la différence entre les deux scénarios, montre clairement une diminution des précipitations plus prononcée durant le futur lointain que pendant le futur proche et sous le scénario RCP8.5.

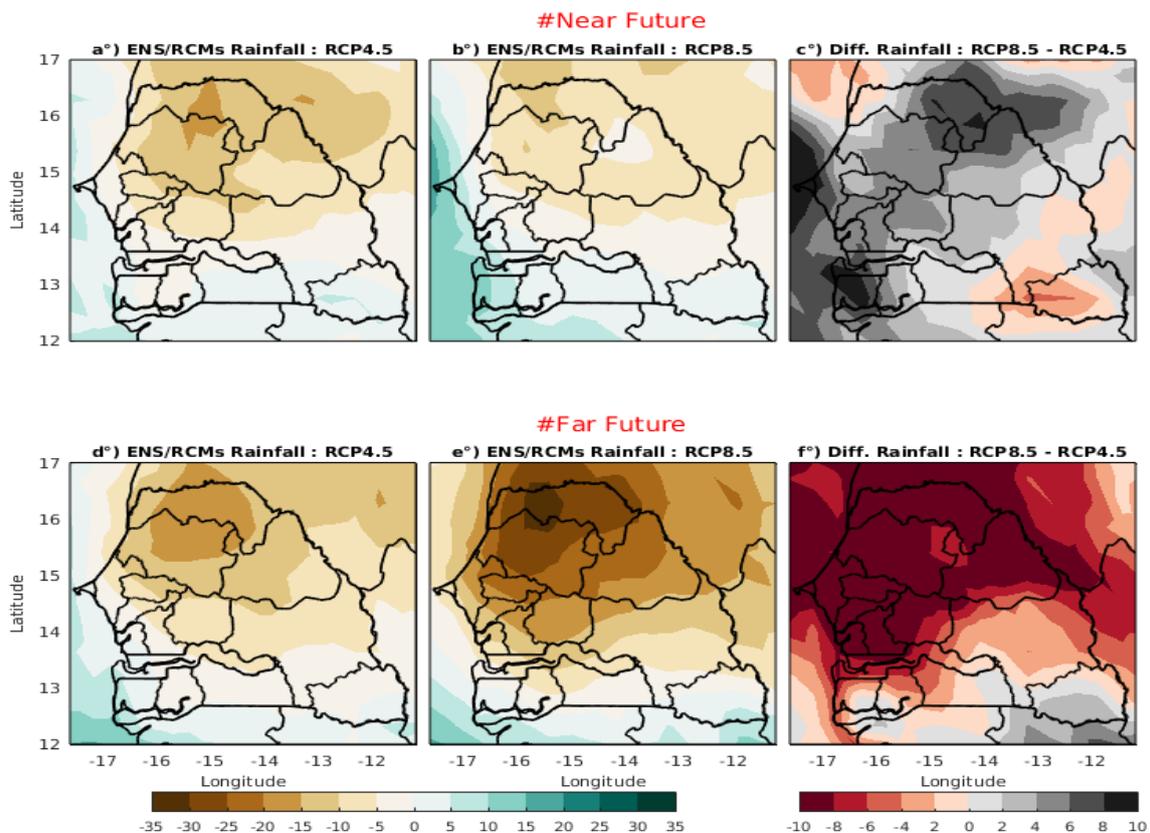


Figure 5.22 : Changement moyen des précipitations pour les scénarios RCP4.5 (a, d), RCP8.5 (b, e) et la différence entre les deux scénarios (c, f) à partir de la moyenne d'ensemble des quatre

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

modèles de l'expérience CORDEX-Africa durant le futur proche (2021-2050) (en haut) et le futur lointain (2071-2100) (en bas) au Sénégal.

Les changements sur les probabilités saisonnières des séquences sèches au Sénégal sont rapportés sur la figure 5.23 pendant le futur proche (2021-2050) pour les différentes durées (7 et 10 jours) et pour les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 ainsi que la différence entre les deux scénarios. Il est prévu une augmentation des probabilités des séquences sèches (i.e, 7 et 10 jours) sur presque l'ensemble du pays, avec des maxima atteignant 50% dans le cas des séquences sèches de 7 jours (Figure 5.23b) et jusqu'à plus de 80% dans le cas des séquences sèches de 10 jours (Figure 5.23e) à l'est du Sénégal. La différence entre les deux scénarios (Figure 5.23c, f) montre que l'augmentation des probabilités des séquences sèches (7 et 10 jours) sera plus prononcée sous le scénario RCP8.5 sur l'ensemble du pays, excepté le centre-ouest (Dakar, Thiès et Fatick) et le nord (Louga et Saint-Louis) du pays, où l'augmentation sera plus prononcée sous le scénario RCP4.5. L'évolution des probabilités des séquences sèches dans le futur lointain (Figure 24) est similaire à celle du futur proche. Néanmoins, les changements pendant le futur lointain sont plus importants par rapport au futur proche et sous le scénario RCP8.5 avec des valeurs pouvant atteindre plus de 80% sur presque tout le territoire sénégalais dans le cas des séquences sèches de 10 jours (Figure 24e).

Les changements des probabilités des séquences humides pendant le futur proche sont illustrés sur la figure 5.25 pour les différentes durées considérées et pour les deux scénarios ainsi que leur différence. Contrairement aux séquences sèches, une diminution des probabilités de jours consécutifs humides (i.e, 7 et 10 jours) est prévue dans le futur proche sous les deux scénarios sur l'ensemble du pays. Cette diminution sera plus remarquée dans la partie Nord (Louga) avec des valeurs pouvant atteindre -50% (séquences humides de 7 jours) et -60% (séquences humides de 10 jours) selon les deux scénarios. La différence entre les scénarios (Figure 5.25c, f) montre que la diminution sera plus prononcée dans la majeure partie du pays sous le scénario RCP8.5, excepté les zones comme Saint-Louis, Matam, Sud de Louga, Est de Kaffrine et Tambacounda où la diminution sera plus prononcée sous le scénario RCP4.5. Les changements pendant le futur lointain (Figure 5.26) sont similaires à ceux du futur proche. Néanmoins, les changements pendant le futur lointain sont plus importants par rapport au futur proche et sous le scénario RCP8.5 avec des valeurs pouvant atteindre -60% (séquences humides de 7 jours) et à plus de -80% (séquences humides de 10 jours) au Nord (Saint-Louis et Louga) du Sénégal. La différence

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

(Figure 5.25c, f) entre les scénarios montre que la diminution est plus prononcée sous le scénario RCP8.5 sur l'ensemble du pays. Cette variabilité des séquences humides est liée à la variabilité des précipitations moyennes saisonnières. Ces résultats sont en accord avec ceux de Sarr et Camara (2017) qui ont montré une augmentation du maximum de jours consécutifs secs et une diminution du maximum de jours consécutifs humides au Sénégal. Ces résultats sur les probabilités des séquences sèches et humides montrent qu'une irrigation supplémentaire pour les cultures d'été au Sénégal est nécessaire pour assurer une situation sans stress pendant la croissance des plantes cultivés.

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

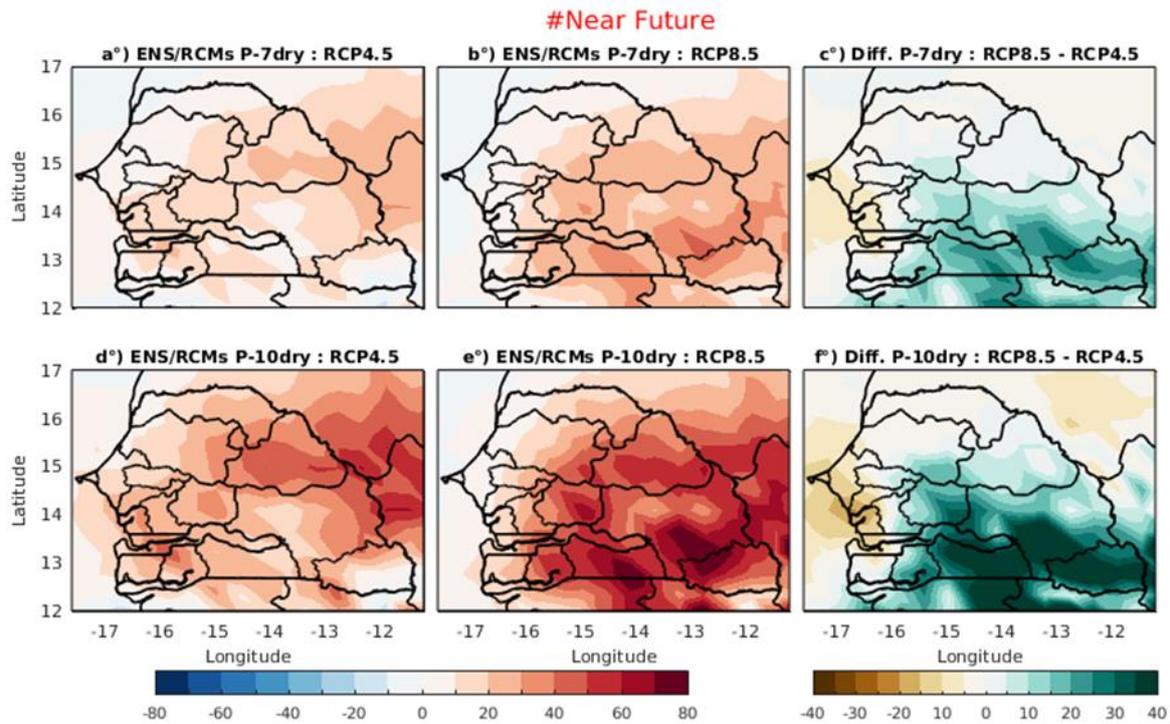


Figure 5.23 : Changement moyen pour les scénarios RCP4.5 (a, d) et RCP8.5 (b, e) par rapport à la période de référence et la différence entre les deux scénarios (c, f) pour les probabilités de périodes de sécheresse de 7 jours (en haut) et 10 jours (en bas) à partir de la moyenne d'ensemble des quatre modèles de l'expérience CORDEX-Africa durant le futur proche (2021-2050) au Sénégal.

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

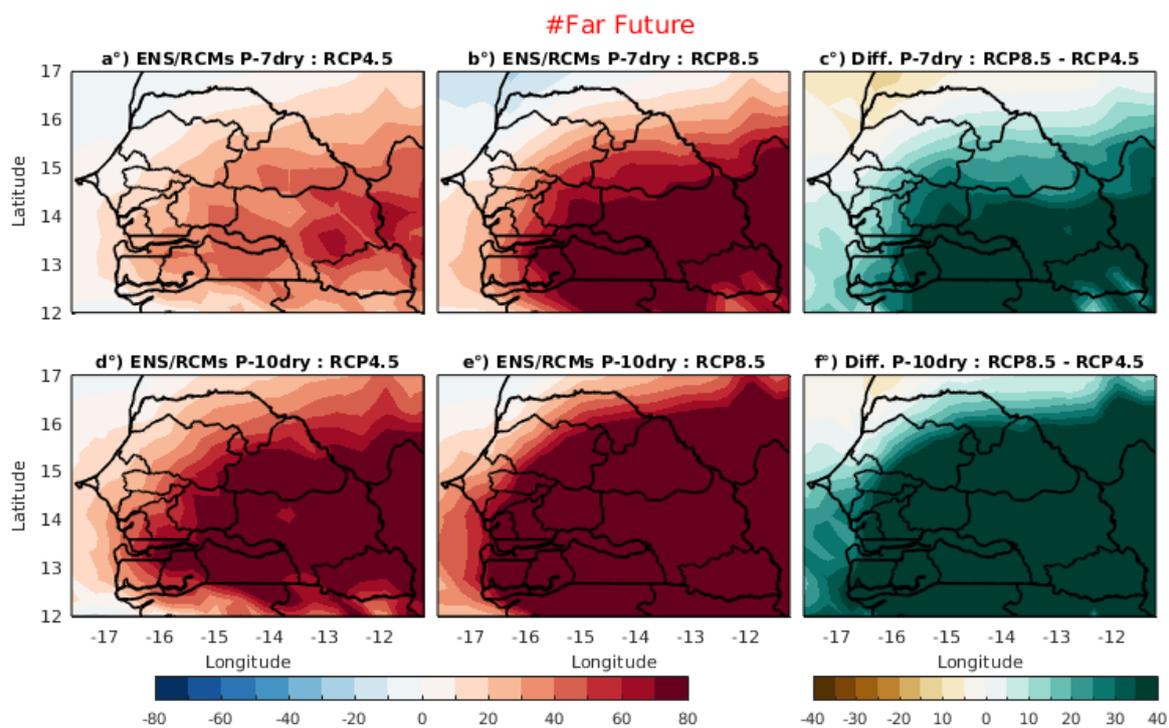


Figure 5.24 : Identique à la figure 5.23, mais pendant le futur lointain (2071-2100).

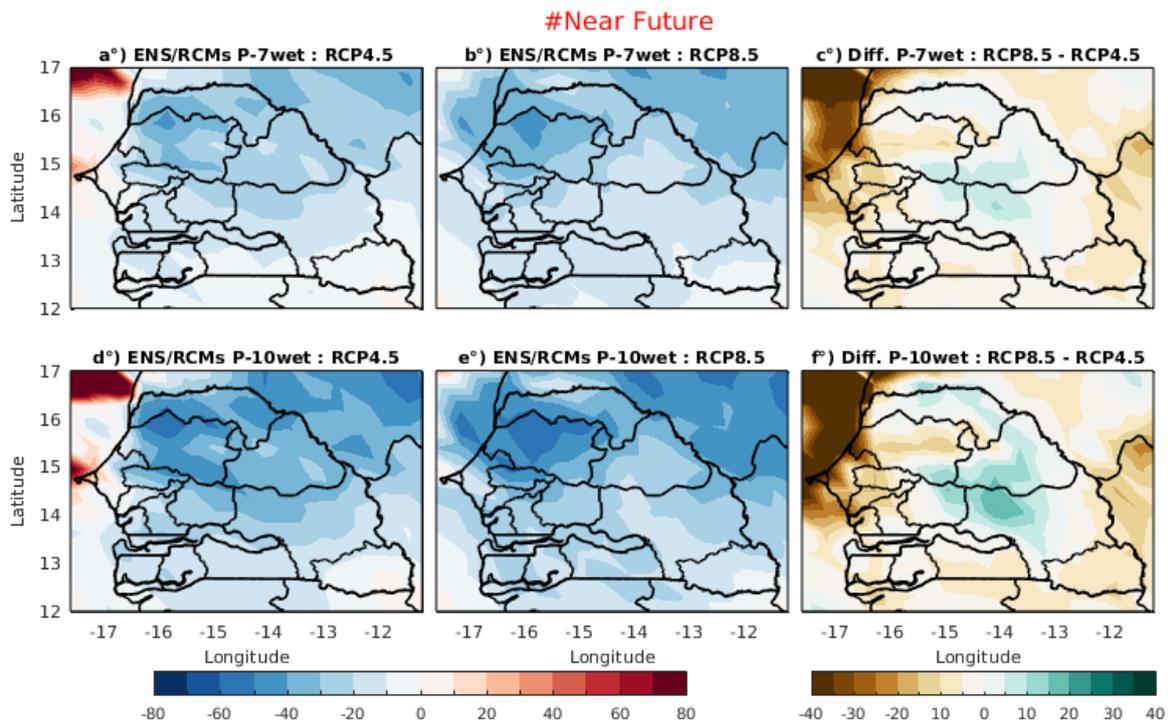


Figure 5.25 : Changement moyen pour les scénarios RCP4.5 (a, d) et RCP8.5 (b, e) par rapport à la référence et la différence entre les deux scénarios (c, f) pour les probabilités de périodes pluvieuses de 7 jours (en haut) et de 10 jours (en bas) à partir de la moyenne d'ensemble des quatre modèles de l'expérience CORDEX-Africa durant le futur proche (2021-2050) au Sénégal.

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

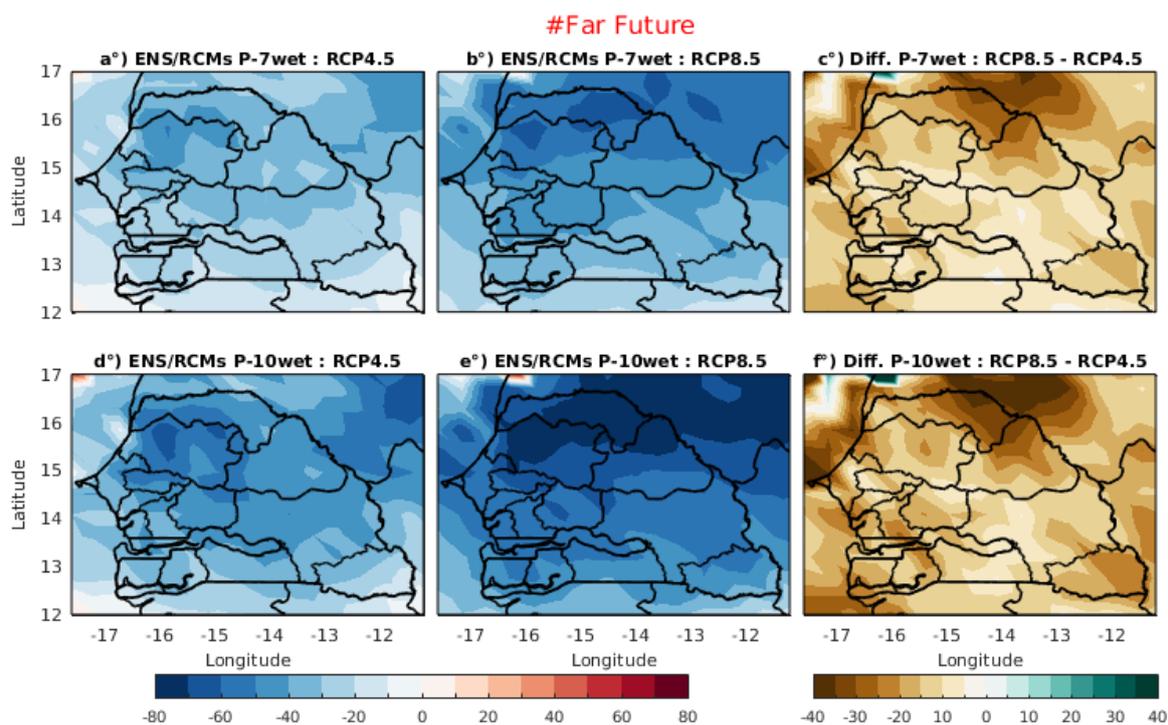


Figure 5.26 : Identique à la figure 5.25, mais pendant le futur lointain (2071-2100).

5.7 Evolution temporelle des précipitations et des probabilités des séquences sèches et humides au Sénégal

Cette section présente l'évolution temporelle des précipitations et des probabilités des séquences sèches et humides de durées 7 et 10 jours par rapport à la période de référence (1976-2005) sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. L'évolution future par rapport à la période de référence est faite pour les différentes zones climatiques du Sénégal (voir chapitre 2, figure 2.6).

Concernant les anomalies de précipitations estivales, le Sud du Sénégal (Figure 5.27a) est caractérisé par une succession de séquences humides et sèches sur toute la période considérée (1976-2100), bien qu'en majorité, on ait des phases humides. A l'Est du Sénégal (Figure 5.27b), une succession de phase humides et sèches est notée jusqu'aux années 2060. A partir de 2066, la plupart des années sont sèches selon les deux scénarios avec une tendance à la diminution particulièrement sous le scénario RCP8.5 à l'horizon 2100 (jusqu'à -10%). De même, une tendance à la diminution des précipitations par rapport à la période de référence est prévue selon les deux scénarios au Centre et au Nord du Sénégal (Figure 5.27c et d, respectivement) avec une hausse des phases sèches. Comme à l'Est du Sénégal, le scénario RCP8.5 montre des tendances à la baisse plus fortes dans les deux zones climatiques du Sénégal (jusqu'à plus -21% au Centre et à plus de -27% au Nord), ce qui suggère que les précipitations vont plus diminuer dans ces zones en raison du réchauffement global dû à l'augmentation des gaz à effet de serre.

L'évolution temporelle des probabilités des séquences sèches de 7 jours est présentée sur la figure 5.28a-d pour les quatre zones climatiques du Sénégal. Une tendance à l'augmentation de ces séquences est prévue sur toutes ces zones sous les deux scénarios de forçage. L'augmentation sera plus forte sous le scénario RCP8.5 à l'horizon 2100 et particulièrement au Sud du pays (jusqu'à 200% au Sud, 100% à l'Est et au Centre et 25% au Nord).

L'évolution temporelle des séquences sèches de 10 jours (Figure 5.29a-d) est similaire à celle de 7 jours. Néanmoins, les tendances à l'augmentation sont plus fortes par rapport aux séquences sèches de 7 jours et sous le scénario RCP8.5 particulièrement au Sud du pays (à plus de 230% au Sud, 150% à l'Est et au Centre et 50% au Nord). Un fort écart est noté entre les deux scénarios au Sud du pays à partir des années 2066.

L'évolution temporelle correspondante aux probabilités des séquences humides de 7 jours pour les quatre zones climatiques du Sénégal est illustrée sur les figures 5.30a-d. Contrairement aux séquences sèches, des tendances à la diminution des séquences humides de 7 jours sont prévues sur toutes les zones climatiques selon les deux scénarios surtout au Nord et au Centre du pays.

Chapitre 5 : Changements futurs des probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal

L'écart entre les deux scénarios est plus fort au nord (Figure 5.30d) du Sénégal à l'horizon 2100 avec des changements plus prononcés sous le scénario RCP8.5 (-15%). La série temporelle des séquences humides de 10 jours (Figure 5.31a-d) est assez similaire à celle de 7 jours. Néanmoins, les tendances à la diminution des séquences humides de 10 jours sont plus importantes et sous le scénario RCP8.5 (à plus de -15% au Sud, près de -9% à l'Est, à plus de -20% au Centre et à environ -30% au Nord).

Globalement dans le climat futur, la diminution des précipitations sera associée à l'augmentation des probabilités des séquences sèches et à la diminution des séquences humides dans la majeure partie du pays.

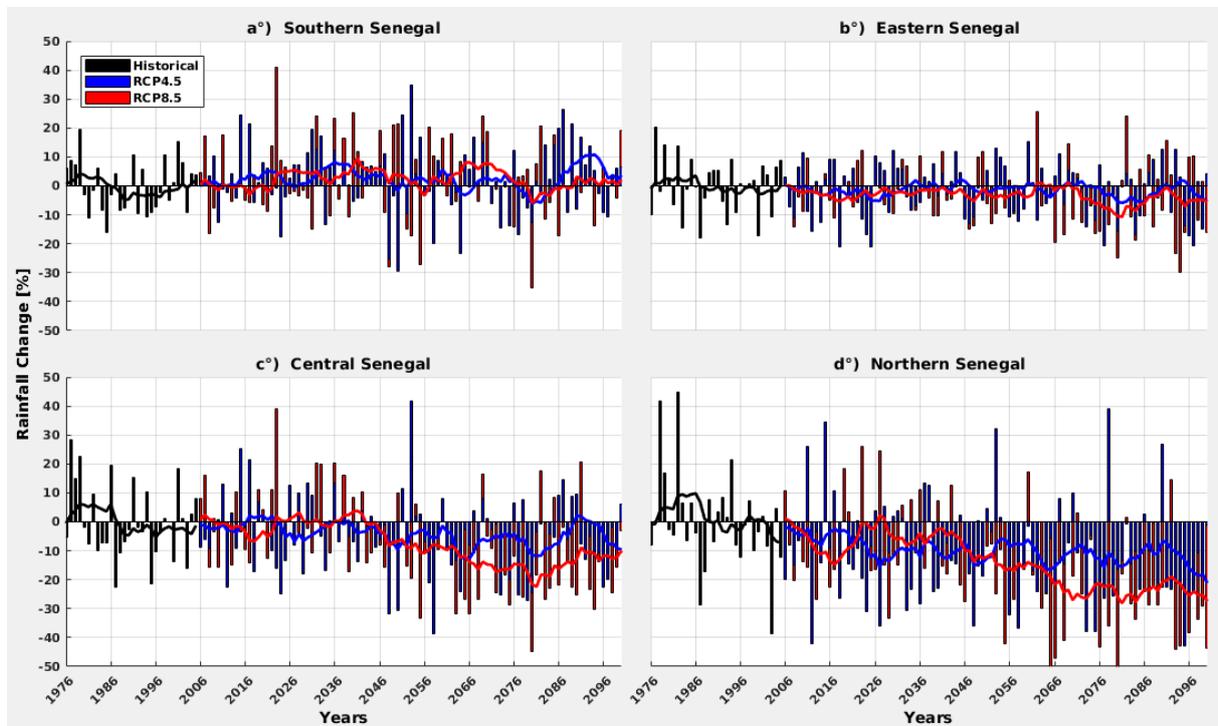


Figure 5.27 : Evolution temporelle des précipitations moyennées sur la période estivale (juillet à septembre) par rapport à la période de référence (1976-2005) au Sénégal: **a°)** Sud du Sénégal, **b°)** Est du Sénégal, **c°)** Centre du Sénégal et **d°)** Nord du Sénégal. Les moyennes glissantes sur 10 ans sont superposées sur chaque histogramme.

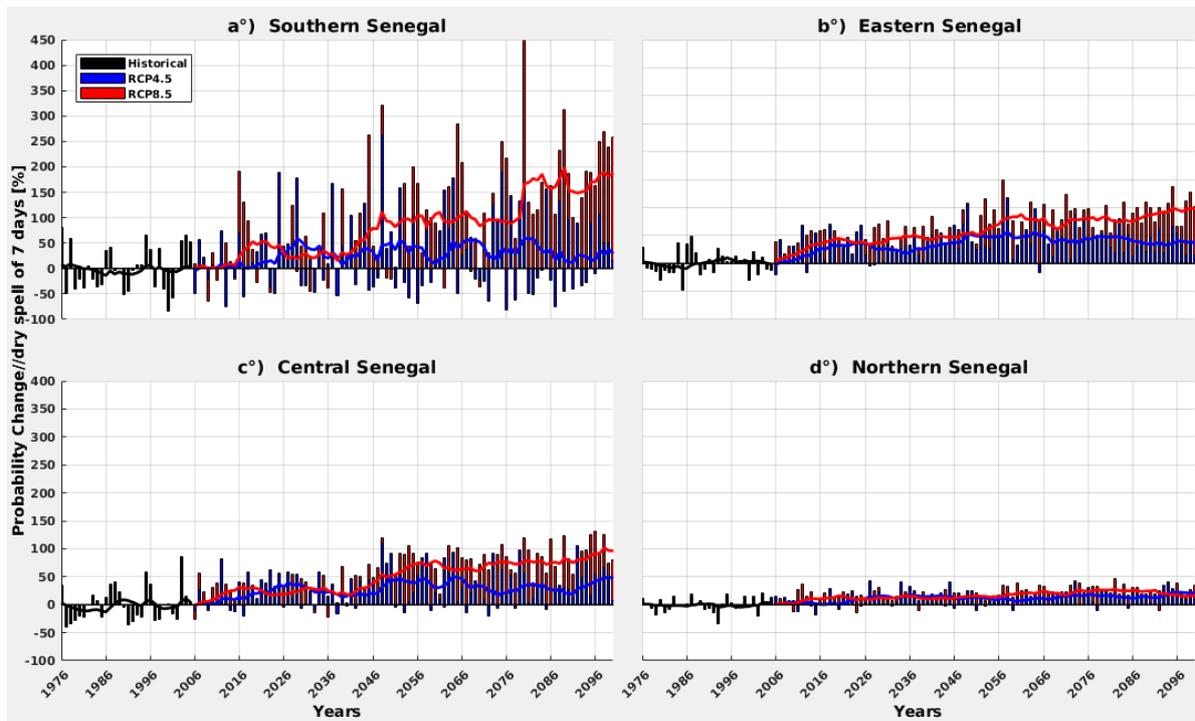


Figure 5.28 : Evolution temporelle des probabilités des séquences sèches de 7 jours moyennées sur la période estivale (juillet à septembre) par rapport à la période de référence (1976-2005) au Sénégal: **a**) Sud du Sénégal, **b**) Est du Sénégal, **c**) Centre du Sénégal et **d**) Nord du Sénégal. Les moyennes glissantes sur 10 ans sont superposées sur chaque histogramme.

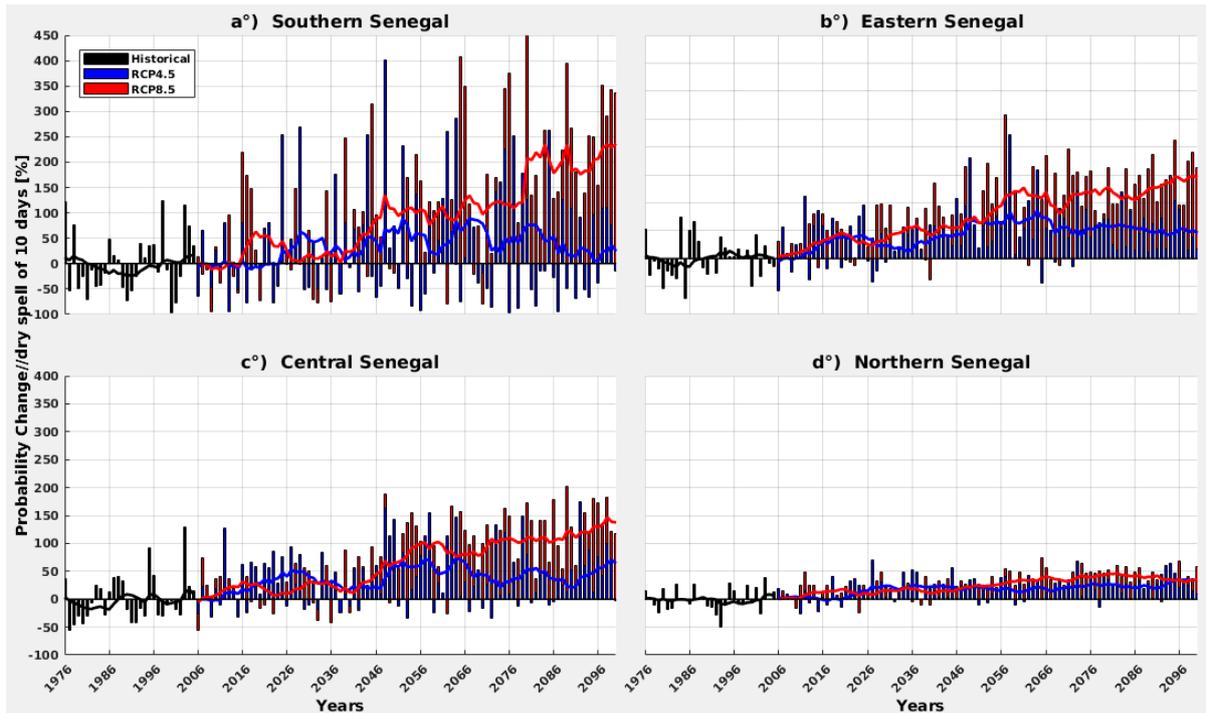


Figure 5.29 : Identique à la figure 5.28, mais pour les probabilités des séquences sèches de 10 jours.

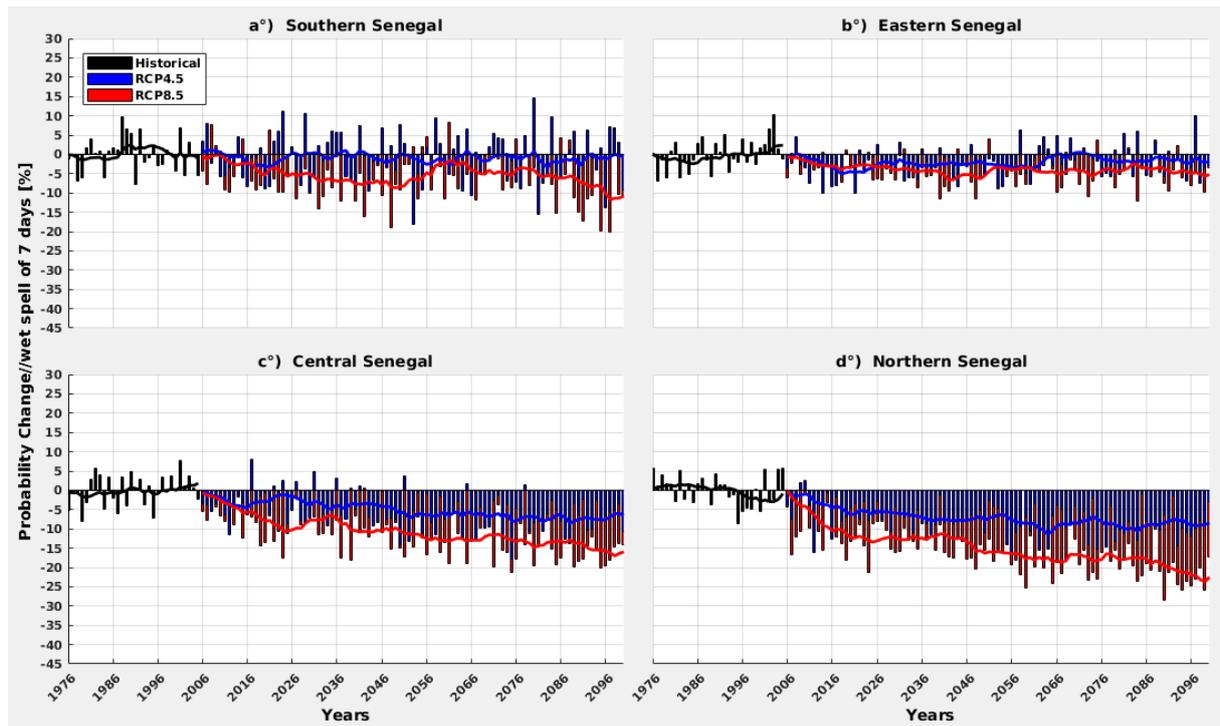


Figure 5.30 : Evolution temporelle des probabilités des séquences humides de 7 jours moyennées sur la période estivale (juillet à septembre) par rapport à la période de référence (1976-2005) au Sénégal: **a**) Sud du Sénégal, **b**) Est du Sénégal, **c**) Centre du Sénégal et **d**) Nord du Sénégal. Les moyennes glissantes sur 10 ans sont superposées sur chaque histogramme.

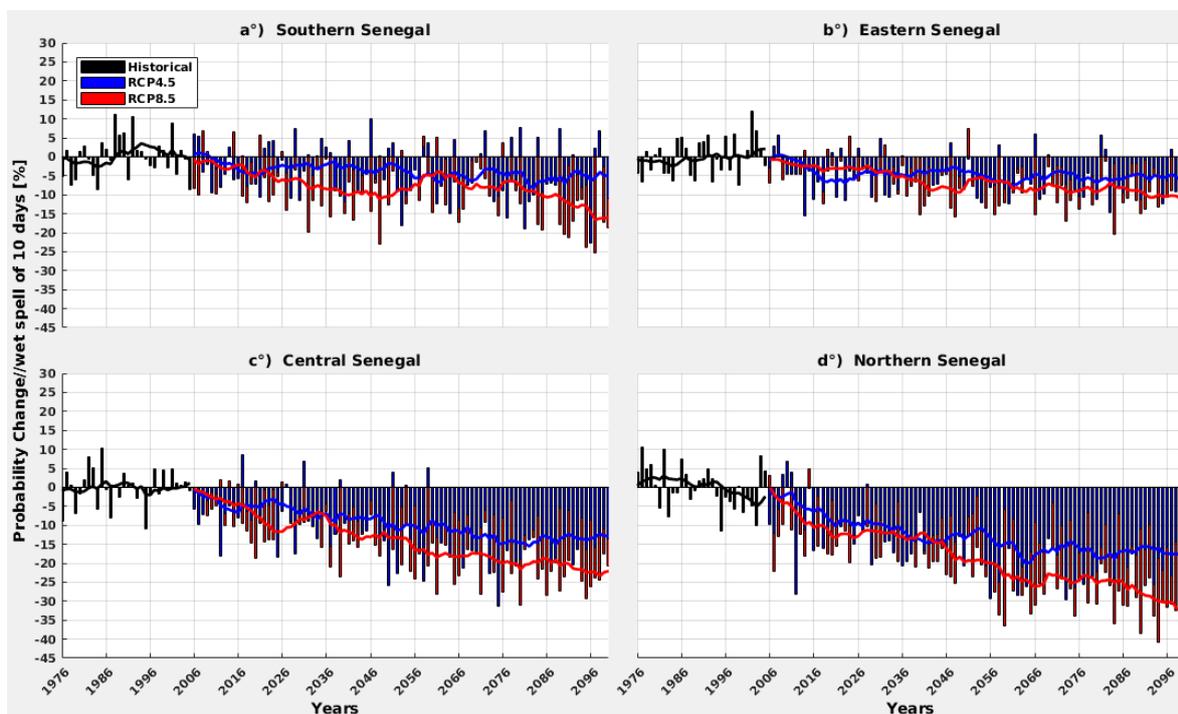


Figure 5.31 : Identique à la figure 5.30, mais pour les probabilités des séquences humides de 10 jours.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif général de l'étude est de diagnostiquer la variabilité spatiale des séquences sèches et pluvieuses, et de déterminer les facteurs qui en sont responsables aux échelles intrasaisonnières et interannuelles durant le climat présent et futur pendant la saison estivale en Afrique de l'Ouest. Pour atteindre cet objectif, l'étude s'est appuyée sur plusieurs jeux de données (observations satellitaires, réanalyses, sorties de modèles climatiques régionaux) et s'est déroulée en trois grandes parties qui peuvent être résumées comme suit :

1. La première partie présente les probabilités d'occurrence des séquences sèches et humides en Afrique de l'Ouest pendant la saison de mousson.
2. La deuxième partie est consacrée à la variabilité synoptique associée aux séquences sèches et humides au Sahel Ouest pendant la saison de mousson (Juillet-Septembre).
3. Enfin, la dernière partie présente l'évolution durant le futur proche (2021-2050) et le futur lointain (2071-2100) de probabilités des séquences sèches et humides en Afrique avec un focus sur le Sénégal.

Dans la première partie, le processus de chaîne de Markov a été utilisé pour évaluer les probabilités initiales, conditionnelles et consécutives de jours secs et humides pendant la saison de mousson en Afrique de l'Ouest. Les principaux résultats de cette partie montrent que la variabilité spatiale des probabilités d'avoir un jour humide (P_1) isolé, d'un jour humide précédé d'un jour humide (P_{11}), d'avoir un jour humide précédé d'un jour sec (P_{01}) et d'avoir des séquences humides restent élevée sur les régions à fortes précipitations (zones orographiques) pendant l'été boréal. Par contre, les probabilités d'avoir un jour sec (P_0), d'avoir un jour sec précédé d'un jour sec (P_{00}), d'avoir un jour sec précédé d'un jour humide (P_{10}) et d'avoir des séquences sèches restent plus faibles sur les régions à fortes précipitations. L'analyse du cycle saisonnier montre que la variation de probabilités P_{11} est similaire à celle de probabilités P_1 dans toutes les sous-régions. De même, la variation saisonnière de probabilités P_{00} est similaire à celle des probabilités P_0 dans toutes les sous-régions ouest-africaines considérées. A l'échelle interannuelle, les probabilités d'avoir un jour humide (sec) isolé montrent une tendance significative à la hausse (baisse) sur les régions sahéliennes. En ce qui concerne l'analyse de probabilités de transition, nos résultats montrent que les probabilités P_{00} (P_{01}) présentent une tendance à la baisse (augmentation) significative dans les régions sahéliennes tandis que les probabilités P_{11} et P_{10} sont non significatives dans la plupart de l'Afrique de l'Ouest. De plus,

les probabilités de séquences sèches plus courtes (3 jours) montrent une tendance significative à la baisse uniquement dans le Sahel Ouest. En outre, les périodes sèches plus longues (5, 7 et 10 jours) montrent une tendance à la baisse significative sur les régions sahéliennes, et seulement les jours secs consécutifs de 10 jours qui montrent une tendance à la baisse significative dans la zone Soudanienne. Sur le Golfe de Guinée, les probabilités des séquences sèches montrent une tendance à la hausse non significative.

La seconde partie de notre étude montre un net contraste entre les séquences sèches et humides lorsqu'on considère la circulation atmosphérique. Pendant les périodes humides (sèches), le JET à 200 hPa et le flux de mousson à 925 hPa présentent des valeurs plus élevées (plus faibles), qui coïncident avec un déplacement plus faible (plus fort) vers le nord (sud) du JEA à 700 hPa. Si l'on considère le profil vertical du vent vertical, il montre une intensification de la convection profonde sur le Golfe de Guinée et de la convection sèche sur les régions sahéliennes pendant les séquences humides. On observe également des valeurs de pression plus basses au Sahel pendant les séquences humides comparées aux séquences sèches, ainsi qu'une activité des OEA plus forte à 00:00. La différence plus remarquable d'humidité relative entre les deux séquences est notée au Sahel avec des valeurs plus élevées pendant les séquences humides. Dans les basses couches, le flux de mousson est plus intense à 06:00 sur le Sahel et au niveau du Golfe de Guinée pendant les séquences humides. Dans les moyennes couches, une augmentation de l'intensité du JEA (au sud de 15°N) est observée à 12:00 pendant les séquences sèches. Dans les hautes couches, l'intensité maximale du JET est observée à 00:00 pendant les deux périodes. Néanmoins, l'extension longitudinale du JET est plus importante pendant les séquences humides.

La dernière partie de la thèse est consacrée à l'étude de l'évolution future des probabilités initiales, de transition et de jours consécutifs secs/humides en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal. Les résultats indiquent qu'une diminution des précipitations est prévue dans la plupart des régions du nord de l'AO et une augmentation sur les régions du sud sous les deux scénarios. Les changements sont beaucoup plus prononcés dans le futur lointain ainsi que sous le scénario RCP8.5 (plus de 30%). Une augmentation (diminution) des probabilités P_0 , P_{00} et P_{10} (P_1 , P_{11} et P_{01}) d'environ 20% et 30% est prévue dans les régions sahéliennes tandis que les régions guinéennes connaissent une diminution (augmentation). Concernant les probabilités de jours consécutifs, nos résultats montrent une augmentation des probabilités d'avoir 7 et 10 jours consécutifs secs dans la plupart des régions sahéliennes jusqu'à plus de 100% dans le futur lointain et selon le scénario RCP8.5. Par contre, une

diminution est prévue dans les régions guinéennes d'environ 50% et 75% dans les deux scénarios. De même, une diminution de probabilités de séquences humides est prévue au Sahel d'environ 100% dans le futur lointain et selon scénario RCP8.5. En outre, ces caractéristiques sont associées à une forte variabilité des différentes probabilités avec des amplitudes de fluctuation plus importantes dans le climat futur dans les différentes zones d'AO. Des tendances à l'augmentation des probabilités P_0 , P_{00} et P_{10} et de séquences sèches dans le futur est prévue sur les régions sahéliennes et sur la zone Soudanienne avec des différences discernables entre les deux scénarios au Sahel. Au niveau du Golfe de Guinée, les probabilités P_0 , P_{10} , P_{00} et de séquences sèches montrent des tendances à une diminution dans le futur. En outre, lorsqu'on évalue les changements projetés sur les probabilités des séquences sèches, on peut remarquer que la caractéristique la plus marquante est l'augmentation projetée de ces dites séquences à la fois pour le futur proche et le futur lointain et dans le cadre des scénarios RCP4.5 et RCP8.5 dans le Sahel Ouest. Au Sénégal, il est également prévu une augmentation des séquences sèches (7 et 10 jours) plus forte pendant le futur lointain que pendant le futur proche et sous le scénario RCP8.5 (jusqu'à plus de 80% pour les séquences sèches de 10 jours) sur l'ensemble du pays particulièrement au sud du pays. De plus, il est prévu une baisse plus importante des séquences humides quelle que soit la catégorie pendant le futur lointain et sous le scénario RCP8.5 particulièrement au centre et au Nord du pays (jusqu'à -80% pour les séquences humides de 10 jours au nord du Sénégal).

Les résultats de la présente étude peuvent servir de support aux chercheurs travaillant dans les secteurs de l'agriculture et de la production alimentaire pour sélectionner des variétés de cultures (semis) qui peuvent résister à l'augmentation des séquences sèches prolongées au cours de la saison des pluies. De plus, la connaissance de la variabilité des séquences sèches et humides pourrait conduire les autorités étatiques (services techniques compétents) à rédiger un guide de planification des activités agricoles tenant compte des ressources en eau disponibles. Ainsi, les pertes en vies humaines et de bétail ainsi que la famine résultant d'une mauvaise récolte pourront être minimisées.

En guise de perspectives, des travaux futurs sont prévus pour étudier l'évolution des probabilités de transition et de jours consécutives (secs et humides) ainsi que les conditions atmosphériques associées à l'aide de nouvelles projections climatiques réalisées en réponse aux réchauffements climatiques de 1.5 et 2°C de l'accord de Paris en Afrique de l'Ouest avec un focus sur le Sénégal. De plus, les conditions dynamiques associées aux variations futures de la pluviométrie (moyenne et extrêmes) seront étudiées.

Bibliographie

- Afouda A, Adisso P (1997) Etude stochastique des structures de séquences sèches au Bénin. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 240, 43-50.
- Akinsanola AA, Zhou W (2020) Understanding the variability of West African summer monsoon rainfall : contrasting tropospheric features and monsoon index. *Atmosphere* 11:309. [https:// doi.org/10.3390/atmos11030309](https://doi.org/10.3390/atmos11030309)
- Arnaud M (1985) Contribution à l'étude stochastique markovienne des précipitations dans le bassin Adour-Garonne. Thèse de Doctorat, Toulouse, France, 350 p.
- Ayanlade A, Radeny M, Morton JF, Muchaba T (2018) Rainfall variability and drought characteristics in two agro-climatic zones : An assessment of climate change challenges in Africa. *Science of the Total Environment* 630:728-737.
- Badr HS, Dezfuli AK, Zaitchik BF, Peters-Lidard CD (2016) Regionalizing Africa: patterns of precipitation variability in observations and global climate models. *J Clim* 29:9027–9043.
- Bärring L, Holt T, Linderson ML, Radziejewski M, Moriondo M, Palutikof JP (2006) Defining dry/wet spells for point observations, observed area averages and regional climate model gridboxes in Europe. *Clim. Res.*, 31, 35-49.
- Basse J, Camara M, Diba I, Diedhiou A (2021) Probability of dry and wet spells over West Africa during the summer monsoon season - *Scientific Research and Essays*. 16(3): 20-35. Doi: 10.5897/SRE2021.6718
- Besag J, Mondal D (2013) Exact goodness-of-fit tests for Markov chains. *Biometrics* 69(2):488-496.
- Biao EI, Alamou EA (2018) Stochastic Modelling of Daily Rainfall for Decision Making in

- Water Management in Benin (West Africa). *Research journal of Advance Environmental Science* 1: 12-21.
- Biasutti M, Sobel AH, Camargo SJ (2009) The role of the Sahara low in summertime Sahel rainfall variability and change in the CMIP3 models. *J. Climate*, 22, 5755-5771, <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2969.1>.
- Bichet A, Diedhiou A (2018) West African Sahel has become wetter during the last 30 years but dry spells are shorter and more frequent. *Climate Research* 75(2):155-162.
- Bichet A, Diedhiou A (2018) Less frequent and more intense rainfall along the coast of the Gulf of Guinea in West and Central Africa (1981-2014). *Climate Research* 76(3):191-201.
- Bodian A (2012) Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau : application au haut bassin du fleuve Sénégal, *Physio-Géo, Volume 6 / -1, 3-5*. DOI: <https://doi.org/10.4000/physio-geo.2561>
- BouKaram D, Flamant C, Knippertz P, Reitebuch O, Chong M, Pelon J, Dabas A (2008) Dust emissions over the Sahel associated with the West African Monsoon inter-tropical discontinuity region: a representative case study. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 134: 621–634.
- Buckle C (1996) *Weather and climate in Africa*, Addison-Wesley Longman Ltd, Harlow, UK.
- Burpee RW (1972) Origin and structure of easterly waves in lower troposphere of North Africa. *J. Atmos. Sci.*, 29, 77–90.
- Cadet DL, Nnoli NO (1987) Water Vapour Transport over Africa and the Atlantic Ocean during summer 1979. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 113, 581-602.
- Ceballos A, Martinez-Fernandez J, Santos F, Alonso F (2002) Soil water behaviour of sandy soils under semiarid conditions in the Duero Basin (Spain). *J. Arid Environ.* 51, 501-519.

- Ceballos A, Martínez-Fernández J, Luengo-Ugidos MÁ (2004) Analysis of rainfall trends and dry periods on a pluviometric gradient representative of Mediterranean climate in the Duero Basin, Spain. *J. Arid Environ.* 58, 215-233.
- Chapman TG (1998) Stochastic modeling of daily rainfall: the impact of adjoining wet days on the distribution of rainfall amounts. *Environmental Modeling and Software*, 13, 317-324.
- Chen CS (1980) The effect of the gust front on the generation of new convection. Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, 197p.
<http://hdl.handle.net/2142/67804>
- Cook KH (1999) Generation of the African easterly jet and its role in determining West African precipitation. *Journal of climate*, 12(5), 1165-1184.
- Couvreux F, Guichard F, Bock O, Lafore JP, Redelsperger JL, Lothon M, Said F (2008) Taking the pulse of the monsoon flux over West Africa prior to the monsoon onset. In *18th Symposium on Boundary Layers and Turbulence*, Papers: 6B.1.
- Dabral P, Purkayastha K, Aram M (2014) Dry and wet spell probability by Markov chain model- a case study of North Lakhimpur (Assam) India. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 7(6):8-13. Doi: 10.3965/j.ijabe.20140706.002.
- Davis FD (1986) A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems: Theory and results. Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 291p.
- Diallo I, Camara M, Sylla M, Gaye AT (2010) Représentation haute résolution du système de mousson Ouest Africain avec un modèle climatique régional. *Journal des Sciences Pour l'Ingénieur* N°12 (2010) 75 – 85
- Didi SRM, Ly M, Kouadio K, Bichet A, Diedhiou A, Coulibaly HSJ, Kouadio KKA, Coulibaly TJH, Obahoundje S, Savané I (2020) Using the CHIRPS dataset to investigate historical changes in precipitation extremes in West Africa. *Climate*, 8(7), 84.

- Diedhiou A, Janicot S, Viltard A P de Felice (1998) Evidence of two regimes of easterly waves over West Africa and the tropical Atlantic. *Geophysical Research Letters* 25(15):2805-2808.
- Diedhiou A, Janicot S, Viltard A, De Felice P, Laurent H (1999). Easterly wave regimes and associated convection over West Africa and tropical Atlantic: results from the NCEP/NCAR and ECMWF reanalysis. *Clim Dyn* 15:795-822.
- Diedhiou A, Janicot S, Viltard de Félice P (2001) Composite patterns of easterly disturbances over West Africa and the tropical Atlantic: a climatology from the 1979-95 NCEP/NCAR reanalyses. *Climate Dynamics* 18: 241-253.
- Dobi-Wantuch I, Mika J, Szeidi L (2000) Modeling wet and dry spells with mixture distributions. *Meteo. Atmos. Phys.* 73, 245-256.
- Doto CV, Niang D, Zorom M, Yacouba H (2020) Statistical Study of Dry Spells and Their Impact on Rainfed Corn in the Burkina Faso Sahel. *American Journal of Water Resources* 8(1):31-37. Doi: 10.12691/ajwr-8-1-4.
- Douguedroit A (1987) The variation of dry spells in Marseilles from 1865 to 1984. *J. Climatol.*, 7, 541-551.
- Efon E, Lenouo A, Monkam D, Manatsa D (2016) Cloud properties during active and break spells of the West African summer monsoon from Cloud Sat-CALIPSO measurements. *J Atmos Solar Terr Phys* 145(2016):1-11.
- Eltahir E and Gong C (1996) Dynamics of wet and dry years in West Africa. *J. Climate*, 9, 1030-1042.
- Fall CMN, Lavayse C, Kerdiles H, Dramé MS, Roudier P, Gaye AT (2021). Performance of dry and wet spells combined with remote sensing indicators for crop yield prediction in Senegal. *Climate Risk Management* 33(2017):100331. Doi: 10.1016/j.crm.2021.100331
- Fatichi S, Caporali E (2009) A comprehensive analysis of changes in precipitation regime in

- Tuscany. *International Journal of Climatology* 29(13):1883-1893. Doi: 10.1002/joc.1921.
- Fink AH and Reiner A (2003) Spatiotemporal variability of the relation between African Easterly Waves and West African Squall Lines in 1998 and 1999. *Journal of Geophysical research*, Vol. 108, NO. D11, 4332, Doi: 10.1029/2002JD002816.
- Flamant C, Knippertz P, Parker DJ, Chaboureau JP, Lavaysse C, Agusti-Panareda A, Kergoat, L (2009) The impact of a mesoscale convective system cold pool on the northward propagation of the intertropical discontinuity over West Africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, 135(638), 139-159.
- Cottarelli C (2012) Fiscal regimes for extractive industries: Design and implementation. *International Monetary Fund*, 81pp. <https://www.imf.org/en/Publications/Policy-Papers/Issues/2016/12/31/Fiscal-Regimes-for-Extractive-Industries-Design-and-Implementation-PP4701>.
- Frei C, Christensen JH, Deque M, Jacob D, Jones RG, Vidale PL (2003) Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the European Alps. *J Geophys Res.*, 108, 4124.
- Froidurot S, Diedhiou A (2017) Characteristics of wet and dry spells in the West African monsoon system. *Atmospheric Science Letters* 18(3):125-131.
- Funk CC, Peterson PJ, Landsfeld MF, Pedreros DH, Verdin JP, Rowland JD, Romero BE, Husak GJ, Michaelsen JC, Verdin AP (2014) A quasi-global precipitation time series for drought monitoring. *U.S. Geological Survey* 832(4). Doi: 110.3133/ds832.
- Gabriel KR, Newman J (1962) A Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel Aviv. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 88(375):90-95.
- Giannini A, Saravanan R, Chang P (2003) Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales. *Science* 302, 1027-1030.

- Giorgi F, Jones C, Asrar GR (2009) Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *World Meteorological Organization (WMO) Bulletin*, 58(3), 175.
- Grist JP, Nicholson SE (2001) A study of dynamics factors influencing the rainfall variability in the west African Sahel. *Journal of Climate* 14(7):1337-1359.
- Grist JP, Nicholson SE, Barcilon AI (2002). Easterly waves over Africa. Part II: observed and modeled contrasts between wet and dry years. *Mon Weather Rev* 130:212–225.
- Halder D, Panda RK, Srivastava RK, Kheroar S, Singh SP (2016) Stochastic analysis of rainfall and its application in appropriate planning and management for Eastern India agriculture. *Water Policy* 18(5):1155-1173. Doi: 10.2166/wp.2016.240.
- Herold N, Behrangi A, Alexander LV (2017). Large uncertainties in observed daily precipitation extremes over land. *J Geophys Res Atmos* 122:668–681.
<https://doi.org/10.3390/atmos11030309>.
- Hastenrath S (1984) Interannual variability and annual cycle: Mechanisms of circulation and climate in the Tropical Atlantic sector. *Monthly Weather Review*, 112, 6, p. 1097-1107.
- Hastenrath S (2012) Climate and Circulation of the Tropics. *Springer Science & Business Media*. (Vol. 8), 464p. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-5388-8>.
- Huffman GJ, Adler RF, Bolvin DT, Nelkin EJ (2011) The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA), in Mekonnen Gebremichael, Faisal Hossain, Satellite rainfall applications for surface hydrology. *Netherlands, Springer*, p. 3-22.
- Huffman GJ, Bolvin DT, Nelkin EJ, Wolff DB, Adler RF, Gu G, Stocker EF (2007) The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA)-Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, v. 8, no.1, p. 38-55.
- Hulme M, Tosdevin N (1989) The Tropical Easterly Jet and Sudan rainfall. *Theor. And Appl. Climatol.*, 39, 179-187.

- Janicot S (1990) Variabilité des précipitations en Afrique de l'ouest et circulations quasi stationnaires durant une phase de transition climatique. Thèse de doctorat, Paris 6, 287p.
- Janicot S (1992) Spatio-temporal variability of West African rainfall. Part II: associated surface and air mass characteristics. *Journal of Climate* 5, 499-511.
- Janicot S, Mounier F, Hall N, Leroux S, Sultan B, Kiladis G (2009) The West African monsoon dynamics. Part IV: Analysis of 25-90-day variability of convection and the role of the Indian monsoon. *Journal of Climate* 22: 1541-1565.
- Janowiak JE, Joyce RJ, Yarosh Y (2001) A real-time global half-hourly pixel-resolution infrared dataset and its applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 82, no. 2, p. 205-217.
- Jenkins GS, Gaye AT, Sylla B (2005) Late 20th Century attribution of drying trends in the Sahel from the Regional Climate Model (RegCM3). *Geophys Res Lett* 32:L22705-GL024225.
- Kanamitsu M, Krishnamurti TN (1978) Northern Summer Tropical Circulations during Drought and Normal Rainfall Months. *Department of Meteorology, Florida State University, Tallahassee, Fla.* 32306. Doi: <http://dx.doi.org/10.1175/15200493>.
- Katz RW (1977) Precipitation as a chain-dependent process. *Journal of Applied Meteorology* 16(7):671-676.
- Kendall MG (1975) Edition 4. Rank correlation methods. *London. Charles Griffin*, 202p.
- Knapp KR, Ansari S, Bain L, Bourassa MA, Dickinson MJ, Funk C, Helms CN, Hennon CC, Holmes C, Huffman GJ, Kossin JP, Lee HT, Loew A, Magnusdottir G (2011) Globally gridded satellite (GriSat) observations for climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.92, no.7, p. 893-907.
- Kouadio K, Bastin S, Konare A, Ajayi VO (2018) Does convection-permitting simulate better rainfall distribution and extreme over Guinean coast and surroundings? *Climate Dynamics* 55(1):153-174.

- Lamb P (1978) Large-scale tropical Atlantic surface circulation pattern during recent sub-Saharan weather anomalies: 1967 and 1968. *Monthly Weather Review*, 106, p. 482-491.
- Lamb PJ, Pepler RA (1992) Further case studies of tropical Atlantic surface atmospheric and oceanic patterns associated with sub-Saharan drought. *Journal of climate*, 5(5), 476-488.
- Lamien N (2012) West Africa Agricultural Productivity Program (WAAPP).
http://www.coraf.org/documents/fiches_projets/West_Africa_Agricultural_Productivity_Program.pdf
- Lanzante, JR (1996) Resistant, robust and non-parametric techniques for the analysis of climate data: theory and examples, including applications to historical radiosonde station data. *International Journal of Climatology*, 16(11):1197-1226. Doi: 10.1002/(sici)1097-0088(199611)16:11<1197::aid-joc89>3.0.co;2-l.
- Larsen GA, Pense RB (1982) Stochastic simulation of daily climatic data for agronomic models. *J. Agron.*, 74: 510-514.
- Lavaysse C, Flamant C, Janicot S, Parker DJ, Lafore JP, Sultan B, Pelon J (2009) Seasonal evolution of the West African Heat Low: A climatological perspective. *Climate Dyn.* 33(2-3):313-330
- Lazaro R, Rodrigo FS, Gutierrez L, Domingo F, Puigdefabregas J (2001) Analysis of a 30-year rainfall record (1967-1997) in semi-arid SE Spain for implications on vegetation. *J. Arid Environ.* 48, 373-395.
- Le Barbé L, Lebel T, Tapsoba D (2002) Rainfall variability in West Africa: a hydrological perspective. *J. Climate*, 15, 187-202.
- Leroux M (1970) La dynamique des précipitations en Afrique Occidentale Publ. *Expl. Met. ASECNA, Serie I*, (23).
- Mann HB (1945) Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259.

- Mathon V, Laurent H (2002) Mesoscale convective system rainfall in the Sahel. *J. of App. Meteorol.* 41, 1081-1092.
- Mathoulthi M, Lebdi F (2008) Assessment of the reliability of reservoir dam operation for dry events. *Hydrological Sciences Journal* 53(6):1194-1207.
- Mathoulthi M, Lebdi F (2009) Analyse statistique des séquences sèches dans un bassin du nord de la Tunisie. *Hydrological Sciences Journal* 54(3): 442-455.
- Mitchell TD, Jones PD (2005) An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology. A Journal of the Royal Meteorological Society* 25(6):693-712.
- Mohan TS, Rao TN (2012) Variability of the thermal structure of the atmosphere during wet and dry spells over southeast India. *Q J R Meteorol Soc* 138:1839-1851.
- Mohan TS, Rao TN (2016). Differences in the mean wind and its diurnal variation between wet and dry spells of the monsoon over southeast India. *J Geophys Res Atmos* 121:6993-7006. <https://doi.org/10.1002/2015JD024704>.
- Moon SE, Ryoo SB, Kwon JG (1994) A markov chain model for daily precipitation occurrence in South Korea. *International Journal of Climatology* 14(9):1009-1016. Doi: 551.577.2 (519.5):519.217.
- Moss R, Edmonds J, Hibbard K et al. (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* **463**, 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>.
- Nicholson S (2005) On the question of the recovery of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environments* 63(3):615-641.
- Nicholson SE (2008) On the factors modulating the intensity of the tropical rainbelt over West Africa. *International Journal of Climatology. A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(5), 673-689.

- Nicholson SE (2008) The intensity, location and structure of the tropical rainbelt over west Africa as factors in interannual variability. *International Journal of Climatology* 28, 1775-1785.
- Nicholson SE, Grist JP (2001). A conceptual model for understanding rainfall variability in the West African Sahel on interannual and interdecadal timescales. *Int J Climatol* 21:1733-1757. <https://doi.org/10.1002/joc.648>.
- Nuga OA, Adekola LO (2018) A Markov chain analysis of rainfall distributions in three southwestern cities of Nigeria. *Research Journal of Physical Sciences* 6(4):1-5.
- Okoro UK, Chen W, Nath D (2018) Recent variations in geopotential height associated with West African monsoon variability. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 131(3), 553-565.
- Osei MA, Amekudzi LK, Quansah E (2021). Characterisation of wet and dry spells and associated atmospheric dynamics at the Pra River catchment of Ghana, West Africa. *J Hydrol Reg Stud* 34:100801.
- Pandharinath N (1991) Markov chain model probability of dry and wet weeks during monsoon periods over Andhra Pradesh. *Mausam* 42(4):393-400.
- Pandharinath N (1999) Markov chain model probability of dry, wet weeks during monsoon period over Andhra Pradesh. *Mausam*, 42, 393-400.
- Parker DJ, Burton RR, Diongue-Niang A, Ellis RJ, Felton M, Taylor CM, Thorncroft CD, Bessemoulin P, Tompkins AM (2005) The diurnal cycle of the west African monsoon circulation. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 131, 2839-2860.
- Perzyna, G (1994) Spatial and temporal characteristics of maximum dry spells in southern Norway. *Int. J. Climatol.*, 14, 895-909.
- Peyrille P (2006) Etude idéalisée de la mousson ouest-africain à partir d'un modèle numérique bi-dimensionnel. Thèse de doctorat, Toulouse 3, 206 p.

- Peyrille P, Lafore JP, Redelsperger JL (2007). An idealized two-dimensional framework to study the west African monsoon, parti 1: Validation and key controlling factors. *J. Atmos. Sci.*, 64, 2765-2782.
- Poméon B, Jakisch T, Diekkrüger D (2017) Evaluating the performance of remotely sensed and reanalysed precipitation data over West Africa using HBV light. *Journal of Hydrology* 547:222-235.
- Raheem MA, Ezepue PO (2016) A Three-State Markov Model for Predicting Movements of Asset Returns of a Nigerian Bank. *CBN Journal of Applied Statistics* 7(2):77-99.
- Raheem MA, Yahya WB, Obisesan KO (2015) A Markov chain approach on pattern of rainfall distribution. *Journal of Environmental Statistics* 7(1):1-13.
- Raj J, Bangalath HK and Stenchikov G (2018) West African Monsoon: current state and future projections in a high-resolution AGCM. *Clim Dyn* 52:6441–6461. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4522-7>.
- Richardson CW (1985) Weather simulation for crop management models. *Trans. ASAE*, 28:1602-1606.
- Roldan J and Woolhiser DA (1982) Stochastic daily precipitation models, 1. A comparison of occurrence processes. *Water Resour. Res.* 18: 1461-1468.
- Rossi RE, Lulla DJ, Journel AG, Franz EH (1992) Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecol. Monogr.* 62: 277-314.
- Rowell DP, Folland CK, Maskell K, Ward MN (1995) Variability of summer rainfall over Tropical North Africa (1906-1992): Observations and modelling. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 121, 669-704.
- Saha S, Moorthi S, Pan HL, Wu X, Wang J, Nadiga S, Reynolds RW (2010) The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), p. 1015-1057.

- Sall SM, Viltard A, Sauvageot H (2007) Rainfall distribution over the Fouta Djallon- Guinea. *Atmospheric Research* 86(2):149-161 Doi:10.1016/j.atmosres.2007.03.008.
- Sarr AB, Camara M (2017) Evolution des indices pluviométriques extrêmes par l'analyse de modèles climatiques régionaux du programme CORDEX: Les projections climatiques sur le Sénégal. *European Scientific Journal*. Vol.13, No.17 ISSN: 1857-7881 (print)e - ISSN 1857- 7431. Doi:10.19044/esg.2017.v13n17p206.
- Sarr AB, Camara M (2018) Simulation of the impact of climate change on peanut yield in Senegal. *International Journal of Physical Sciences* 13(5):79-89. Doi: 10.5897/IJPS2017.4710.
- Schamm K, Ziese M, Becker A, Finger P, Meyer-Christoper A, Schneider U, Schröder M, Stender P (2014) Global gridded precipitation over land: a description of the new GPCC First Guess Daily product. *Earth System Science Data* 6(1):49-60.
- Selvaraj RS, Selvi ST (2011) Stochastic modelling of daily rainfall at Aduthurai. *Research Journal of Science and Technology* 3(2):80-84.
- Shahraki N, Bakhtiari B, Ahmadi MM (2013) Markov chain model for probability of dry wet days and statistical analysis of daily rainfall in some climatic zone of Iran. *Aerul și Apa: Componente ale Mediului* 2013:399-406.
- Shannon CE (1948) A Mathematical Theory of Communication. Reprinted with corrections. *The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656.
- Sifer K, Yemenu F, Kebede A, Quarshi S (2016) Wet and dry spell analysis for decision making in agricultural water management in the eastern part of Ethiopia West Haraghe. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering* 8(7):92-96.
- Simmons A, Uppala S, Dee D, Kobayashi S (2007). ERA-Interim: new ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsletter* 110:25–35.
- Sivakumar MVK (1992) Empirical analysis of dry spells for agricultural applications in West

- Africa. *Journal of Climate* 5(5):532-539.
- Sonnadara DUJ, Jayewardene DR (2015) A Markov chain probability model to describe wet and dry patterns of weather at Colombo. *Theoretical and Applied Climatology* 119(1):333-340 Doi: 10.1007/s00704-014-1117-z.
- Stern RD, Cooper PMJ (2011) Assessing climate risk and climate change using rainfall data: a case study from Zambia. *Experimental Agriculture* 47(2):241-266.
- Sultan B, Janicot S (2000) Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra seasonal variability. *Geophysical Research Letter*, 27(20):3353-3356.
- Sultan B, Janicot S (2003) The West African monsoon dynamics. Part II: the "preonset" and "onset" of the Summer Monsoon. *J Clim* 16:3407–3427. <https://doi.org/10.1175/1520-0442>.
- Sultan B, Janicot S, Drobinski P (2007) Characterization of the diurnal cycle of the West African Monsoon around the Monsoon Onset. *Journal of Climate* 20(15):4014-4032.
- Sylla MB, Coppola JS, Mariotti L, Giorgi F, Ruti PM, Dell'Aquila A, Bi X (2009) Multiyear simulation of the African Climate using a regional climate model RegCM3 with the high resolution ERA-Interim. *Climate dynamics*, 35(1), 231-247, doi: 10.1007/s00382-009-0613-9
- Sylla MB, Dell'Aquila A, Ruti PM, Giorgi F (2010) Simulation of the intraseasonal and the interannual variability of rainfall over West Africa with a RegCM3 during the monsoon period. *Int J Climatol* 30:1865-1883.
- Sylla MB, Diallo I, Pal JS (2013) West African monsoon in state-of-the-science regional climate models. *Climate Variability-Regional and Thematic Patterns*, 10(55140), 1805-1817.
- Taylor CM, Belušić D, Guichard F, Parker DJ, Vischel T, Bock O, Harris PP, Janicot S, Klein C, Panthou G (2017) Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. *Nature* 544(7651):475-478.

- Tettey M, Oduro FT, Adedia D, Abaye DA (2017) Markov chain analysis of the rainfall patterns of five geographical locations in the south eastern coast of Ghana. *Earth Perspectives* 4(1):1-11.
- Thirriot C (1986) Simplicité et efficacité des chaînes de Markov comme modèle de la pluviométrie. *Arch Hydrot*, 23, 1-2.
- Thorncroft CD, Blackburn M (1999) Maintenance of the African easterly waves, Part I: A linear view. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 125, 763-786.
- Thorncroft C, Hodges K (2001). African easterly wave variability and its relationship to Atlantic tropical cyclone activity. *J Climate* 14:1166-1179.
- Todorovic P, Woolhiser DA (1975) A Stochastic Model of n Day Precipitation. *Journal of Applied Meteorology* 14:17-24.
- Uppala SM, Dee D, Kobayashi S, Berrisford P, Simmons A (2008) Towards a Climate Data Assimilation System: Status Update of ERA-Interim. *ECMWF Newsletter*, 115, 12-18.
- Ward NM (1998) Diagnosis and short-lead time prediction of summer rainfall in tropical North Africa at interannual and multidecadal timescales. *Journal of Climate*, 11, 3167-3191.
- Watson RT, Noble IR, Bolin B, Ravindranath NH, Verardo DJ, Dokken DJ (2000) Land use, land-use change and forestry: a special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, UK. 375p.
- Wu MLC, Reale O, Schubert SD (2013) A characterization of African easterly waves on 2.5-6 day and 6-9 day time scales. *Journal of Climate* 26(18):6750-6774.
- Yapo ALM, Diawara A, Kouassi BK, Yoroba F, Sylla MB, Kouadio K, Tiémoko DT, Koné DI, Akobé EY, Yao KPAT (2020) Projected changes in extreme precipitation intensity and dry spell length in Côte d'Ivoire under future climates. *Theor Appl Climatol* 140, 871–889. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03124-4>.
- Yoo C, Lee J, Ro Y (2016) Markov Chain Decomposition of Monthly Rainfall into Daily

Rainfall: Evaluation of Climate Change Impact. *Advances in Meteorology*, 2016, 1-10.
<https://doi.org/10.1155/2016/7957490>.