

Analyse De La Pluviométrie Dans Les Rivières Du Sud : Cas De La Basse Casamance (Sénégal) Au Rio Gêba En République De Guinée

Mbagnick FAYE¹, Dome TINE², Souleymane DIALLO³, Oumar Harouna SY⁴

¹ Laboratoire de Climatologie et d'Environnement (LCE)- Département de Géographie, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar- Sénégal. E-mail : fayedoudou85@yahoo.fr

² Département de Géographie, Laboratoire de Télédétection Appliquée (LTA), Université Cheikh Anta DIOP de Dakar- Sénégal. E-mail : dome.tine@ucad.edu.sn

³ Département of Géographie - Laboratoire de géographie physique, Université Cheikh Anta DIOP (UCAD) de Dakar, Sénégal. Email : timsouley@gmail.com

⁴ Département de Géographie, Faculté des Lettres et Sciences humaines, Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Email : oumarharounasy@hotmail.com



Résumé – La pluviométrie est une variable climatique fréquemment utilisée pour étudier l'évolution du climat en Afrique tropicale. Les études récentes basées sur ce paramètre ont révélé une forte fluctuation de celui-ci en Afrique de l'ouest. Cette variabilité se traduit par la récurrence de la sécheresse et la migration vers le sud des isohyètes entraînant une « sahelisation » des zones soudaniennes. Ce glissement climatique est surtout noté à la fin des années 1960 traduisant un changement dans les lois de distribution des variables hydro-pluviométriques.

L'objectif de cette étude consiste à mieux appréhender l'évolution de la pluviométrie dans la partie septentrionale des Rivières du Sud à travers l'indice Pluviométrique Standardisé (IPS), les tests de Pettitt et de Mann-Kendall. Il ressort des résultats de l'IPS une légère supériorité des années sèches par rapport aux années humides à Ziguinchor (20% années sèches contre 14% années humides) et à Cap Skiring avec 22% d'années sèches contre 20% d'années humides. A la station de Bissau, le nombre d'année humide est proportionnel aux années sèches (18%). Cela se traduit, selon le test de Pettitt, par une absence de rupture à Bissau et la présence de ruptures à Ziguinchor en 2004 et à Cap Skiring en 1976. Le test de Mann-Kendall révèle que seule la station de Cap Skiring présente une hypothèse alternative H_a . La p-value (0,006) étant inférieure au seuil alpha (0,05), le test affiche une tendance dans la série.

Mots clés – Changement climatique, Pluviométrie, Rivières du Sud, Sécheresse, Tendance.

Abstract – Rainfall is a climatic variable frequently used to study climate change in tropical Africa. Recent studies based on this parameter have revealed a strong fluctuation of rainfall in West Africa. This variability is reflected in the recurrence of drought and the southward migration of isohyets, leading to a "sahelisation" of the Sudanian zones. This climatic shift is especially noted at the end of the 1960s, reflecting a change in the distribution laws of the hydro-rainfall variables. The objective of this study is to better understand the evolution of rainfall in the northern part of the Southern Rivers through the Standardised Rainfall Index (SRI), the Pettitt and Mann-Kendall tests. The SPI results show that dry years are slightly more frequent than wet years in Ziguinchor (20% dry years compared to 14% wet years) and in Cap Skiring with 22% dry years compared to 20% wet years. At the Bissau station, the number of wet years is proportional to the dry years (18%). According to the Pettitt test, this translates into no breaks in Bissau and the presence of a break in Ziguinchor in 2004 and in Cap Skiring in 1976. The Mann-Kendall test reveals that only the Cap Skiring station has an alternative hypothesis, H_a . The p-value (0.006) is below the alpha threshold (0.05), so the test shows a trend in the series.

Key words – Climate change, Rainfall, Southern rivers, Drought, Trend.

I. INTRODUCTION

Tous les rapports du GIEC (Groupe Intergouvernemental des Experts sur l'Évolution du Climat) ont prévu une augmentation des températures et des extrêmes pluviométriques sur une courte durée, particulièrement en Afrique de l'Ouest. Ils affirment également que l'Afrique est le continent le plus vulnérable au changement climatique à cause de l'importance des impacts projetés bien que ses émissions de gaz à effet de serre soient négligeables. Cette vulnérabilité est due entre autres à la fréquence des sécheresses, la faiblesse de la résilience face aux effets du changement du climat, la forte dépendance des populations à l'agriculture et la dégradation croissante des ressources naturelles. Les études climatiques [1], [2], [3] in [4], [5], ont confirmé par ailleurs, les séries de sécheresse qui ont frappé l'Afrique de l'Ouest à partir des années 1970. Ces épisodes de modification climatique ont attiré l'attention des chercheurs sur la dynamique du climat Ouest-africain. Elles marquent la rupture climatique au Sahel avec un comportement pluviométrique qui n'a été observé dans aucune autre région du monde, [6]. Cette évolution est observée dans plusieurs stations météorologiques Ouest Africaines et a eu sans doute des impacts dramatiques sur les ressources naturelles et les activités socioéconomiques de la sous-région. Vu que le développement du continent Africain, en générale, repose en grande partie sur l'agriculture, il est important de cerner les tendances évolutives de son climat. Dans un contexte de changement climatique, les mesures d'adaptation et de prévention des risques nécessitent une bonne compréhension des aléas climatiques.

Les causes de ces modifications climatiques sont liées, selon [7] et [8], aux anomalies de Température de Surface Océanique (TSO) de l'Atlantique et à leurs variations inter-décennales dans les deux hémisphères. Le réchauffement des eaux favorise une augmentation de la convergence d'humidité sur les régions sahéliennes, et une fin de saison des pluies plus arrosée que la normale en septembre, [8] in [9]. La littérature autour de la dynamique du climat Ouest Africain est nombreuse et très diversifiée avec des conclusions souvent concordantes en ce qui concerne la détection des épisodes de sécheresse notamment dans les années 1970, 1980 et 1990. Ces modifications climatiques sont souvent étudiées à l'échelle globale mais un problème de données se pose à chaque fois qu'on veuille les observer à l'échelle fine.

La disponibilité des données, *in situ*, constitue un réel problème quand il s'agit d'étudier la dynamique du climat Ouest Africain. Face aux enjeux importants du changement climatique, le manque de données *in situ* empêche une compréhension complète de son climat [10]. Le choix des réanalyses, des données de WorldClim et de CHIRPS justifie cette absence de données météorologiques sur une longue période. Bien que l'analyse et la validation des résultats de ces modèles climatiques globaux ainsi que les mesures satellitaires soient difficiles à cause des incertitudes sur les observations et les données simulées, ils constituent une solution majeure face à cette problématique [10].

II. LE DOMAINE DE L'ÉTUDE

Au point de vue climatique, le domaine étudié appartient au domaine libéro-guinéen au Sud [11] qui est une sous-division du climat tropical. La région est caractérisée par deux saisons dues à l'alternance de la circulation des alizés et de la mousson. Une saison non pluvieuse de novembre à avril et une saison pluvieuse de mai à octobre. La pluviométrie est relativement abondante (supérieure à 1000 mm par an). Cette abondance est essentiellement liée au fort potentiel précipitable advecté et au relief qui conditionne la translation estivale de la zone intertropicale de convergence [12].

L'espace étudié se situe dans la partie septentrionale qui est comprise entre 11° 28' et 13°11' latitude Nord et 16°48' et 15°06' longitude Ouest et qui s'étend de la basse Casamance au Rio Gêba. Vu que la résolution spatiale des données utilisées ne donne pas la possibilité d'étudier l'évolution climatique à l'échelle régionale, nous avons choisi une couverture spatiale beaucoup plus adéquate à l'image de la partie Ouest africaine. Il est compris entre 15° Ouest et 6° Est et 3° et 24° Nord.

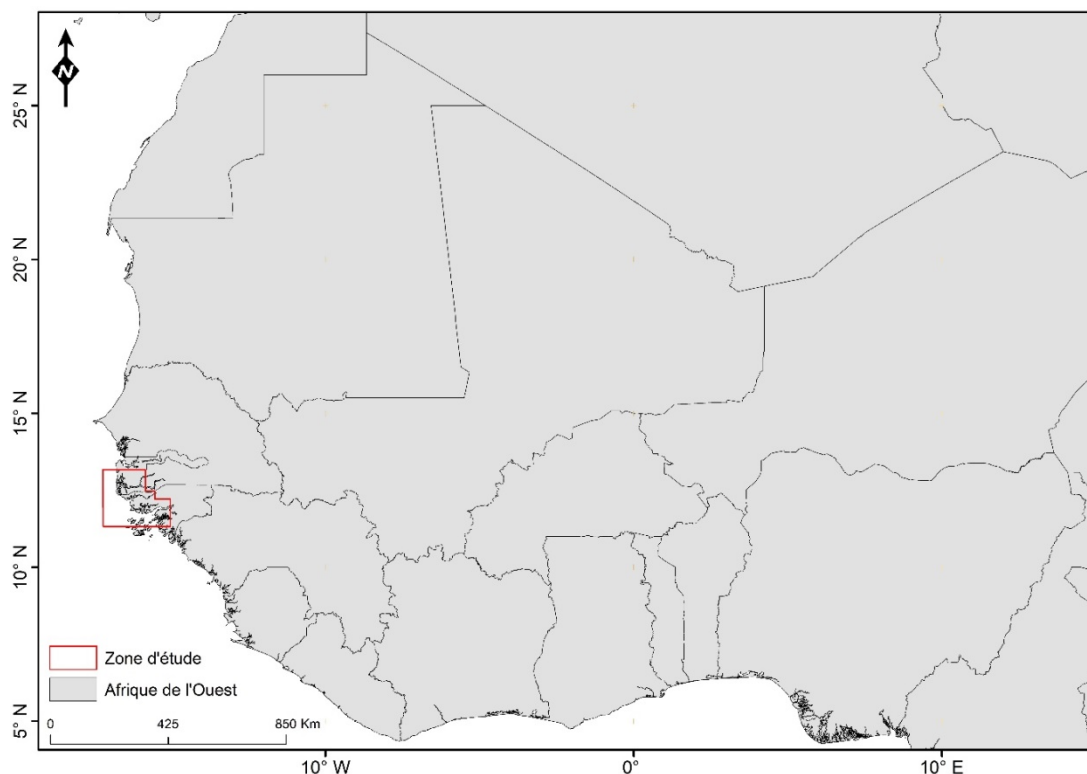


Figure 1: Situation géographique de l'espace étudié.

III. MATERIELS ET METHODES

3.1. Description des données utilisées

Pour caractériser l'évolution pluviométrique dans les Rivières du Sud, nous avons comparé des séries de données météorologiques de sources différentes sur une période de 30 ans d'observation. Il s'agit des données CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station) qui sont un ensemble de données qui combine des données provenant d'observations au sol et les observations par satellite pour produire des estimations journalières et mensuelles de la pluviométrie à une haute résolution spatiale de $0.05 \times 0.05^\circ$; les données de WorldClim, composées de données pluviométriques et de températures moyennes minimales et moyennes maximales ainsi que 18 variables bioclimatiques disponibles à 4 résolutions spatiales différentes : $0,86 \text{ km}^2$ et 344 km^2 à l'équateur et s'étendent sur une longue période allant de 1960 à 2000 pour les observations et des simulations allant jusqu'en 2100. Ces données sont téléchargeables gratuitement avec des formats facilement exploitables. En fin les réanalyses météorologiques du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT/ECMWF) sont également utilisées. Ces dernières sont un ensemble de données climatologiques issues de réanalyses numériques de données d'observations (stations, bouées, radiosondages, observations aériennes) à l'aide d'un système d'assimilation, [13] in [2]. Les observations utilisées pour la réanalyse ERA 40 incluent principalement les données d'archives du ECMWF mais également celles provenant de différents pays et organisations. La réanalyse ERA 40 utilise une grille gaussienne de résolution horizontale d'environ 125 km. Par contre, les données disponibles sont généralement de 2.5 degrés latitude x 2.5 degrés longitude. Ces données sont disponibles entre 1000 hPa et 10 hPa [14].

Les analyses climatiques effectuées sur ces données sont conservées par les centres de prévisions météorologiques. Ces archives d'analyses, considérées comme caduques en raison des évolutions des modèles climatiques et présentant des ruptures d'homogénéité et de qualité, sont actualisées, homogénéisées et validées. Tous les modèles de simulation météorologique présentent des limites en raison du caractère aléatoire des éléments caractéristiques. L'intérêt des réanalyses réside dans la possibilité d'utilisation de données archivées et la correction des données manquantes dans certaines zones en manque d'observation. Les réanalyses météorologiques sont constituées de séries d'observations des paramètres atmosphériques du modèle telle que la température, échantillonnées toutes les 6 heures et maillées sur le globe.

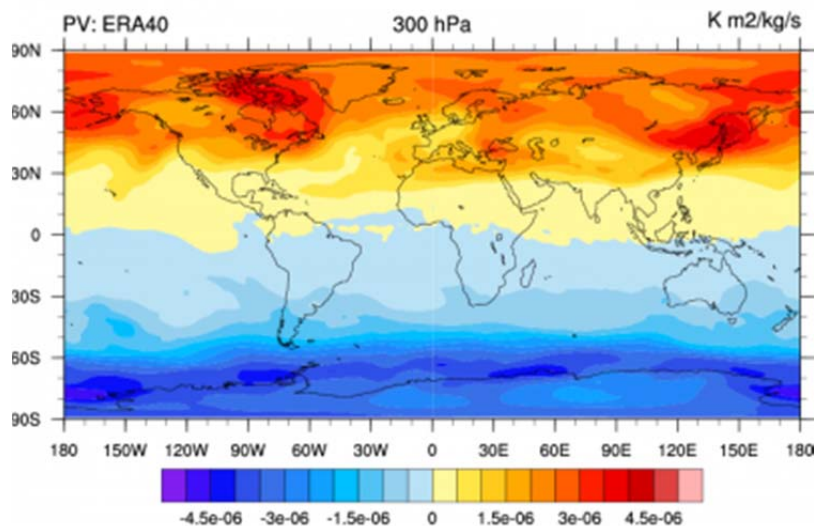


Figure 2: Exemple de données de Tourbillon potentiel moyen mensuel de janvier à 300 hPa avec une couverture mondiale (ERA-40, 2016).

Actuellement des bases de données de réanalyses couvrant le monde entier sont disponibles, [15]. Le tableau 1 représente quelques données de réanalyses disponibles et téléchargeables gratuitement.

Tableau 1: Caractéristiques spatio-temporelles de quelques bases de données de ré-analyses globales, échantillonnées toutes les 6 heures.

	<i>Source</i>	<i>Période</i>	<i>Résolution horizontale</i>	<i>Résolution verticale</i>
CFRSR	NCEP	Du 01/01/1979 au 31/12/2010	Surface : 0.312° x 0.312° Atmosphère : 0.5° x 0.5°	37 niveaux pression jusqu'à 1 mbar
CFSv2	NCEP	Du 01/01/2011 à aujourd'hui	Surface : 0.205° x 0.205° Atmosphère : 0.5° x 0.5°	37 niveaux pression jusqu'à 1 mbar
ERA-15	ECMWF	Du 01/01/1979 au 31/12/1993	1.125° x 1.125°	17 niveaux pression jusqu'à 10 hPa
ERA-40	ECMWF	Du 01/09/1957 au 31/08/2002	1.125° x 1.125°	23 niveaux pression jusqu'à 1 hPa
ERA-Interim	ECMWF	Du 01/01/1979 à aujourd'hui	0.703° x 0.703°	37 niveaux pression jusqu'à 0.1 hPa
MERRA	NASA	Du 01/01/1979 à aujourd'hui	0.5° x 0.667°	42 niveaux pression jusqu'à 0.1 hPa
NNRP1	NCEP, NCAR	Du 01/01/1948 à aujourd'hui	2.5° x 2.5°	17 niveaux pression jusqu'à 10 mbar
NCEPR2	NCEP, DOE	Du 01/01/1979 à aujourd'hui	Surface : 1.875° x 1.875° Atmosphère : 2.5° x 2.5°	17 niveaux pression jusqu'à 10 mbar

Source : [15].

Toutes ces données météorologiques nous permettent de caractériser l'évolution climatique à travers une comparaison des séries étudiées basée sur les moyennes (analyse de la variance), les écarts à la moyenne, l'indice de précipitation standardisé et une analyse spatiale.

3.2. Acquisition des données

Les données climatiques utilisées sont extraites de la plateforme Google Earth Engine (GEE). C'est une Plateforme en cloud pour l'analyse des données géospatiales en donnant à l'utilisateur la possibilité de travailler dans une infrastructure du géospatial Big Data : données d'observation de la terre et cloud computing. Google Earth Engine est une infrastructure d'archivage de données

géospatiales de plusieurs pétaoctets et de traitement parallèle permettant une analyse à l'échelle planétaire. Il stocke un ensemble de données géospatiales comme Landsat, Sentinel, occupation du sol, couverture végétale, MODIS etc., des données climatiques comme CHIRPS, les réanalyses ERA-5, ERA-15, ERA-40, TRMM etc. GEE fournit un explorateur de données et une interface de programmation d'applications (API) basée sur JavaScript ou Python.

3.3. Méthodes d'analyse de l'évolution climatique

L'analyse de l'évolution de la pluviométrie est basée, d'une part, sur les réanalyses de ERA-40 dont les données remontent jusqu'en 1957 et, d'autre part, sur les données CHIRPS disponibles depuis 1981. Ces données sont comparées à celles issues de la station météorologique de Ziguinchor, de WorldClim et aux données CHIRPS de la partie Guinéenne par des méthodes statistiques afin d'observer l'évolution de la pluviométrie à l'échelle réduite.

3.3.1. L'indice de Pluviométrie Standardisé (IPS)

L'indice standardisé des précipitations (IPS) est utilisé pour caractériser la variabilité pluviométrique.

L'indice se calcule selon la formule : $AS = \frac{(Xi - Xm)}{Si}$ (1)

Où Xi = cumul de la pluie pour une année i ; Xm = moyenne annuelle des pluies selon la période donnée ; Si = écart-type des cumuls annuels sur la même période. Il permet de détecter rapidement les situations de sécheresse et d'en évaluer la gravité [16] à travers différentes classes qui déterminent des critères d'appréciation (tableau 2).

Tableau 2: Échelle d'interprétation de l'indice pluviométrique standardisé (IPS).

Valeurs de l'IPS	Appréciations
2,0 et plus	Extrêmement humide
de 1,5 à 1,99	Très humide
de 1,0 à 1,49	Modérément humide
de -0,99 à 0,99	Proche de la normale
de -1,0 à -1,49	Modérément sèche
de -1,5 à -1,99	Très sèche
-2 et moins	Extrêmement sèche

Source : [16].

3.3.2. Détection des ruptures au sein des séries pluviométriques annuelles

- Le test de Pettitt

Le test de Pettitt est utilisé pour identifier les ruptures dans les séries pluviométriques. C'est un test non paramétrique qui ne requiert pas d'hypothèse sur la distribution des données. Le test de Pettitt est une adaptation du test de Mann-Whitney basé sur les rangs pour identifier le moment d'une transition dans les séries [17]. Le test de Pettitt consiste à décomposer la série principale de N éléments en deux sous-séries à chaque instant t compris entre 1 et $N-1$. La série principale présente une rupture à l'instant t , si les deux sous-séries ont des distributions différentes. Les variables de Pettitt (U) sont définies par l'équation suivante :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (2)$$

Où $D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j)$ avec $\text{sgn}(Z) = 1$ si $Z > 0$, 0 si $Z = 0$ et -1 si $Z < 0$.

Il propose de tester l'hypothèse nulle en utilisant la statistique KN définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,N}$ pour (t) variant de 1 à $N-1$. L'absence de rupture dans la série de taille N , constitue l'hypothèse nulle H_0 . Si elle est rejetée, le test met en évidence la date de rupture.

- Le test de Mann-Kendall

Le test de Mann-Kendall [18] constitue un test non paramétrique ayant pour objectif de déterminer si une tendance existe ou non, au sein d'une série temporelle de données pluviométriques ou de températures. Le test de Mann-Kendall permet également de tester la stabilité de la moyenne et de la variance d'une série d'observations. Il s'agit d'une procédure non paramétrique dans laquelle on compare chaque observation de la série de base avec ses observations précédentes [19]. L'intérêt de ce test réside dans sa simplicité et sa robustesse tout en acceptant les valeurs manquantes et les valeurs extrêmes. La normale standard multivariable U_{MK} est définie comme suit :

$$U_{MK} = \frac{S}{\sqrt{Var(s)}} \quad S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n sgn(x_j - x_i)$$

$$sgn(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad Var(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (3)$$

S représente la relation entre le nombre de paires d'observation et n est le nombre total d'échantillons. L'absence de tendance (l'hypothèse nulle H_0) est acceptée si la P_{value} est supérieure à 5%. La tendance est définie par le coefficient statistique de Mann-Kendall U_{MK} . Si U est positif, la tendance est à la hausse, mais si U est négatif, alors la tendance est à la baisse [20].

IV. RESULTATS

4.1. Analyse de la variabilité pluviométrique

Les Rivières du Sud sont caractérisées par une variabilité pluviométrique très contrastée suivant un gradient Sud-nord. Les précipitations diminuent des régions guinéennes vers le Sahel et le Sahara. Elles sont marquées par une fréquence des épisodes de sécheresse dont les plus marquants datent des années 1970, 1980 et 1990. Ces sécheresses présentent une sévérité, une persistance et une extension remarquable et ont provoqué, d'importantes mutations dans les systèmes naturels et anthropiques [21]. La zone Sahélienne a subi des fluctuations climatiques répétées comme dans toutes les régions de la planète. Selon [22], depuis 1910, des épisodes de sécheresses sont observés en Afrique de l'Ouest.

4.1.1. L'Indice de Pluviométrie Standardisé (IPS)

L'analyse des séries chronologiques des précipitations annuelles révèle l'existence de périodes sèches et humides. Les résultats de l'IPS montrent que les variations annuelles des précipitations tournent légèrement en faveur de la sécheresse (tableau 3).

Tableau 3: Proportions (en %) d'années sèches et humides au niveau des stations retenues.

Interprétation	Classes SPI	Ziguinchor	Cap Skiring	Bissau
Sécheresse extrême	-2 et moins	0	0	0
Très Sèche	de -1,5 à -1,99	10	4	8
Modérément sèche	de -1,0 à -1,49	10	18	10
Proche de la normale	de -0,99 à 0,99	66	58	64
Modérément humide	de 1,0 à 1,49	10	12	14
Très humide	de 1,5 à 1,99	2	6	2
Extrêmement humide	2,0 et plus	2	2	2

Sur une période de 50 ans, les années très sèches représentent 10% pour la station de Ziguinchor, 4% pour Cap Skiring et 8% pour Bissau. Il existe des années modérément sèches qui représentent 10% à Ziguinchor, 18% à Cap Skiring et 10% à Bissau. Les

années où la pluviométrie est proche de la normale dominent la série mais restent déficitaires par rapport à la moyenne. Elles totalisent 66% à la station de Ziguinchor, 58% à Cap Skiring et 64% à Bissau. Cette période déficitaire est essentiellement observée entre 1970 et 2008 sur l'ensemble des stations. Cette période connaît une légère sécheresse avec une probabilité d'occurrence d'une fois tous les 3 ans [16]. La situation géographique de cette partie des Rivières du Sud par rapport à l'équateur lui confère une bonne pluviométrie malgré sa variabilité spatio-temporelle constatée au cours de la période étudiée.

L'analyse de l'IPS montre trois phases d'évolution (figure 3). Une première phase, dont l'évolution est presque identique pour les trois stations, marquée par une variabilité faiblement contrastée avec une fréquence d'années humides entre 1961 et 1969. La deuxième phase commence à partir des années 1970 et s'étend sur une longue période de sécheresse communément appelé la rupture climatique, jusqu'en 2007, malgré quelques années où l'indice est positif. La troisième phase, marquée par une amélioration de la pluviométrie, est comprise entre 2008 et 2018. Elle est considérée par les chercheurs comme un retour à de meilleures conditions pluviométriques.

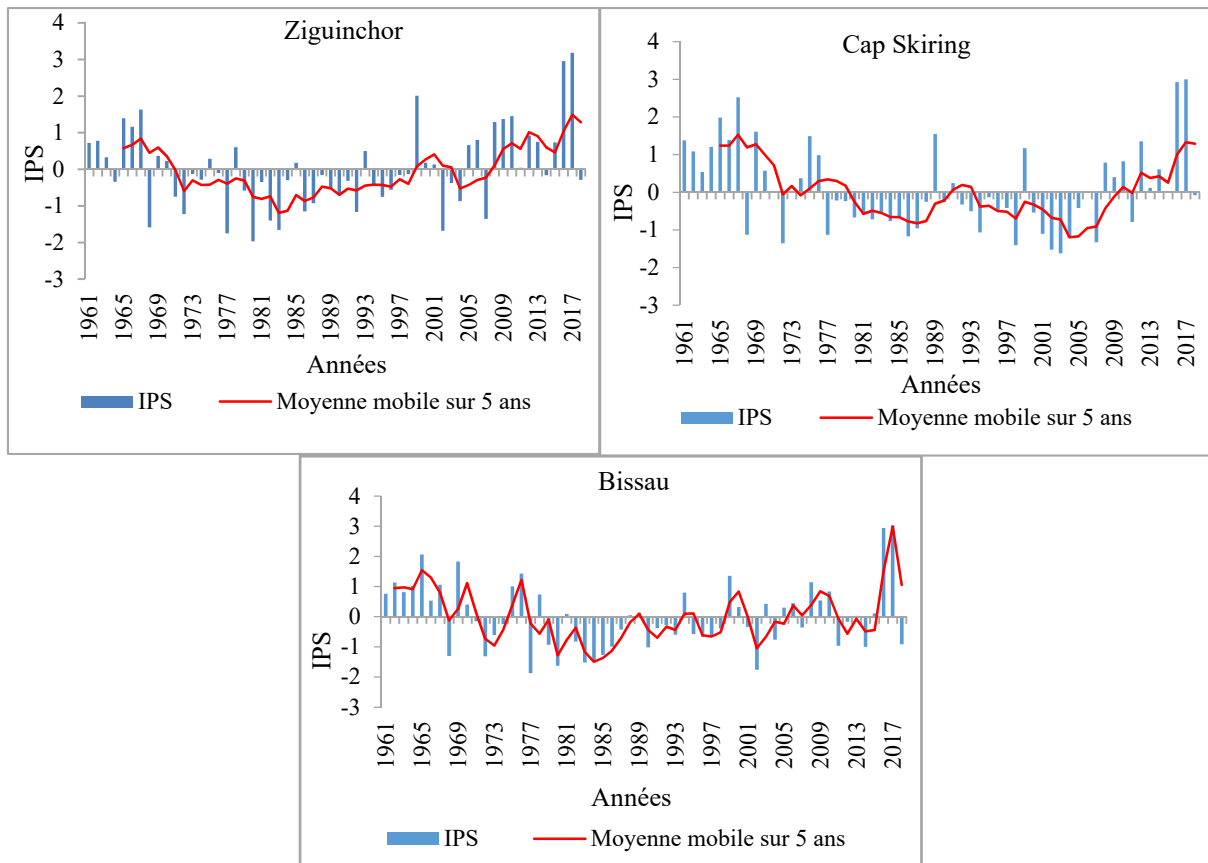


Figure 3: Indice pluviométrique standardisé (IPS) calculé sur la période 1961-2018 aux stations de Ziguinchor, Cap Skiring et Bissau.

4.1.2. Détection de ruptures pluviométriques dans les séries chronologiques

Pour mettre en évidence la variabilité pluviométrique et confirmer nos résultats obtenus plus haut, un certain nombre de tests statistiques de détection de rupture a été appliqué sur les séries chronologiques des différentes stations retenues. Il s'agit du test de Pettitt, qui identifie si les séries pluviométriques sont homogènes et du test de Mann-Kendall [18] que nous avons utilisé pour déterminer si une tendance est identifiable au sein des séries temporelles des trois stations.

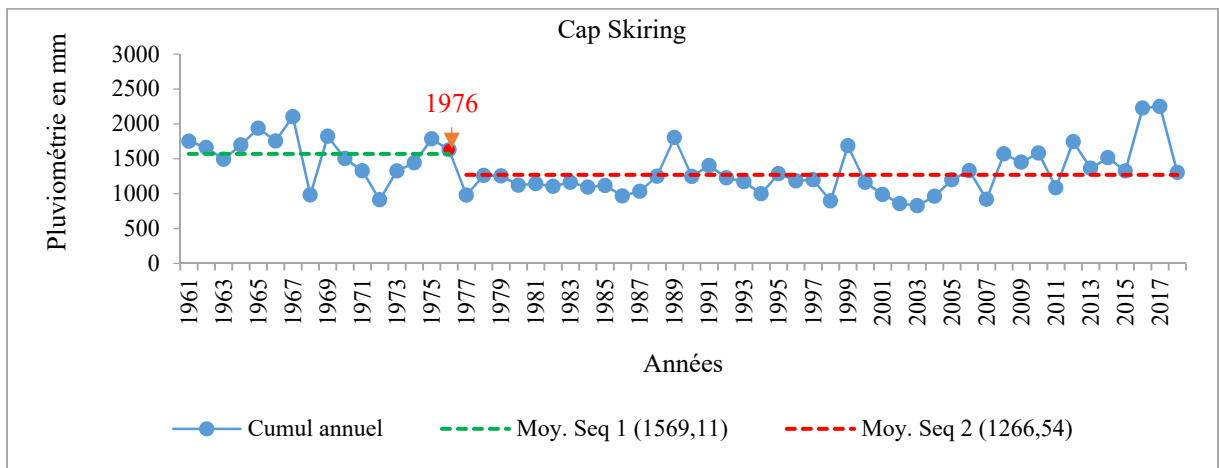
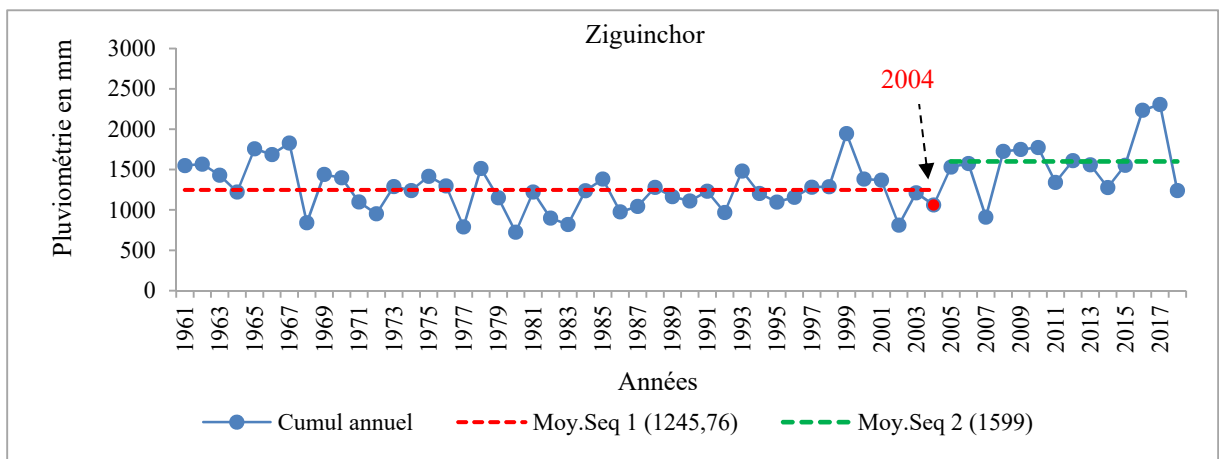
- Le test de Pettitt

Les résultats du test de Pettitt (figure 4) montrent que les séries pluviométriques présentent des ruptures aux stations de Ziguinchor et de Cap Skiring. Le test n'a détecté aucune rupture à la station de Bissau. Les ruptures sont mises en évidence avec

un seuil de confiance de 90 % à Cap Skiring et 90% à 99% à Ziguinchor avec une probabilité de dépassement de la valeur critique du test (respectivement de 5,55 10⁻³ et 4,80 10⁻³).

Le test de Pettitt divise les séries, à l'exception de Bissau qui ne présente de rupture, en deux périodes : 1961-2004 et 2005-2018 pour Ziguinchor et 1961-1976 et 1977-2018 pour Cap Skiring. A Ziguinchor, la première séquence est longue (1961-2004) avec une moyenne pluviométrique de 1245 mm. La deuxième séquence est marquée par une tendance à la hausse. Contrairement à ce qui est observé en Afrique de l'ouest et dans le Sahel, la moyenne pluviométrique après la rupture, à Ziguinchor, est à la hausse.

Différemment aux résultats des travaux effectués dans les domaines soudanien et sahélien du Sénégal qui situent les ruptures entre la fin des années 1960 et la première moitié des années 1970, la date de changement de tendance des pluies est notée en 1976 à Cap Skiring, certes tardive mais plutôt que celle de Ziguinchor. La première séquence (1961-1976) avec une moyenne de 1569 mm était humide malgré la présence de quelques années moins pluvieuses. La deuxième séquence, de durée plus longue, est marquée par une baisse des pluies. Elle enregistre une diminution de 300 mm par rapport à la moyenne de la première séquence. Cette période est caractérisée, d'une manière générale, par la translation des isohyètes vers le sud du Sénégal.



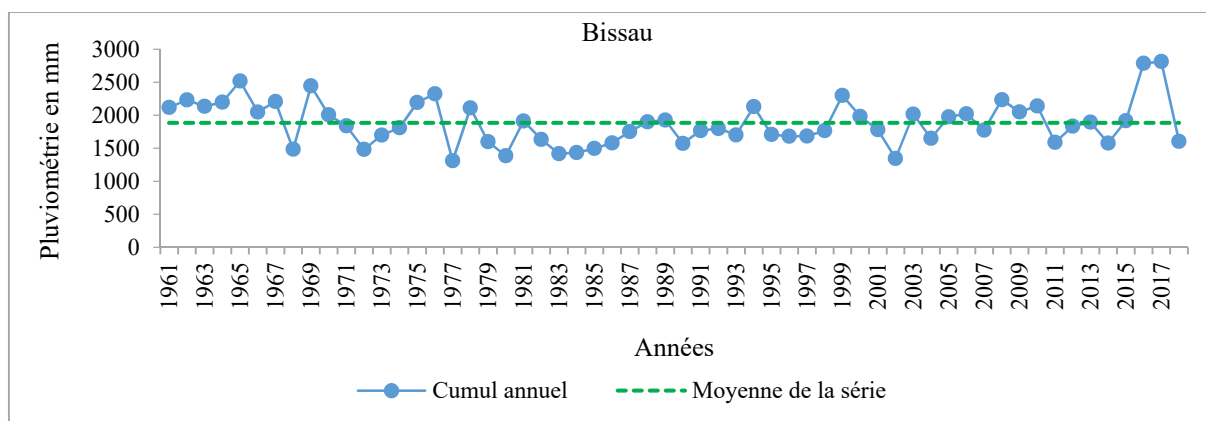


Figure 4: Évolution séquentielle des cumuls pluviométriques annuels à partir des résultats du test de Pettitt.

- Le test de Mann-Kendall

Le test de Mann-Kendall est normalement utilisé parallèlement à un test non paramétrique pour déterminer si une tendance est identifiable au sein d'une série temporelle [23]. Le test est basé sur l'hypothèse nulle H0 qui signifie qu'il n'y a pas de tendance dans les séries temporelles. Il permet de détecter l'existence d'une unique tendance globale au sein de la série analysée.

Les résultats du test de Mann-Kendall (tableau 4) révèlent une absence de tendance dans les séries chronologiques des stations de Ziguinchor et de Bissau. Pour chacune de ces stations, le p-value est supérieur au seuil alpha qui est égale à 0,05. Par conséquent, l'hypothèse nulle H0 ne peut être rejetée, ce qui signifie qu'il n'y a pas de tendance dans les séries. Contrairement à ces deux stations, le test retient l'hypothèse alternative Ha à la station de Cap Skiring. La p-value (0,006) étant inférieure au seuil alpha (0,05), le test affiche une tendance dans la série.

Tableau 4: Statistique du Test de tendance de Mann-Kendall dans les trois stations retenues.

T. Mann-Kendall	Ziguinchor	Bissau	Cap Skiring
p-value	0,87	0,685	0,006
alpha	0,05	0,05	0,05
Interprétation	H0 retenue	H0 retenue	H0 rejetée

4.1.3. Dynamique spatio-temporelle des précipitations

L'Afrique de l'Ouest a toujours connu un climat variable. Cette variabilité a été accentuée ces dernières décennies par le changement climatique résultant des émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Beaucoup de modèles de circulation générale ont affirmé que l'Afrique va connaître une baisse des précipitations. Aux vues des impacts potentiels de ces fluctuations climatiques sur l'agriculture qui assure la survie des populations ainsi sur l'environnement, plusieurs scénarios sont simulés afin de comprendre la dynamique du climat et de préparer des stratégies d'adaptation.

L'analyse de la variabilité spatiale de la pluviométrie est faite avec les données de WorldClim. La normale pluviométrique 1961-1990 est comparée au modèle forcé par le scénario RCP 8.5 à l'horizon 2071-2100 (figure 5). Ce scénario correspond à une émission de 8,5 W/m² à l'horizon 2100. La comparaison de ces données a mis en évidence la variabilité spatio-temporelle des précipitations ainsi que le cycle pluviométrique saisonnier en Afrique de l'ouest. Cette variabilité temporelle est liée à la position en latitude de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT). Les volumes pluviométriques en Afrique de l'Ouest au cours de la période 1961-1990 sont fortement influencés par les sécheresses des années 1970 et 1980.

Le RCP 8.5 prévoit entre 2071 et 2100, une légère variabilité spatiale de la quantité de précipitation. Une baisse du volume des précipitations par rapport à la normale 1961-1990 est attendue dans les régions du Sud du Sénégal jusqu'en Guinée Bissau notamment entre les mois d'août, septembre et octobre. Cependant, ces mois restent les plus pluvieux dans la partie littorale. La

période 2071-2100 s'annonce très pluvieuse d'après le scénario le plus pessimiste (RCP 8.5) mais la différence par rapport à la normale 1961-1990 réside dans les fortes quantités de précipitation à courte durée. Ce qui est d'ailleurs prévue dans le 5^{ème} rapport du GIEC parut en 2014.

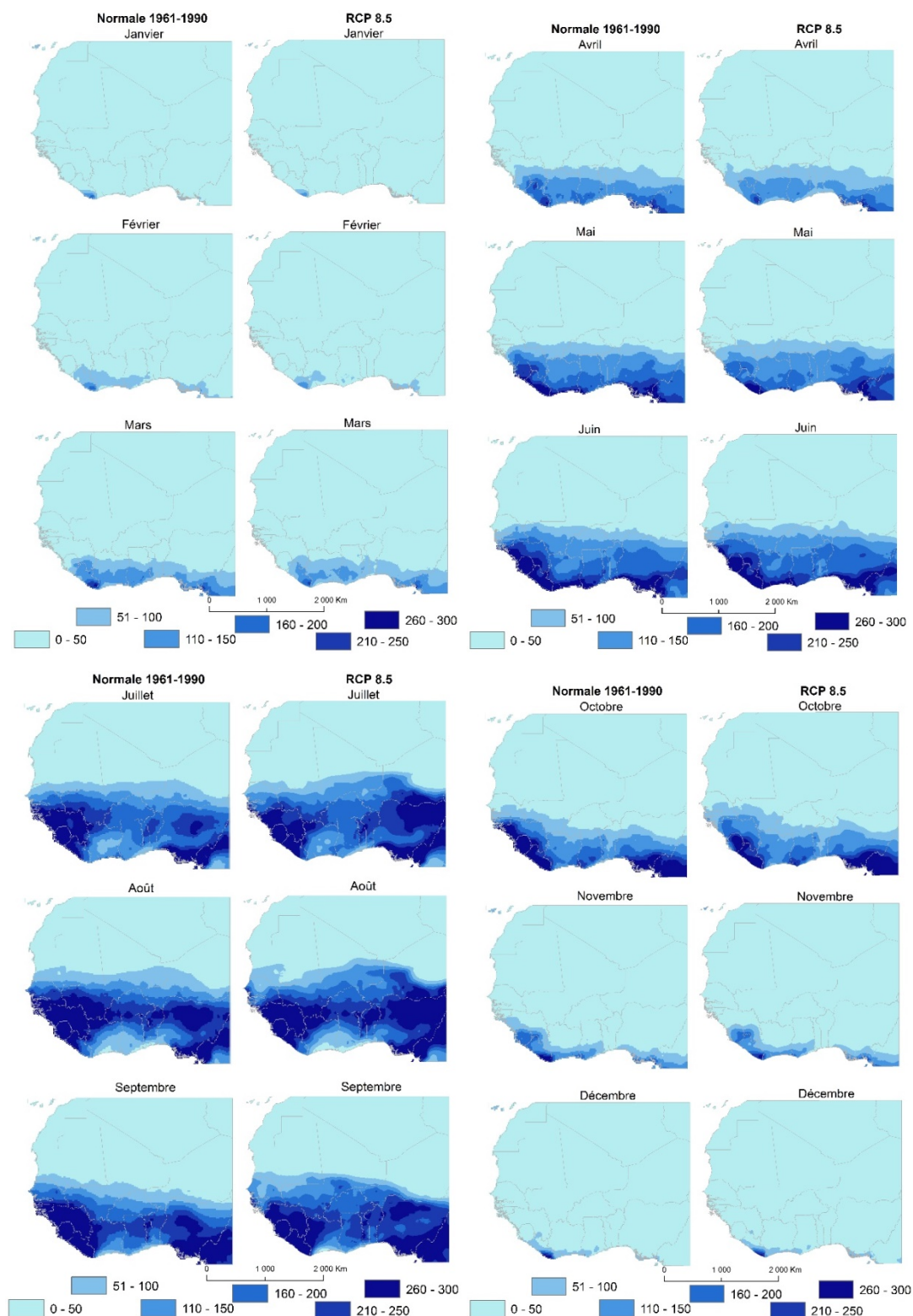


Figure 5: Évolution spatiale du cumul mensuel des précipitations de 2071-2100 sur la base du RCP 8.5 comparée à la période de référence 1961-1990.

V. DISCUSSION

La pluviométrie constitue un facteur essentiel pour la caractérisation d'une région climatique en Afrique tropicale et du calcul des bilans climatiques [24], [25].

L'analyse de l'Indice Pluviométrique Standardisé (IPS) a mis en évidence la variabilité pluviométrique dans la partie septentrionale des Rivières du Sud. Les résultats de l'IPS montrent une évolution contrastée de la pluviométrie avec la prédominance des années sèches. Seule la période 1961-1970 est réputée humide. La grande sécheresse notée pendant les années 1970 s'est prolongée jusqu'aux années 1980 affectant ainsi les volumes pluviométriques de la région [26], [27]. L'analyse des séries chronologiques ont toutes montré une sécheresse aigue durant la période 1971-2007.

Le test de Pettitt rejette l'hypothèse nulle qui constitue une absence de rupture avec un seuil de confiance compris entre 90 et 99 %. Tous les sites étudiés, à l'exception de Bissau, présentent des ruptures. Cette absence de rupture à Bissau ne traduit pas une absence de baisse de la pluviométrie [28]. Le déficit pluviométrique observé en Afrique sahélienne s'est également répercuté dans la zone guinéenne. Les hauteurs pluviométriques substantielles font que les effets de la baisse des précipitations sont moins ressentis [29]. Cependant, les dates de rupture relevées à Ziguinchor (2004) et Cap Skiring (1976) sont tardives différemment à la majorité des études réalisées en Afrique Occidentale et Sahélienne [3], [26], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], situant la plupart des ruptures entre la fin des années 1960 et le début des années 1970. En effet, même si le test de Pettitt relève tardivement les ruptures dans les Rivières du Sud, la baisse de la pluviométrie est amorcée à la fin des années 1960 et s'est prolongée jusqu'aux années 2000. Cela concorde avec les travaux de [37] qui situent le début de la sécheresse récente à la fin des années 1960 en Afrique de l'Ouest et centrale. Cette longue période de baisse pluviométrique, du fait de son intensité et de son extension [37], [38], [39], [40], [41], a considérablement affecté les moyennes pluviométriques étudiées.

Parallèlement au test de Pettitt, celui de Mann-Kendall révèle une absence de tendance dans les séries chronologiques au niveau des stations de Ziguinchor et de Bissau. Seule la station de Cap Skiring affiche une tendance dans la série.

L'analyse de la dynamique montre une répartition inégale de la pluviométrie, dans le temps et dans l'espace. La normale pluviométrique 1961-1990 comparée au modèle forcé par le scénario RCP 8.5 à l'horizon 2071-2100 a mis en évidence la variabilité spatio-temporelle des précipitations ainsi que le cycle pluviométrique saisonnier en Afrique de l'ouest.

La variabilité interannuelle des précipitations est, sans conteste, grande sur l'ensemble du continent africain. Elle se traduit par la récurrence de la sécheresse et la migration vers le sud des isohyètes entraînant une « sahélistation » des zones soudaniennes. Les volumes annuels de pluies sont souvent inférieurs aux moyennes des séries précédentes [42], [43]. Ce déplacement des isohyètes a entraîné, en outre, la translation de certains domaines culturels : le bassin arachidier a reculé vers le sud et la zone cotonnière vers le nord de la Gambie consécutivement au déplacement de l'isohyète 800 mm vers le sud [44].

Ce glissement climatique noté à la fin des années 1960 s'est traduit par un changement dans les lois de distribution des variables hydro-pluviométriques. Ce déficit pluviométrique s'est répercuté sur les écoulements des grands cours d'eau et a entraîné une baisse des niveaux piézométriques et la chute des débits des cours d'eau [29], [45].

VI. CONCLUSION

Il ressort de cette analyse que la pluviométrie a fortement fluctué dans les Rivières du Sud. A l'instar des pays de l'Afrique de l'ouest, la récession pluviométrique des années 1970 et 1980 a affecté les totaux pluviométriques de l'ensemble des stations. Les plus faibles volumes pluviométriques sont enregistrés pendant ces périodes. Des ruptures dans l'évolution des pluies sont détectées dans les séries chronologiques à Ziguinchor et à Cap Skiring. L'existence d'épisodes secs et humides est, également, bien mise en évidence par l'IPS avec une légère dominance des années sèches.

Contrairement aux stations sahéliennes et nord soudaniennes du Sénégal, les dates de rupture des stations de la partie septentrionale des Rivières du Sud sont tardives. Elles ont été relevées respectivement en 2004 pour Ziguinchor et en 1976 pour Cap Skiring. Cependant, la péjoration pluviométrique qui a affecté le Sahel pendant les années 1970, 1980 et 1990 n'a pas épargné les Rivières du Sud. En effet, le degré de sévérité de la sécheresse dans cette partie diffère par rapport aux stations nord sénégalaises. L'indice de sécheresse (IPS) varie de « très sèche » à « modérément sèche ». Les années où l'IPS est « proche à la normale » prédomine largement dans l'ensemble des stations.

REFERENCES

- [1] D. Frédéric (2007). Atlas du réchauffement climatique. Revue Autrement, 13p.
- [2] A. Kouassi, P. Assamoi, S. Bigot, A. Diawara, G. Schayes, F. Yoroba et B. Kouassi (2010). Etude du climat ouest-africain à l'aide du modèle atmosphérique régional M.A.R. *Climatologie*, vol. 7, pp. 39-55.
- [3] E. Servat, J. E. Paturel, H. Lubes-Niel, B. Kouamé, J. M. Masson, M. Travaglio & B. Marieu (1999). De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. *Revue des Sciences de l'Eau*, 12, 2, pp. 363-387.
- [4] G. Liénou, G. Mahé, J. E. Paturel, E. Servat, A. Dezetter (2012). Impacts du changement climatique en zone équatoriale ; exemple de modification de régime des Rivières du Sud-Cameroun. 2p.
- [5] E. S. Diop (1990). La côte ouest-africaine du Saloum (Sénégal) à la Mellancorée (Rep. De Guinée). Etudes et thèses, Paris, 1990, 366p.
- [6] M. A. Touré (2018). Variabilité climatique et dynamique des écosystèmes du delta du fleuve Sénégal des années 1950 aux années 2010. Thèse de doctorat unique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 492p.
- [7] M.K. Tippett, A. Giannini (2006). Potentially Predictable Components of African Summer Rainfall in an SST-Forced GCM Simulation. 13p.
- [8] B. Fontaine, P. Roucou, M. Camara, N. Vigaud, A. Konaré, S. I. Sanda, A. Diedhiou et S. Janicot (2012). Variabilité pluviométrique, changement climatique et régionalisation en région de mousson africaine. *La Météorologie - Spécial AMMA*, pp. 41-48.
- [9] D. Boulard (2010). Modes de variabilité des températures de surface océanique du bassin méditerranéen (1989-2008). Mémoire de master 1, Université de Bourgogne, 57p.
- [10] M. Prignon (2016). Incertitudes sur les données climatiques en Afrique : Intercomparaison de divers jeux de données, Mémoire de Master, Université de Liège, 84p.
- [11] M. Leroux (1983). Le climat de l'Afrique tropicale. Thèse de doctorat d'État, Ed. Slatkine Champion, 633p.
- [12] G. Pennober (1999). Analyse spatiale de l'environnement côtier de l'archipel des Bijagos (Guinée Bissau), Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale, Institut supérieur européen de la mer, 233p.
- [13] J. K. Gibson, P. Kallberg, S. Uppala, A. Nomura, A. Hernandez et E. serrano (1997). ERA Description, ECMWF Re-Analysis Project Report Series, N°1, 72p.
- [14] P. Dehase (2011). Une comparaison des différentes configurations du modèle canadien gem avec les données de réanalyse NCEP et ERA 40 dans l'arctique pour la période 1978-2002. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, p.38.
- [15] B. Baqué, L. Cazenave, T. Marot (2016). Utilisation de ré-analyses météorologiques pour le dimensionnement et le calcul de performances d'aéronefs. 8p.
- [16] OMM, (2012). Guide de l'utilisation de l'indice de précipitations normalisé. éd. Temp-Climat-eau, Vol. 1090, Suisse, OMM, 2012.
- [17] A. N. Pettitt (1979). a non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist*, 28(2), pp. 126-135.
- [18] G. Maurice, S. M. Kendall, A. Stuart (1961). The Advanced Theory of Statistics. Inference and relationship. *Charles Griffin*, London, UK. Vol. 2, 676 p.
- [19] C. Beaulieu, B. M. J. Ouarda TAHA & O. Seidou (2010). Synthèse des techniques d'homogénéisation des séries climatiques et analyse d'applicabilité aux séries de précipitations. *Hydrological Sciences Journal*, 52 :1, pp. 18-37.

- [20] R. M. Ng. Fossou, N. Soro, V. B. Traore, T. Lasm, S. Sambou, T. Soro, R. K. Orou, M. T. Cissé & A. Kane (2014). Variabilité climatique et son incidence sur les ressources en eaux de surface : cas des stations de Bocanda et de Dimbokro, Centre-Est de la Côte d'Ivoire en Afrique de l'Ouest. *Afrique Science* 10 (4) pp. 118 – 134.
- [21] J. E. Paturel, E. Servat, M. O. Delattre & H. Lubès-Niel (1998). Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrological Science Journal*, 43(6), pp. 937-946.
- [22] W. Fondevilla (2004). Les facteurs climatiques et les types de climats. <http://la.climatologie.free.fr/sommaire.htm>
- [23] S. Bigot et S. Rome, (du 5 au 8 septembre 2012). Les climats régionaux : observation et modélisation. 25^{ème} colloque de l'association internationale de climatologie, Grenoble, 10 p.
- [24] L. A. Lake, N. Ndour, M. Thiombane, B. S. Diouf, P. Sagna, M. Ba, A. Ba, D. M. Ndiaye, Y. Diop & K. Touré (2000). Ecographie du Sénégal subsaharien et développement, dynamique des espaces ruraux des années 1950 à 2015. *UCAD-Université de Sherbrooke*, Dakar, IFAN Laboratoire de Géographie-CARTEL, 261 p.
- [25] P. Sagna (2005). Dynamisme du climat et son évolution récente dans la partie ouest de l'Afrique occidentale. *Thèse de doctorat d'état Université Cheikh Anta Diop*, Dakar, Tome II, 517 p.
- [26] M. Faye, B. Faye, A. A. Faye, G. Niang, D. Tine, I. Sarr et R. Boissy (2021). Analyse de l'évolution de la pluviométrie au cours des six dernières décennies (1951 à 2010) dans l'Arrondissement de Fimela (Région de Fatick/Sénégal). *Revue Internationale Dônni*, Vol.1, N°2, pp. 228-242.
- [27] M. Niasse, A. Afouda & A. Amani (2004). Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification : Eléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation. *UICN, Gland, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni, XVIII*, 71 p.
- [28] H. Lubès-Niel, J. M. Masson, E. Servat, J. E. Paturel, B. Kouamé & J. F. Boyer (1994). Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques. Etude bibliographique, ORSTOM FRIEND AOC, Programme ICCARE, 3. 21.
- [29] M. Ouédraogo (2001). Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale. *Thèse de doctorat de l'Université Montpellier II*, 257p.
- [30] P. Hubert, & J-P. Carbonnel (1987). Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 95, pp. 165-183.
- [31] E. Servat, J. E. Paturel, B. Kouamé, M. Travaglio, M. Ouedraogo, J. B. Boyer, H. Lubès-Niel, J. M. Fritsch, J. M. Masson, B. Marieu (1998). Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In : *Water Resources Variability in Africa during the Xth century* (00. by E. Servat, D. Hughes, J.M. Fritsch & M. Hulme) (Proc. Abidjan'98 Conf., Abidjan, Côte d'Ivoire, November 1998),323-337. IAHS Publ. no. 252, 1998
- [32] H. Laaroubi (2007). Étude hydrologique des bassins versants urbains de Rufisque. *Thèse de 3^{ème} cycle*, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 308 p.
- [33] A. Bodian (2011). Approche par modélisation pluie-débit de la Connaissance régionale de la ressource en eau, Application au haut bassin du Fleuve Sénégal. *Thèse de doctorat unique*, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 287p.
- [34] A. Bodian (2014). Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'ouest). *Physio-Géo*, Volume 8, pp. 297-312.
- [35] C. Faye, A. A. Sow & J. B. Ndong (2015). Étude des sécheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal. *Physio-Géo*, 9, pp. 17-35.

- [36] M. Faye, D. Tine, F. Diouf, A. Cissay, & C. S. Faye (2022). Climate change and land use dynamics in Djirnda Commune (Fatick Region - Senegal): Remote sensing approach. *European Journal of Biology and Biotechnology*, Vol 3 | Issue 4, 7p. DOI: <http://dx.doi.org/10.24018/ejbio.2022.3.4.375>
- [37] E. Servat, J. P. Paturel, H. Lubès- Niel, B. Kouamé, M. Ouédraogo, J. M. Masson (1997a). Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part one: Detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology*, 191 : 1-15.
- [38] J. C. Olivry (1983). Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégal et aux îles du Cap-Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). *Cahier ORSTOM*, sér. Hydrol., vol. XX, n° 1, pp. 47-69.
- [39] J. Le Borgne (1990). La dégradation actuelle du climat en Afrique, entre Sahara et Équateur. In *La dégradation des paysages en Afrique de l'ouest. Points de vue et perspectives de recherches. Université Cheick Anta Diop, Dakar 1990*, pp. 17-36.
- [40] J. Sircoulon (1990). Impact possible des changements climatiques à venir sur les ressources en eau des régions arides et semi-arides. WMOrrD-n0380, 87 p.
- [41] J. P. Paturel, E. Servat, A. Vassiliadias (1995a). Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data, case of the GR2M model. *Journal of hydrology*, 168: pp. 111-125.
- [42] S. E. Nicholson, L. M. Palao (1993). A re-evaluation of rainfall variability in the sahel. Part 1. Characteristics of rainfall fluctuations. *International Journal of Climatology*, vol. 13, pp. 371- 389.
- [43] S. E. Nicholson (1998). Interannual and interdecadal climate variability of rainfall over African continent during the last two centuries. In: *Water Resources Variability in Africa during the Xxth century* (ed. by E. Servat, D. Hughes, J.M. Fritsch & M. Hulme) (Proc. Abidjan'98 Conf., Abidjan, Côte d'Ivoire, November 1998), 107-116. IAHS Publ. no. 252, 1998.
- [44] M. Faye (2019). La variabilité climatique des années 1950 aux années 2010 et ses impacts sur les ressources naturelles dans la Région de Tambacounda (Sénégal). *Thèse de doctorat unique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar*, 424 p.
- [45] K. E. Ahoussi, Y. B. Koffi, A. M. Kouassi, G. Soro, N. Soro, J. Biémi (2013). Étude de la variabilité hydroclimatique et de ses conséquences sur les ressources en eau du Sud forestier et agricole de la Côte d'Ivoire : cas de la région d'Abidjan-Agboville. *Int. J. Pure App. Biosci.* 1 (6), pp. 30-50.