

## Variabilités et changements pluvio-thermiques dans le bassin de l'Ouémé Supérieur au Bénin

*DJOHY Gildas Louis<sup>1\*</sup>, KPADONOU G. Esaïe<sup>2</sup>, SOUNON BOUKO Boni<sup>1</sup>, KPAN O.J. Gautier<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>-Université de Parakou, Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT), Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines (FLASH), Parakou, Bénin, 03 BP 303 Parakou (Bénin)

<sup>2</sup>-Université de Parakou, Faculté d'Agronomie, Laboratoire d'Hydraulique et de Modélisation Environnementale (HydroModE-Lab), Bénin

<sup>3</sup>-Université Péléforo Gon Coulibaly, Département des géosciences, Korhogo, Côte d'Ivoire, B.P. 700 Korhogo

\*Auteur correspondant, E-mail : [gildasdjohy@gmail.com](mailto:gildasdjohy@gmail.com) / [e.kpadonou@yahoo.com](mailto:e.kpadonou@yahoo.com) / [bsounon@yahoo.fr](mailto:bsounon@yahoo.fr)

Réf. AUM10-0218

**Résumé :** La présente étude analyse les évolutions passées et celles potentielles futures des paramètres pluviométriques et thermiques dans le bassin de l'Ouémé Supérieur au Bénin. Les principales données climatologiques journalières collectées sur la période 1980-2019 sont celles des précipitations, des températures maximales et minimales. Les projections des modèles climatiques HadGEM2 et IPSL sont analysées sur la période 2020-2050 (30 ans). Les données climatiques futures ont été simulées en utilisant la plateforme MarkSim avec deux modèles de circulation globale (GCM), HadGEM2 et IPSL et deux voies de concentration représentatives des gaz à effet de serre (RCP), RCP 2.6 et 4.5. Les modèles ont été évalués par rapport aux données climatiques observées pendant 10 ans (2010-2020) avant la simulation. Les résultats de cette évaluation ont montré des performances acceptables des modèles avec des données simulées suivant les tendances observées. L'analyse des données climatiques historiques a montré une variabilité significative des tendances pluviométriques dans les zones soudanienne et sud-soudanienne entre 1980 et 2019, avec des ruptures de stationnarité respectivement en 1987 et 1990. Les températures moyennes ont augmenté de 26,8°C à 28,0°C (+1,2°C) dans la zone soudanienne et de 26,7°C à 28,6°C (+1,9°C) dans la zone sud-soudanienne au cours de la même période. Dans la zone soudanienne, les projections avec le modèle HadGEM2 montrent une hausse des précipitations de l'ordre de 11,4% (RCP 2.6) et 11,5% (RCP 4.5) pendant qu'avec le modèle IPSL, cette hausse est de 8,2% (RCP 2.6) et 8,0% (RCP 4.5) à l'horizon 2050. Concernant la zone sud-soudanienne, les précipitations connaîtront une hausse de l'ordre de 7,2% (RCP 2.6) et 6,5% (RCP

4.5) avec le modèle HadGEM2 d'une part, tandis qu'avec le modèle IPSL cette hausse sera de 3,7% (RCP 2.6) et 6,1% (RCP 4.5). Le modèle climatique HadGEM2 prévoit une augmentation des températures moyennes de l'ordre de 0,8°C (RCP 2.6) et 0,9°C (RCP 4.5) contre 0,9°C (RCP 2.6) et 1,1°C pour le modèle IPSL dans la zone soudanienne. Par contre, dans la zone sud-soudanienne, le modèle HadGEM2 prévoit une hausse des températures moyennes de l'ordre de 0,3°C (RCP 2.6) et 0,5°C (RCP 4.5) contre 0,4°C (RCP 2.6) et 0,7°C (RCP 4.5) pour le modèle IPSL.

**Mots-clés :** Bénin, Ouémé Supérieur, variabilité climatique, changement pluvio-thermique, projection climatique

**Abstract :** *This study analyzes past and potential future climate trends over the Upper Ouémé basin in Benin. Observed daily climate data such as rainfall, maximum and minimum temperatures were analyzed over a period of 40 years (1980-2019). Future climate data were simulated using the MarkSim platform with two Global Circulation Models (GCM), HadGEM2 and IPSL and two Representative greenhouse gases Concentration Pathways (RCP), RCP 2.6 and 4.5 over a period of 30 years (2020-2050). Models were evaluated against observed climate data for 10 years (2010-2020) before simulation. Results of this evaluation showed acceptable performances of the models with simulated data following the observed trends. Analysis of the historical climate data showed significant variability in rainfall trends in the Sudanian and South Sudanian zones between 1980-2019, with breaks in stationarity in 1987 and 1990 respectively. In addition, mean temperatures increased from 26.8°C to 28.0°C (+1.2°C) in the Sudanian zone and from 26.7°C to 28.6 (+1.9°C) in the South Sudanian zone during the same period. In the Sudanian zone, future climate data with the HadGEM2 model showed an increasing trend of rainfall of about 11.4% (RCP 2.6) and 11.5% (RCP 4.5) while with the IPSL model, this augmentation lies between 8.2% (RCP 2.6) and 8.0% (RCP 4.5) by 2050. Concerning the South Sudan area, precipitation will increase by 7.2% (RCP 2.6) and 6.5% (RCP 4.5) with the HadGEM2 model, while the IPSL model showed increase of 3.7% (RCP 2.6) and 6.1% (RCP 4.5). The HadGEM2 climate model predicts an increase in average temperatures of around 0.8°C (RCP 2.6) and 0.9°C (RCP 4.5) compared to 0.9°C (RCP 2.6) and 1.1°C for the IPSL model in the Sudanian zone. On the other hand, in the southern Sudanian zone, the HadGEM2 model predicts an increase in average temperatures of around 0.3°C (RCP 2.6) and 0.5°C (RCP 4.5) compared to 0.4°C (RCP 2.6) and 0.7°C (RCP 4.5) for the IPSL model.*

**Keywords:** Benin, Upper Ouémé, climate variability, rainfall-thermal change, climate projection

## Introduction

L'Afrique constitue le continent le plus vulnérable aux effets néfastes des changements et variabilités climatiques (GIEC, 2007). Les effets les plus perceptibles sont entre autres la baisse des précipitations et la hausse des températures dans les régions arides et semi-arides (Nicholson, 2001 ; Boko et al., 2012 ; GIEC, 2020). Le continent africain connaît depuis les années 1970 de forts déficits pluviométriques et des phénomènes climatiques extrêmes (Faye et al., 2015). Au Bénin, les précipitations ont connu une diminution relativement brutale au cours des décennies 1970 et 1980 (Vissin, 2007). Le pays a enregistré une baisse pluviométrique comprise entre 11 et 28%, et une augmentation des températures moyennes de 1°C au cours de la période 1951-2010 (Boko et al., 2012). Suite aux modifications des paramètres climatiques, le nord du Bénin a enregistré de nombreuses périodes d'extrêmes pluviométriques et thermométriques entre 1971 et 2010 (Djohy et al., 2017). Les effets des changements climatiques compromettent sérieusement le développement économique durable des pays africains, car le continent est le plus vulnérable (GIEC, 2007). Ainsi, les changements climatiques ont entraîné une dégradation généralisée non seulement des structures et des fonctions des écosystèmes, mais également de leur résilience et de leur capacité d'adaptation naturelle avec des conséquences socio-économiques néfastes (GIEC, 2022). Selon Boko et al. (2012), les modèles de projections climatiques prévoient à l'horizon 2050, une augmentation généralisée des températures et un accroissement des pluies périodiques au nord du Bénin. De plus, une récession pluviométrique de mars à mai est à prévoir à l'échelle saisonnière, ce qui est synonyme d'une concentration des pluies et d'une augmentation de la durée de la saison sèche. Les extrêmes climatiques et météorologiques, notamment les chaleurs extrêmes, les épisodes de fortes précipitations et les sécheresses extrêmes deviennent de plus en plus fréquents et intenses ces dernières décennies (GIEC, 2022). Ces événements climatiques extrêmes impactent le développement des activités socio-économiques (Djohy et al., 2017), en particulier l'agriculture et l'élevage qui constituent

les secteurs prioritaires des économies nationales ouest-africaines (Kabore *et al.*, 2017). L'activité agro-pastorale est de plus en plus affectée par les péjorations climatiques. Pour Cisse (2014), le bétail est affaibli par la faim et la soif à cause des pluies tardives et des chaleurs excessives, ce qui entraîne la dégradation de l'état sanitaire et la mort des animaux. Au niveau de l'agriculture, plusieurs modifications sont déjà perceptibles dans les calendriers agricoles, notamment le retard, le décalage, le raccourcissement des dates de floraison de certaines cultures et le stress hydrique pendant les stades critiques de développement ou de maturation des graines (Doukpolo, 2014 ; Djohy *et al.*, 2015). Dans ce contexte, faire un diagnostic de l'évolution du climat dans le bassin de l'Ouémé Supérieur au Bénin constitue un préalable essentiel pour l'élaboration des stratégies d'adaptation appropriées. Les diagnostics sur l'évolution des paramètres climatiques à l'échelle d'un territoire ou d'une région constituent une préoccupation majeure tant pour les scientifiques que pour les acteurs territoriaux (Faye *et al.*, 2015). Ils permettent d'analyser les changements et variabilités climatiques récentes et de projeter celles futures afin de mettre en place des options d'adaptation (Akponikpe *et al.*, 2019). En faisant l'hypothèse qu'une meilleure connaissance des changements climatiques dans le bassin de l'Ouémé Supérieur contribuerait fortement à la mise en place des stratégies d'adaptation appropriées, cette étude se propose d'analyser les évolutions passées et celles futures des paramètres pluviométriques et thermiques dans le bassin de l'Ouémé Supérieur au Bénin.

## **1. Matériel et méthodes**

### **1.1. Présentation de l'espace d'étude**

L'étude a été conduite dans le bassin de l'Ouémé Supérieur (Figure 1), qui a déjà été décrit par certains auteurs (Métadier, 2006 ; Akognongbe, 2009 ; Alamou *et al.*, 2016 ; Djohy *et al.*, 2021). La zone d'étude est caractérisée par un climat uni-modal à deux saisons bien distinctes dont une saison sèche qui s'étend de novembre à avril et une saison humide qui couvre les mois de mai à octobre,

avec une hauteur moyenne des précipitations annuelles variant entre 1100 mm et 1300 mm (Biaou, 2006, Kora, 2006). Le bassin de l'Ouémé Supérieur couvre la partie amont du fleuve Ouémé qui prend sa source au pied de l'Atacora dans le Nord du Bénin et traverse le Bénin pour se jeter dans le lac Nokoué au Sud du Bénin (Métadier, 2006 ; Akognongbe, 2009). La présente étude des variabilités et changements pluvio-thermiques se concentre sur les deux principales stations synoptiques qui couvre le bassin de l'Ouémé Supérieur.

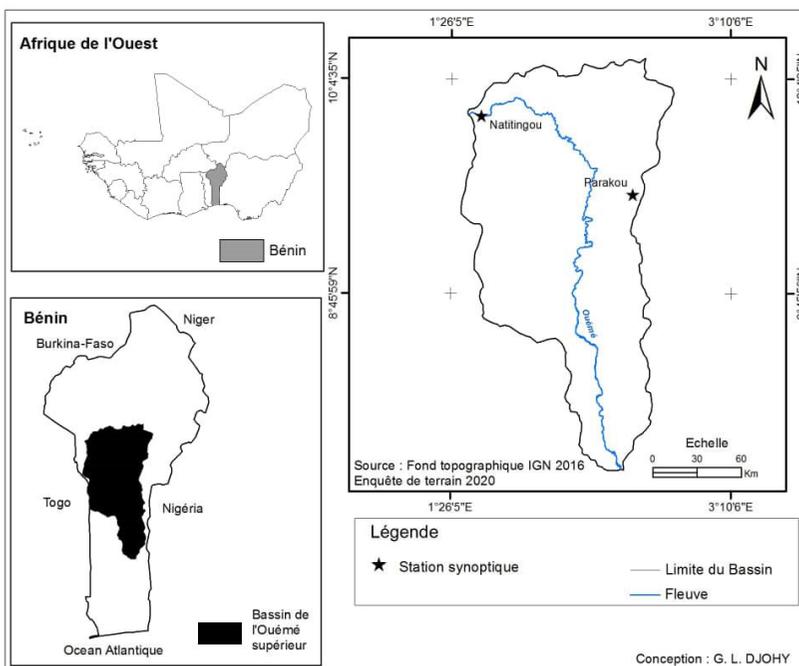


Figure 1. Localisation du bassin de l'Ouémé Supérieur et des stations synoptiques de la zone d'étude dans le Bénin

## 1.2. Données utilisées et réseau d'observations météorologiques

Les données météorologiques utilisées dans le cadre de cette étude sont la pluviométrie, les températures maximales et minimales. Elles

ont été fournies par la Direction Nationale de la Météorologie du Bénin. Il s'agit des données météorologiques des stations synoptiques de Parakou (climat sud-soudanien) et de Natitingou (climat soudanien). Ces différentes données couvrent une période de 40 ans chacune (1980 à 2019), suivant les recommandations de l'Organisation Météorologique Mondiale pour les analyses climatiques (OMM, 2011). La disponibilité des séries climatiques et la présence très limitée des données aberrantes dans ces séries climatiques ont motivé le choix des deux principales stations synoptiques qui couvrent la zone d'étude. La qualité des séries climatiques impacte fortement les résultats des études pluvio-thermiques (Vissin, 2007 ; Amoussou, 2010 ; Boko *et al.*, 2012 ; Kabore *et al.*, 2017 ; Bambara *et al.*, 2019).

### **1.3. Élimination des valeurs douteuses et reconstitution des séries climatiques**

Il est important de s'assurer préalablement de la qualité des séries climatiques des différentes stations retenues et d'éviter l'utilisation des séries hétérogènes (Sebbar, 2013). Les données météorologiques collectées ont subi une vérification rigoureuse afin de s'assurer de leur fiabilité et de leur homogénéité. Les erreurs aléatoires flagrantes dues aux fautes de saisie des relevés sont éliminées de la base de données. Ainsi, le contrôle initial des séries climatiques est important pour détecter et éliminer les valeurs douteuses, car la justesse des données météorologiques est compromise par les valeurs aberrantes (OMM, 2018). Les données manquantes ont été comblées suivant la méthode de régression linéaire entre stations. Ces méthodes ont été utilisées dans plusieurs travaux de recherche sur les tendances climatiques notamment pluviométriques (Amoussou, 2010 ; Bodian *et al.*, 2012 ; Bodian, 2014 ; Sambou *et al.*, 2018).

### **1.4. Paramètres de tendance centrale et de dispersion**

Ils permettent d'étudier les régimes climatiques et d'évaluer la dispersion absolue des valeurs autour de la valeur centrale (Vissin, 2007). Ainsi, la moyenne arithmétique est utilisée pour étudier les

différentes variations des données météorologiques. Elle a permis de caractériser les successions régulières ou périodiques des différentes séries climatiques dans le milieu d'étude. Les paramètres de dispersion ont permis d'analyser le degré de variation des séries climatiques (Atiye, 2017). Ainsi, l'écart-type est par excellence l'indicateur de la variabilité des paramètres climatiques et se détermine par l'équation :

$$\sigma(x) = \sqrt{V}$$

Où :  $V$  = variance ;  $\sigma(x)$  = écart-type de la série.

Il permet de standardiser les séries climatiques et de les transformer en anomalies centrées réduites (Vissin, 2007 ; Atiye, 2017). La méthode d'anomalies centrées réduites a permis de déterminer l'évolution des séries climatiques dans le milieu d'étude. Elle s'exprime par l'équation :

$$x = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

Où :  $x_i$  = cumul moyen annuel obtenu par poste ou station pour l'année  $i$  ;  $\bar{x}$  = moyenne ;  $\sigma$  = écart type de la série considérée. Cet indice a permis de caractériser la sévérité de la sécheresse dans le milieu d'étude (Tableau 1).

**Tableau 1. Classes et grilles d'interprétation des indices pluviométriques standardisés (SPI).**

<b>Classes SPI</b>	<b>Grilles d'interprétation</b>
2 et plus	Extrêmement humide
1,5 à 1,99	Très humide
1,0 à 1,49	Modérément humide
-0,99 à 0,99	Proche de la normale
-1,0 à -1,49	Modérément sec
-1,5 à -1,99	Très sec
-2 et moins	Extrêmement sec

**Source :** OMM, 2012

Les indices pluviométriques standardisés se révèlent tout aussi efficaces pour analyser les périodes humides que les périodes sèches. Les valeurs négatives indiquent une période sèche et les valeurs positives indiquent une période humide. Cette démarche a été utilisée dans diverses études liées à l'évaluation de la sévérité de la sécheresse en Afrique (Soro *et al.*, 2014 ; Faye *et al.*, 2015 ; Mehdaoui *et al.*, 2018).

### **1.5. Détection de rupture de stationnarité et des tendances**

La détection de rupture de stationnarité a permis de mieux apprécier les dynamiques climatiques. Elle est réalisée à partir de plusieurs tests de recherche de rupture. Ces tests sont réalisés grâce au logiciel Khronostat 1.01 développé par l'Unité Mixte de Recherche (UMR 5569) du laboratoire Hydrosociétés Montpellier. C'est un logiciel performant qui regroupe différents tests de vérification du caractère aléatoire de l'échantillon notamment les tests de Pettitt (Pettitt, 1979) et de Buishand (Buishand, 1982, 1984). Le test de Pettitt permet de découper la série climatique principale de plusieurs éléments en deux sous-séries climatiques mettant en évidence des distributions statistiques différentes et séparées par une rupture. Par contre, l'approche statistique de Buishand détecte un changement brutal de la moyenne au sein d'une série (Sambou *et al.*, 2018). Ces différents tests sont souvent utilisés pour analyser le caractère stationnaire ou non des paramètres climatiques notamment des séries pluviométriques et hydrométriques (Ardoin-Bardin, 2004 ; Vissin, 2007 ; Amoussou, 2010 ; Badjana *et al.*, 2014 ; Bodian, 2014 ; Koumassi, 2014 ; Atiye, 2017 ; Sambou *et al.*, 2018 ; Bambara *et al.*, 2019). Ces tests ont été utilisés dans le cadre de cette étude pour déterminer l'évolution des paramètres climatiques dans l'Ouémé Supérieur au Bénin.

L'approche statistique de détection des tendances de Mann-Kendall (Mann, 1945 ; Gilbert, 1987) a été utilisée pour non seulement évaluer les tendances haussières ou baissières des différents paramètres climatiques dans le temps, mais également d'analyser les tendances significatives dans les séries temporelles et

saisonniers des variables climatiques. Cette méthode s'exprime par les équations :

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1, & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0, & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1, & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases}$$

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^t t_i(t_i-1)(2t_i+5) \right]$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases}$$

Où  $S$  = relation entre le nombre d'observation,  $n$  = nombre total d'échantillons. Dans ce test, les valeurs de la probabilité (P-value) ont permis de caractériser la présence ou l'absence de tendance dans les séries climatiques. Ainsi, l'hypothèse nulle « absence de tendance » est acceptée si la probabilité (P-value) est supérieure à 5%. Le sens de la tendance (hausse ou baisse) est défini à partir des valeurs statistiques du coefficient de corrélation de Mann-Kendall. Si la valeur est positive, la tendance est à la hausse, mais si la valeur est négative alors la tendance est à la baisse.

### 1.6. Comparaison des déficits entre deux sous-périodes

Cette comparaison a permis de mettre en évidence la variabilité pluviométrique intervenue dans les communes de l'Ouémé Supérieur sur la période d'étude. Le choix des périodes est fait en fonction des résultats des tests de Pettitt et de Buishand sur les différentes séries.

Cette méthode permet d'évaluer et de comparer le déficit entre deux sous-périodes pluviométriques ou hydrologiques (Vissin, 2007). La sous-période (p1) avant rupture est comparée à la sous-période (p2) après rupture de stationnarité. L'écart  $E$  entre la moyenne  $\bar{X}1$  de la période avant la rupture et la moyenne  $\bar{X}2$  de la période après rupture est déterminé par l'équation :

$$E = \bar{X}2 - \bar{X}1$$

Le taux de déficit (Def %) est déterminé par l'équation :

$$= \frac{\bar{X}2 - \bar{X}1}{\bar{X}1} * 100$$

Où :  $\bar{X}1$  = moyenne de sous-période avant la rupture ;  $\bar{X}2$  = moyenne de sous-période après la rupture.

Le test paramétrique « t » de Student est utilisé pour comparer les hauteurs pluviométriques au cours des deux sous-périodes. Le test s'exprime par l'équation :

$$t = \frac{E}{\sqrt{S^2 + \left(\frac{1}{n1} + \frac{1}{n2}\right)}}$$

Où :  $n1$  et  $n2$  = effectifs des sous séries,  $S^2$  = la valeur pondérée du groupe entier des deux échantillons s'exprimant comme suit :

$$S^2 = \frac{((n_1 - 1)S1 + (n_2 - 1)S2)}{n_1 + n_2 - 2}$$

Où :  $S1$  = variance de la première sous-période,  $S2$  = variance de la deuxième sous-période. La valeur « t » obtenue est ensuite comparée à la valeur tirée de la table de Student, en fonction d'un certain nombre de degrés de liberté  $v$  ( $v = n_1 + n_2 - 2$ ). Ces paramètres ont permis de mieux cerner les tendances pluviométriques dans la zone d'étude. Les conditions climatiques

futures dans la zone d'étude ont été projetées à l'aide des modèles climatiques HadGEM2 et IPSL.

## **1.7. Modèles climatiques**

### **1.7.1. Présentation des modèles climatiques HadGEM2 et IPSL utilisés**

Les modèles climatiques constituent des représentations numériques du système climatique basées sur des propriétés physico-chimiques et biologiques de ses composantes, leurs interactions et rétroactions (Seidou *et al.*, 2017). Les différentes représentations numériques tiennent compte des propriétés actuelles connues du système climatique (IPCC, 2012). Ces modèles sont utilisés comme outil de recherche pour étudier, simuler et prévoir le climat à l'échelle mensuelle, saisonnière et interannuelle (IPCC, 2012). Ainsi, les besoins de comprendre les modifications climatiques ainsi que leur impact à l'échelle globale et régionale ont motivé le développement de plusieurs modèles climatiques globaux et régionaux. Le modèle climatique global fonctionne avec des paramètres qui permettent de simuler les principales caractéristiques de la distribution et de l'évolution du climat sur le long terme en utilisant des mailles de taille relativement grossière (>100 km) (Seidou *et al.*, 2017). Cependant, les modèles climatiques régionaux constituent des outils de descente d'échelle dynamique et de prévision saisonnière (Wang, 2004). Ils permettent d'avoir des simulations plus réalistes des précipitations et des phénomènes climatiques extrêmes (Sylla *et al.*, 2012).

Dans le cadre de cette étude, les données climatiques futures, notamment les précipitations, les températures maximales et minimales ont été projetées à l'aide des modèles climatiques HadGEM2 et IPSL incorporés dans la plateforme MarkSim\_Standalone qui constitue un développement de la nouvelle application web MarkSimGCM (Jones, 2013). MarkSim est un outil stochastique de génération des données climatiques quotidiennes simulées, particulièrement adapté pour les régions tropicales. Il a été mis au point en 2011 par « Waen Associates » avec l'assistance du CCAFS (Climate Change, Agriculture and Food Security), en

coopération avec divers partenaires. L'algorithme de base de la plateforme « MarkSim » est un simulateur-générateur du climat (Sambakhe, 2018), basé sur le principe de la chaîne de Markov de troisième ordre, qui en termes de pluie, prédit la probabilité d'occurrence des jours pluvieux (Jones et Thornton, 2000). Elle est déterminée à partir de l'équation :

$$P(W/D_1 D_2 D_3) = \Phi^{-1}(b_i + a_{i-1}d_1 + a_{i-2}d_2 + a_{i-3}d_3)$$

où  $\Phi^{-1}$  = inverse de la fonction normale de probabilité (probit),  $b_i$  = probit de base du jour humide suivant trois jours secs consécutifs,  $a_i$  = coefficient binaire pour « il y a pluie » (1) ou absence de pluie (0) au jour  $i$  donné,  $d_n$  = constants.

MarkSim constitue une source de plus en plus utilisée dans la génération des données climatiques futures ces dernières années dans le monde entier (Trotochaud et al., 2016). De plus, MarkSim a été calibré sur l'ensemble de données WorldClim qui incorpore des données météorologiques historiques provenant d'un certain nombre de bases de données et qui procède à la réduction d'échelle stochastique et le typage climatique pour réduire l'échelle des projections climatiques futures (Jones et Thornton, 2013). Marksim permet également d'estimer les températures maximales et minimales quotidiennes en se basant sur les méthodes utilisées par Richardson (1981). Les températures maximales et minimales sont issues des processus stochastiques multivariés continus dont les moyennes quotidiennes et les écarts-types sont conditionnés par l'état humide ou sec du jour (Sambakhe, 2018).

La plateforme MarkSim\_Standalone a été développé pour être utilisée avec des modèles climatiques notamment les modèles de circulation globale (MCG) et les scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Dans le cadre de cette étude, deux modèles climatiques notamment HadGEM2 (*Hadley Centre Global Environment Model* : latitude x longitude = 1.2414° × 1.875°) (Collins et al., 2011) et IPSL (*Institut Pierre-Simon Laplace* : latitude

x longitude =  $1.2587^\circ \times 2.5^\circ$ ) (Dufresne et al., 2013), couramment utilisés dans les projections climatiques en Afrique de l'Ouest ont été utilisés (Bodian et al., 2016 ; Bello et al., 2017 ; Seidou et al., 2017 ; Bodian et al., 2018 ; Akponikpe et al., 2019 ; Diawara et Lobanov, 2019 ; Sintondji et al., 2019 ; Diba et al., 2021).

Le choix de ces modèles climatiques est motivé principalement par leur utilisation fréquente dans les études pluvio-thermiques en Afrique. Ces modèles climatiques ont fait preuves de bonnes performances en reproduisant assez correctement les données climatiques observées dans la région de l'Afrique de l'Ouest (Deme et al., 2015). Ils reproduisent également avec une bonne robustesse les différents scénarios climatiques tels que décrit par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), particulièrement les plus probables dans la région ouest-africaine (Bello et al., 2017 ; Akponikpe et al., 2019). Les projections sont réalisées en fonction des différentes trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre et de concentrations atmosphériques (*Representative Concentration Pathways* ou RCP / *Shared Socio-economic Pathways* ou SSP) définies par le GIEC (IPCC, 2014 ; Yang et Cui, 2019). Il s'agit de quatre à cinq principaux scénarios sur l'évolution du climat dont un scénario d'atténuation (RCP 2.6 similaire aux SSP1- 1.9 et SSP2- 2.6) deux scénarios intermédiaires (RCP 4.5 et RCP 6.0 similaires aux SSP3- 4.5 et SSP4- 7.0) et un scénario à très fortes émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5 similaire au SSP5- 8.5). Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisés deux scénarios climatiques le RCP 2.6 (SSP2- 2.6 : scénario de développement durable) qui constitue un scénario d'atténuation conduisant à un degré de forçage radiatif très bas et le RCP 4.5 (SSP3- 4.5 : scénario intermédiaire) qui constitue un scénario de stabilisation. Ces deux scénarios ont permis de faire des comparaisons entre les résultats générés sur l'évolution future du climat dans la zone d'étude. Ils apparaissent comme les plus réalistes et les mieux adaptés aux pays de la région ouest africaine dont le Bénin. De plus, la région contribue moins aux émissions de gaz à effet de serre (GIEC, 2022) et par conséquent ces deux scénarios liés aux faibles

émissions de gaz à effet de serre utilisés dans cette étude reflètent mieux les trajectoires plausibles d'évolution du climat au Bénin (Deme et al., 2015).

Les différents modèles climatiques ont été tournés par année et par zone d'étude sur une période de 30 ans (2020 à 2050). Les sorties des modèles sont des données journalières suivant les deux principaux paramètres étudiés notamment les précipitations et les températures (minimum et maximum) avec un minimum de trente répétitions dans le but de minimiser les biais.

### 1.7.2 Evaluation des modèles climatiques

La robustesse des modèles a été évaluée en comparant les données observées à celles simulées. L'évaluation des modèles a été faite sur 10 ans (2010-2020) pour chaque zone climatique et pour chaque paramètre climatique étudié. Les indices de performances tels que la moyenne d'erreur absolue relative (*the relative mean absolute error, rMAE*) et l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error, RMSE*) et sa normalisée (*NRMSE*) ont été calculés et utilisés pour évaluer les modèles.

$$rMAE = \frac{(\sum |S_i - O_i|)/n}{M} * 100$$

$$RMSE = \left[ n^{-1} \sum (S_i - O_i)^2 \right]^{0,5}$$

$$NRMSE = \left[ n^{-1} \sum (S_i - O_i)^2 \right]^{0,5} * \frac{100}{M}$$

Où n : nombre d'observation, i : ième valeur observée ou simulée, Si : valeur simulée, Oi : valeur observée et M : moyenne des valeurs observées.

Le tableau 2 présente les performances des modèles climatiques par zone climatique et par paramètre étudié. Les tendances générales comparatives des données simulées à celles observées sont illustrées par les figures 2, 3, 4 et 5.

**Tableau 2. Indices de performances des modèles climatiques utilisés.**

Station météorologique	Pluviométrie			
	MCG-RCP	rMAE (%)	RMSE (mm)	NRMSE (%)
Natitingou	IPSL-2.6	41,4	56,0	59,4
	IPSL-4.5	39,9	53,2	56,4
	HadGEM-2.6	41,2	55,8	59,2
	HadGEM-4.5	42,2	57,5	61,0
Parakou	IPSL-2.6	42,2	50,9	54,0
	IPSL-4.5	42,0	51,9	55,0
	HadGEM-2.6	44,8	57,4	60,8
	HadGEM-4.5	43,8	54,2	57,5
<b>Temperature minimale</b>				
-	MCG-RCP	rMAE (%)	RMSE (°C)	NRMSE (%)
Natitingou	IPSL-2.6	5,7	1,8	8,4
	HadGem-2.6	4,9	1,5	7,2
Parakou	IPSL-4.5	4,3	1,2	5,3
	HadGem-4.5	4,9	1,3	5,8
<b>Temperature maximale</b>				
Natitingou	IPSL-2.6	2,0	0,8	2,4
	HadGem-2.6	2,1	0,8	2,5
Parakou	IPSL-4.5	2,4	0,9	2,8
	HadGem-4.5	2,1	0,8	2,5

De manière générale les deux modèles (HadGem2 et IPSL) utilisés à partir de la plateforme MarkSim simulent bien les tendances de pluie et de températures observées de janvier à décembre (figure 2). Le régime de pluie uni-modal connue pour les deux zones climatiques est clairement représenté par les deux modèles avec des tendances de pluies plus concentrées dans les mois d'août et septembre (figures 2 et 3). Les températures sont aussi bien simulées avec des températures maximales plus basses en août et plus élevées en février-mars. Les températures minimales quant à elles sont plus hautes durant les mois de mars-avril et plus basses durant janvier-décembre pour les deux modèles climatiques quel que soit les zones climatiques. Les deux modèles simulent mieux les températures (maximales et minimales) que la pluviométrie (tableau 2). Les biais de simulation sont encore moindres pour les températures maximales que celles minimales quel que soit le modèle climatique (tableau 2). Il n'y a pas de différence nette de performance entre les deux modèles climatiques. Quel que soit la station météorologique, les deux modèles climatiques simulent les pluies avec une  $rMAE < 45\%$ , indice pour lequel le modèle IPSL montre des performances très légèrement meilleures que celui de HadGem2 (tableau 2).

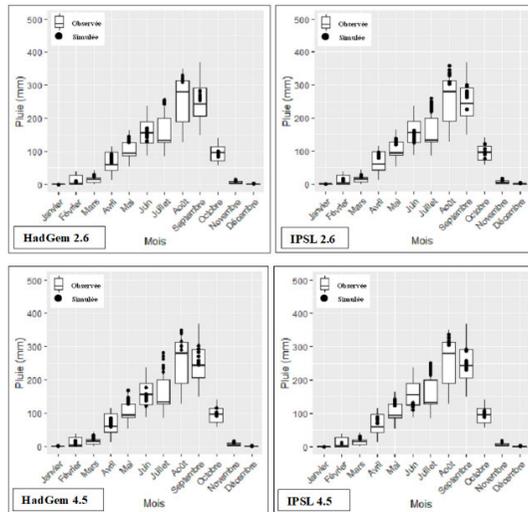


Figure 2. Evaluation des tendances pluviométriques simulées des modèles HadGEM2 et IPSL dans la zone soudanienne (stations de Natitingou)

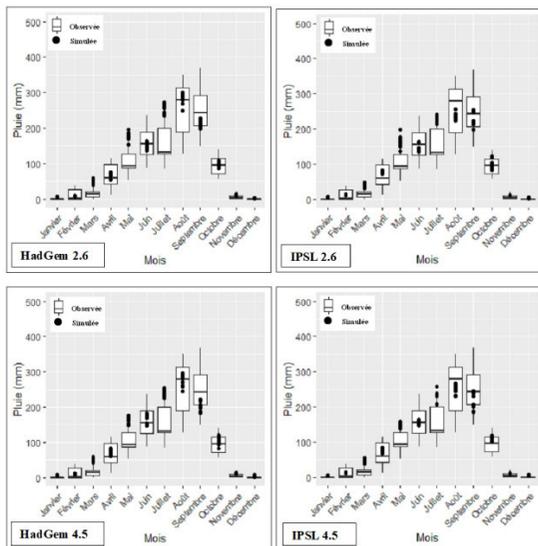
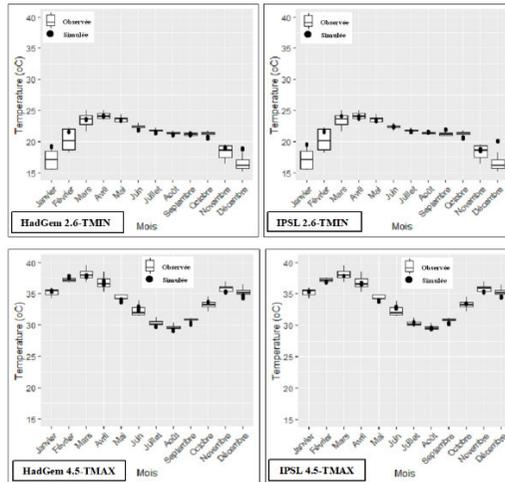
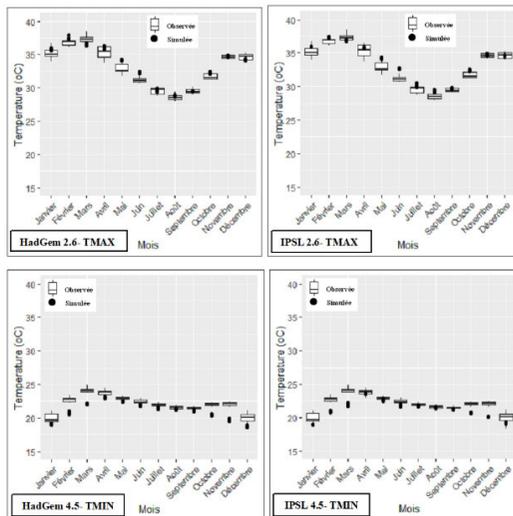


Figure 3. Evaluation des tendances pluviométriques simulées des modèles dans la zone sud-soudanienne (station de Parakou)



**Figure 4. Evaluation des tendances de températures minimales (TMIN) et maximales (TMAX) simulées des modèles dans la zone soudanienne (station de Natitingou)**



**Figure 5. Evaluation des tendances de températures minimales (TMIN) et maximales (TMAX) simulées des modèles dans la zone sud-soudanienne (station de Parakou)**

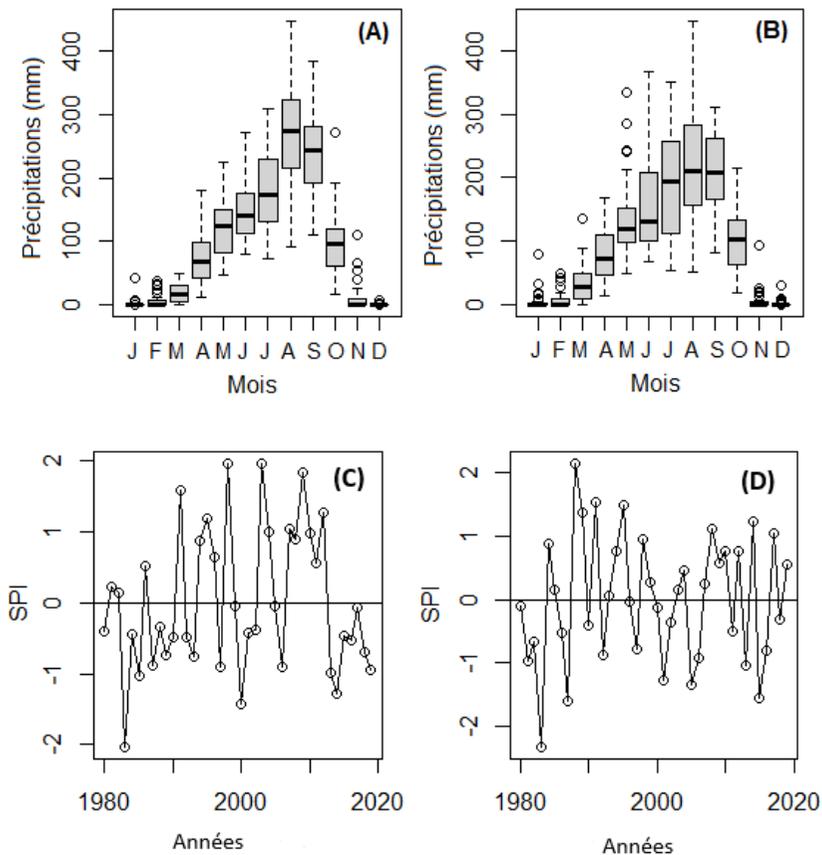
Les données de pluies simulées pour la zone soudanienne couvrent parfaitement l'intervalle de celles observées pour tous les modèles climatiques quel que soit le RCP (2.6 ou 4.5) excepté celles du mois de juillet. Les données des mois de mai et août sont couvertes en parties par le modèle HadGem2 (quel que soit le RCP) tandis que pour IPSL seulement août est concerné par cette tendance (figure 2). Dans la zone sud-soudanienne, c'est plutôt dans le mois de mai que les données simulées sont sans grande précision pour le RCP 2.6 (figure 3). Pour le RCP 4.5 les données simulées par les deux modèles climatiques sortent de l'intervalle des tendances observées sur deux mois sur 12 (mai et juillet). Par ailleurs, les données de températures simulées pour les deux zones climatiques couvrent les tendances observées quel que soit le modèle et le RCP, excepté le mois de décembre pour la zone soudanienne (site de Natitingou) et le mois de juin pour le RCP 2.6 du modèle IPSL (TMAX) et les mois de février, mars, octobre et novembre pour le RCP 4.5 (TMIN) quel que soit le modèle climatique (figure 4).

## **2. Résultats**

### **2.1. Variabilités pluvio-thermiques observées**

#### **2.1.1. Variabilité pluviométrique et indices de pluie standardisés**

La figure 6 présente les régimes pluviométriques et les indices pluviométriques standardisés au cours de la période d'observation (1980 à 2019) dans les zones climatiques soudanienne et sud-soudanienne au Bénin. La zone soudanienne (A) a enregistré au cours des années 1980 à 2019 une pluviométrie moyenne annuelle de  $1167,9 \pm 166,2$  mm. Par contre, la zone sud-soudanienne (B) a enregistré au cours de la même période (1980 à 2019) une pluviométrie moyenne annuelle de  $1147,9 \pm 218,7$  mm. Les régimes pluviométriques des zones d'étude révèlent une absence de tendance ( $p > 0,05$ ) sur la période de 1980 à 2019.



**Figure 6. Régimes et indices pluviométriques des zones soudanienne (A, C) et sud-soudanienne (B, D) entre 1980 et 2019 au Bénin**

Les séries pluviométriques annuelles indiquent une absence de tendance dans les zones soudanienne ( $P= 0,798$ ) et sud-soudanienne ( $P= 0,608$ ). La représentation graphique des SPI annuels (Figure 6 C, D) met en évidence des alternances entre années sèches et humides. En effet, entre 1980 et 2019, il est dénombré 26 années normales soit 65% dans les zones soudanienne et sud-soudanienne. Les années modérément humides

et sèches représentent respectivement 12,5% et 10% dans la zone soudanienne et 10% et 10% dans la zone sud-soudanienne. Les années très humides et sèches représentent respectivement 5% et 0% dans la région soudanienne et 5% et 5% dans la région sud-soudanienne. Les années extrêmement humides et sèches représentent respectivement 5% et 2,5% dans la zone soudanienne et 2,5% et 2,5% dans la zone sud-soudanienne. Cette variabilité interannuelle des précipitations a motivé la recherche de rupture au sein des différentes séries pluviométriques.

## 2.2. Détection des ruptures au sein des séries pluviométriques annuelles

A la recherche de rupture de stationnarité, les tests de Pettitt et de Buishand ont permis d'observer une modification dans l'évolution de la pluviométrie en 1990 dans la zone soudanienne et en 1987 dans la zone sud-soudanienne (Figure 7).

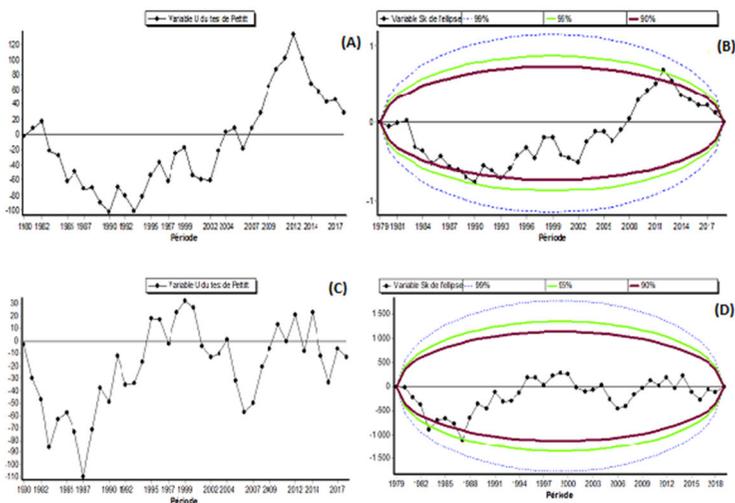
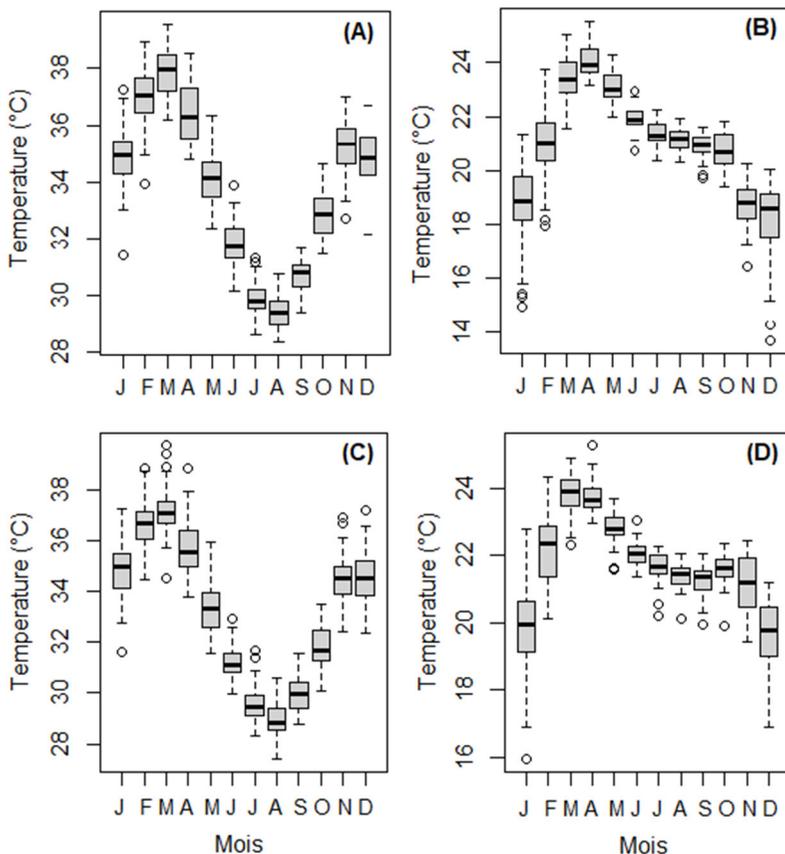


Figure 7. Tests de Pettitt et de Buishand des séries pluviométriques des zones soudanienne (A, B) et sud-soudanienne (C, D) sur la période de 1980-2019 au Bénin

La zone soudanienne a enregistré une hauteur pluviométrique annuelle moyenne de  $1084,96 \pm 115,88$  mm à la première sous-période (1980-1990) et de  $1199,31 \pm 173,06$  mm à la deuxième sous-période (1991-2019). Cette zone a connu une hausse des précipitations de 114,35 mm (10,54%) à la deuxième sous-période par rapport à la première sous-période. Ainsi, la différence entre les précipitations moyennes enregistrées au cours des deux sous-périodes dans la zone soudanienne est significative ( $P= 0,02$ ). Quant à la zone sud-soudanienne, elle a enregistré des précipitations annuelles moyennes de  $1007,87 \pm 219,19$  mm au cours de la première sous-période (1980-1987) et de  $1182,85 \pm 207,40$  mm au cours de la deuxième sous-période (1988-2019). Elle a connu également une augmentation de 174,98 mm (17,36%) des précipitations à la deuxième sous-période par rapport à la première sous-période. Les précipitations moyennes enregistrées au cours des deux sous-périodes dans la zone sud-soudanienne présentent également une différence statistiquement significative ( $P= 0,04$ ). Ces analyses montrent l'amélioration des conditions pluviométriques dans les deux zones d'étude au cours des dernières années.

### **2.3. Régimes thermiques et indices de température standardisés**

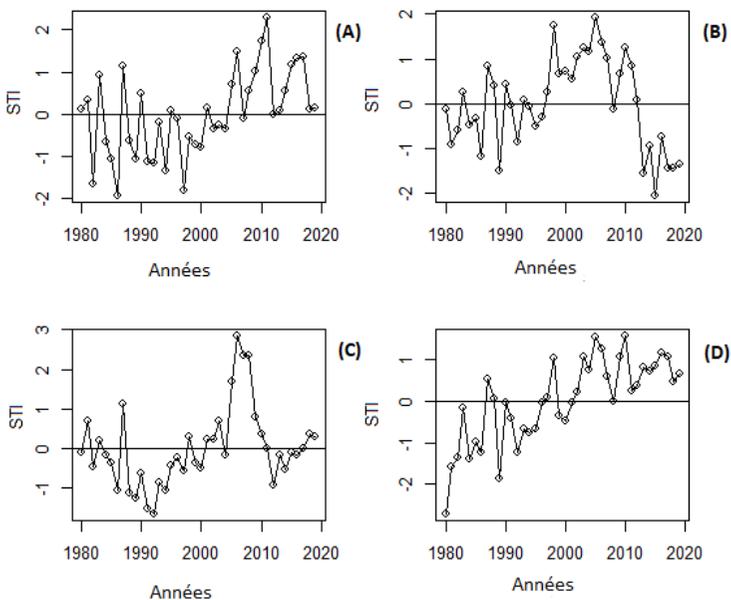
La figure 8 présente les régimes des températures maximales et minimales au cours des quarante dernières années (1980 à 2019) dans les zones climatiques soudanienne et sud-soudanienne au Bénin.



**Figure 8. Régimes des températures maximales et minimales dans les zones soudanienne (A, B) et sud-soudanienne (C, D) entre 1980 et 2019 au Bénin**

Les températures maximales et minimales moyennes étaient respectivement de  $33,7 \pm 2,8^{\circ}\text{C}$  et  $21,1 \pm 1,9^{\circ}\text{C}$  dans la zone soudanienne entre 1980 et 2019. La zone sud-soudanienne a connu des évolutions similaires au cours de la même période d'où les températures maximales ( $33,2 \pm 2,8^{\circ}\text{C}$ ) et minimales ( $21,7 \pm 1,3^{\circ}\text{C}$ ). Les résultats du test de tendance indiquent une tendance à la hausse des températures maximales au cours des mois de mars, juillet,

novembre et décembre ( $p < 0,05$ ) et des températures minimales au cours des mois d'avril à octobre ( $p < 0,05$ ) dans la zone soudanienne. Par ailleurs, les températures minimales des mois de janvier et de décembre indiquent une tendance à la baisse dans la zone soudanienne. Les températures maximales des mois de janvier, février, mai, juillet, novembre et décembre indiquent une tendance à la hausse ( $p < 0,05$ ) et les températures minimales des mois de février à décembre affichent une tendance à la hausse ( $p < 0,05$ ) dans la zone sud-soudanienne. Les évolutions spatio-temporelles des régimes thermométriques ont induit des modifications des températures interannuelles (Figure 9).

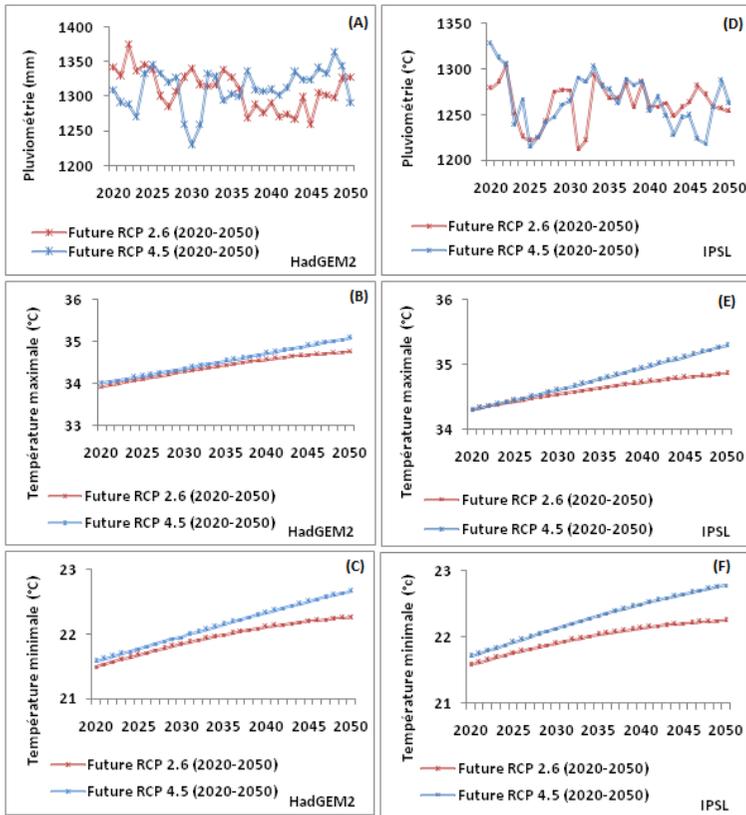


**Figure 9. Indices thermométriques standardisés (STI) des températures maximales et minimales dans les zones soudanienne (A, B) et sud-soudanienne (C, D) entre 1980 et 2019 au Bénin**

La représentation graphique des STI annuels des températures maximales et minimales met en évidence les successions régulières et périodiques des années chaudes et froides. Ainsi, la zone soudanienne a enregistré entre 1980 et 2019 respectivement 57,5% et 60% d'années où les températures maximales et minimales sont proches de la moyenne qui est de 33,7°C pour les températures maximales et 21,1°C pour les minimales. Par contre, la zone sud-soudanienne a enregistré au cours de la même période, respectivement 72,5% et 62,5% d'années où les températures maximales et minimales sont proches de la moyenne qui est de 33,2°C pour les températures maximales et 21,7°C pour les minimales. Les résultats du test de tendance indiquent une tendance à la hausse des températures maximales ( $P= 0,00$ ) et une absence de tendance dans les températures minimales ( $P= 0,86$ ) dans la zone soudanienne. Par contre, les résultats indiquent une tendance à la hausse des températures maximales ( $P= 0,02$ ) et des minimales ( $P= 0,00$ ) dans la zone sud-soudanienne.

#### **2.4. Projections pluvio-thermiques**

Les changements futurs entre 2020 et 2050 relatifs à la pluviométrie et aux températures maximales et minimales dans les zones soudanienne et sud-soudanienne sont illustrés par les figures 10 et 11.



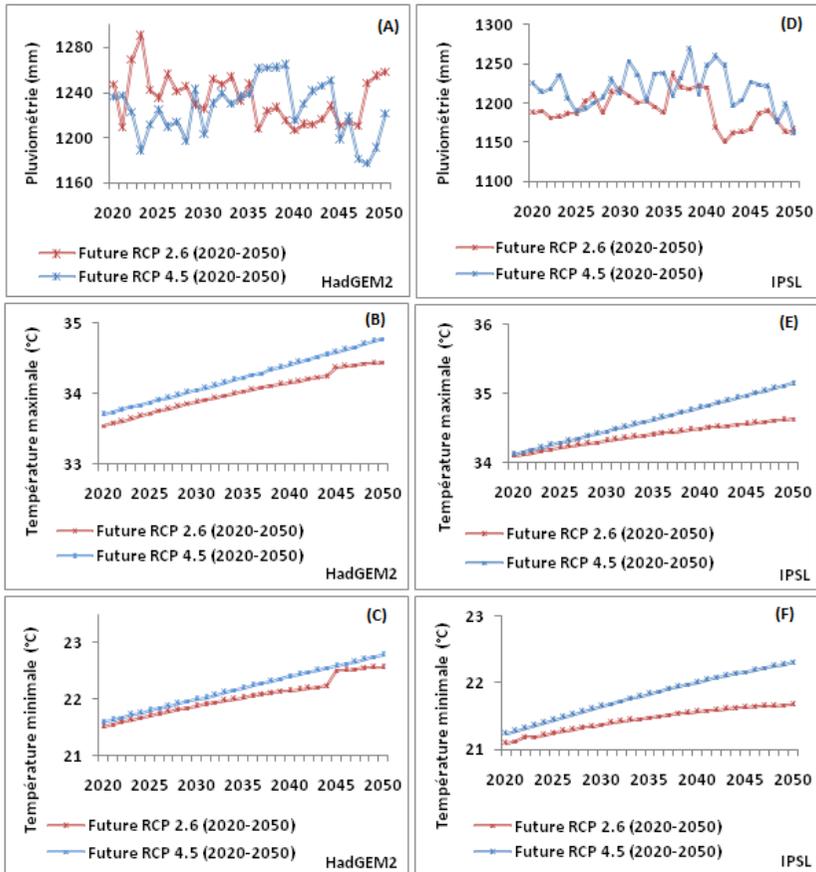
**Figure 10. Projection de la pluviométrie, des températures maximales et minimales avec les modèles HadGEM2 (A, B, C) et IPSL (D, E, F) dans la zone soudanienne à l'horizon 2050 au Bénin**

Dans la zone soudanienne, il est remarqué que le modèle HadGEM2 prévoit des moyennes pluviométriques annuelles de 1309,4 mm (RCP 2.6) et de 1311,1 mm (RCP 4.5) contre 1261,7 mm (RCP 2.6) et 1265,0 mm (RCP 4.5) pour le modèle IPSL entre 2020 et 2050. Les résultats du test de Mann-Kendall saisonnier des mois pluvieux entre mai et octobre appliqué aux projections du modèle HadGEM2 affichent une évolution significative ( $p < 0,05$ ), à la hausse des précipitations dans les mois de juin et octobre et une évolution à la baisse des précipitations dans les mois de juillet et septembre. Le

modèle IPSL prévoit une augmentation des précipitations dans les mois de juin et septembre et une tendance à la baisse des précipitations dans les mois de mai, août et octobre. Les résultats du test de tendance indiquent une absence d'évolution significative dans les précipitations interannuelles ( $p > 0,05$ ) avec le modèle climatique IPSL. Par contre, les projections issues du modèle HadGEM2 présentent une évolution significative ( $p < 0,05$ ) à la hausse (RCP 4.5) et à la baisse (RCP 2.6) des précipitations interannuelles.

Le modèle climatique HadGEM2 prévoit également des températures maximales moyennes de  $34,4^{\circ}\text{C}$  (RCP 2.6) et  $34,5^{\circ}\text{C}$  (RCP 4.5) contre  $34,6^{\circ}\text{C}$  (RCP 2.6) et  $34,8^{\circ}\text{C}$  (RCP 4.5) pour le modèle climatique IPSL entre 2020 et 2050. Les projections des températures minimales moyennes sont similaires entre modèles climatiques dont le HadGEM2 prévoit  $21,9^{\circ}\text{C}$  (RCP 2.6) et  $22,1^{\circ}\text{C}$  (RCP 4.5) et le IPSL prévoit  $22,0^{\circ}\text{C}$  (RCP 2.6) et  $22,3^{\circ}\text{C}$  (RCP 4.5). Les résultats du test de tendance affichent une tendance à la hausse des températures maximales et minimales projetées par les différents modèles climatiques sans la zone soudanienne ( $p < 0,05$ ).

Dans la zone sud-soudanienne, le modèle climatique HadGEM2 prévoit des moyennes pluviométriques annuelles de 1234,1 mm (RCP 2.6) et 1225,0 mm (RCP 4.5) contre 1191,6 mm (RCP 2.6) et 1218,6 mm (RCP 4.5) pour le modèle climatique IPSL entre 2020 et 2050. Les résultats du test de tendance saisonnière appliqué aux données issues du modèle HadGEM2 indiquent une évolution significative ( $p < 0,05$ ), à la hausse des précipitations dans les mois de mai et juin et une baisse des précipitations dans les mois de juillet, août et septembre. Les données issues du modèle climatique IPSL présentent également une évolution significative ( $p < 0,05$ ), à la hausse des précipitations dans les mois de juin et octobre et une tendance à la baisse des précipitations dans les mois de mai et juillet. Les résultats du test de tendance indiquent une absence de tendance dans les précipitations interannuelles projetées par les différents modèles climatiques dans la zone sud-soudanienne ( $p > 0,05$ ).



**Figure 11. Projection de la pluviométrie, des températures maximales et minimales avec les modèles climatiques HadGEM2 (A, B, C) et IPSL (D, E, F) dans la zone sud-soudanienne à l'horizon 2050 au Bénin**

Le modèle HadGEM2 prévoit des températures maximales moyennes de 34,0°C (RCP 2.6) et 34,2°C (RCP 4.5) contre 34,4°C (RCP 2.6) et 34,6°C (RCP 4.5) pour le modèle IPSL. Le modèle climatique HadGEM2 prévoit également des températures minimales moyennes de 21,5°C (RCP 2.6) et 21,7°C (RCP 4.5) contre 21,4°C (RCP 2.6) et 21,8°C (RCP 4.5) pour le modèle IPSL.

Les résultats du test de tendance indiquent une tendance à la hausse des températures maximales et minimales projetées par les différents modèles climatiques dans la zone sud-soudanienne ( $p < 0,05$ ). Le tableau 3 présente le rapport entre les données de références (1980-2019) et aux données issues des deux modèles climatiques à l'horizon 2050.

**Tableau 3. Synthèse des données de références et des sorties des deux modèles climatiques à l'horizon 2050**

Variables	Reference (1980-2019)		HadGEM2 (2020-2050)				IPSL (2020-2050)			
	Moy	Ecart	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 2.6		RCP 4.5	
			Moy	Ecart	Moy	Ecart	Moy	Ecart	Moy	Ecart
Zone soudanienne										
P (mm)	1167,9	166,2	1309,4	28,0	1311,1	29,0	1261,7	22,7	1265,0	28,6
Tmax (°C)	33,7	0,4	34,4	0,3	34,5	0,3	34,6	0,2	34,8	0,3
Tmoy (°C)	27,4	0,3	28,2	0,2	28,3	0,3	28,3	0,2	28,5	0,3
Tmin (°C)	21,1	0,4	21,9	0,2	22,1	0,3	22,0	0,2	22,3	0,3
Zone sud-soudanienne										
P (mm)	1147,8	218,7	1234,1	20,9	1225,0	24,2	1191,6	21,6	1218,6	24,3
Tmax (°C)	33,2	0,6	34,0	0,3	34,2	0,3	34,4	0,2	34,6	0,3
Tmoy (°C)	27,5	0,5	27,8	0,3	28,0	0,3	27,9	0,2	28,2	0,3
Tmin (°C)	21,7	0,4	21,5	0,3	21,7	0,4	21,4	0,2	21,8	0,3

Le modèle HadGEM2 prévoit une augmentation pluviométrique de l'ordre de 11,4% (RCP 2.6) et 11,5% (RCP 4.5) à l'horizon 2050 par rapport à la période de référence dans la zone soudanienne. Le modèle IPSL prévoit également une augmentation pluviométrique de l'ordre de 8,2% (RCP 2.6) et 8,0% (RCP 4.5) à l'horizon 2050 par rapport à la période de référence dans la zone soudanienne. Les modèles climatiques prévoient également une hausse des températures maximales moyennes de 0,7°C (RCP 2.6) et 0,8°C (RCP 4.5) pour le modèle HadGEM2 contre 0,9°C (RCP 2.6) et 1,1°C pour le modèle IPSL. Le modèle HadGEM2 prévoit une augmentation des températures minimales moyennes de l'ordre de 0,8°C (RCP 2.6) et 1°C (RCP 4.5) contre 0,9°C (RCP 2.6) et 1,2°C (RCP 4.5) pour le modèle IPSL.

Le modèle HadGEM2 prévoit une tendance haussière des précipitations de l'ordre de 7,2% (RCP 2.6) et 6,5% (RCP 4.5) à l'horizon 2050 dans la zone sud-soudanienne. Le modèle climatique IPSL prévoit également une hausse pluviométrique de l'ordre de 3,7% (RCP 2.6) et 6,1% (RCP 4.5) dans la zone sud-soudanienne. De plus, le HadGEM2 prévoit une hausse des températures maximales moyennes de 0,8°C (RCP 2.6) et 1°C (RCP 4.5) contre 1,2°C (RCP 2.6) et 1,4°C pour le modèle IPSL. Le modèle HadGEM2 prévoit une stabilité et baisse des températures minimales moyennes de l'ordre de -0,2°C (RCP 2.6) contre -0,3°C (RCP 2.6) pour le modèle IPSL.

A l'échelle interannuelle, les indices pluviométriques standardisés présentent un caractère irrégulier de la pluviométrie dans les zones soudanienne et sud-soudanienne à l'horizon 2050. En effet, le modèle HadGEM2 prévoit entre 2020 et 2050 dans la zone soudanienne, 16 années humides (51,6%) contre 15 années sèches (48,4%) avec des degrés d'humidité et de sécheresse variable d'une année humide ou sèche à une autre (RCP 2.6 et RCP 4.5). Le modèle IPSL prévoit sur la même période dans la zone soudanienne, 16 années humides (51,6%) contre 15 années sèches (48,4%) selon le premier scénario (RCP 2.6) et 16 années sèches (51,6%) contre 15 années humides (48,4%) selon le deuxième scénario (RCP 4.5) avec des degrés d'humidité ou de sécheresse variable d'une année à une autre.

Dans la zone sud-soudanienne, le modèle HadGEM2 prévoit entre 2020 et 2050, 16 années sèches (51,6%) contre 15 années humides (48,4%) selon le premier scénario (RCP 2.6) et 14 années sèches (45,2%) contre 17 années humides (54,8%) selon le deuxième scénario (RCP 4.5) avec des niveaux d'humidité ou de sécheresse variable dans le temps et dans l'espace. Le modèle IPSL prévoit sur la même période dans la zone sud-soudanienne, 18 années sèches (58,1%) contre 13 années humides (41,9%) selon le premier scénario (RCP 2.6) et 15 années sèches (48,4%) contre 16 années humides (51,6%) selon le deuxième scénario (RCP 4.5). Ces analyses révèlent une alternance marquée des années excédentaires et

déficitaires à l'horizon 2050 dans la zone d'étude. Ces conditions pluviométriques combinées à l'augmentation des températures affecteront plusieurs secteurs économiques vitaux et les populations. Dans ces conditions, il est nécessaire de prévoir des options d'adaptation aux modifications climatiques sur des échelles spatio-temporelles dans les zones soudanienne et sud-soudanienne.

### **3. Discussion**

Les régimes pluviométriques moyens des zones climatiques soudanienne et sud-soudanienne du Bénin ont connu une succession régulière et périodique des périodes humides et sèches entre 1980 et 2019, avec une tendance générale à la hausse des températures maximales et minimales et une instabilité des précipitations annuelles. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Vissin (2007), Gnangle *et al.* (2011), Boko *et al.* (2012) et Djohy *et al.* (2017) qui ont rapporté que la région septentrionale du Bénin a enregistré au cours des dernières décennies une augmentation des températures et une instabilité des quantités d'eau précipitées. Ces résultats sont également confirmés par d'autres études réalisées dans la région ouest-africaine par Bodian (2014), Faye *et al.* (2015), Kabore *et al.* (2017), Sambou *et al.* (2018) et Bambara *et al.* (2019) qui ont révélé la sensibilité de la région aux changements et variabilités climatiques notamment à la baisse des volumes d'eau précipités et à la hausse des températures.

Les données collectées sur la période de 1980-2019 révèlent des périodes de rupture des précipitations en 1990 et 1987 respectivement dans les zones soudanienne et sud-soudanienne. Les résultats obtenus par Alamou *et al.* (2016) ont confirmé la rupture de stationnarité intervenue dans la zone d'étude et les différentes modifications du régime pluviométrique. D'autres auteurs ont également évoqué l'instabilité et la baisse pluviométrique dans la partie septentrionale du Bénin (Gnangle *et al.*, 2011), sans pour autant utiliser des tests statistiques de mise évidence des ruptures de tendance pluviométrique. Cette instabilité et baisse des précipitations s'accompagne de la réduction significative du nombre

annuel de jours de pluie (Boko *et al.*, 2012 ; Kabore *et al.*, 2017). Mais cette étude a mis en exergue un « retour » des précipitations dans les zones soudanienne et sud-soudanienne depuis respectivement les années 1991 et 1988. La reprise des pluies est plus prononcée dans la zone sud-soudanienne (17,4%) que dans la zone soudanienne (10,5%), car la zone soudanienne a enregistré plus d'années sèches au cours de la période 1980-2019. En effet, Alamou *et al.* (2016) avaient déjà rapporté que la zone climatique soudanienne a connu une persistance des années déficitaires sur la période de 1930 à 2011. L'amélioration des conditions pluviométriques en Afrique de l'Ouest est due à l'augmentation des évènements pluvieux quotidiens de forte intensité (Bodian, 2014 ; Hangnon *et al.*, 2015). Cette hausse des précipitations annuelles impacte positivement la production agropastorale des zones d'étude. Djohy *et al.* (2015) ont montré une tendance haussière des cumuls pluviométriques saisonniers entre 1965 et 2012 dans la zone sud-soudanienne, avec une tendance progressive des rendements et des productions annuelles de céréales. De plus, ces conditions climatiques et environnementales rendent favorables les activités pastorales dans la zone d'étude (Djohy *et al.*, 2021). La reprise des pluies est globalement imputable à la hausse des jours pluvieux (Kabore *et al.*, 2017). Ainsi, l'augmentation des pluies est liée dans la région ouest-africaine aux évènements de forte intensité pluviométrique, car une tendance à l'augmentation des jours pluvieux est constatée depuis la fin des années 1980 (Ly *et al.*, 2013).

Les projections climatiques réalisées à l'horizon 2050 avec comme période de référence 1980-2019, révèlent une tendance à la hausse des températures et des précipitations. Par contre, les projections climatiques de Boko *et al.* (2012) pour les régions méridionale et septentrionale du Bénin ont été faites à l'horizon 2050 avec comme période de référence 1951-2010. Elles ont révélé une tendance à la hausse des températures dans l'ordre de 0,9°C (sud-ouest) à 1,1°C (nord-ouest). De plus, la région méridionale pourrait bénéficier d'une pluviométrie annuelle stable

et la région septentrionale pourrait bénéficier d'un accroissement des pluies périodiques dans l'ordre de 3,3% à 3,8%. Les projections climatiques réalisées par Akponikpe *et al.* (2019) dans quelques communes du nord et du sud du Bénin à l'aide de quatre modèles climatiques (ECEARTH, HadGEM2, IPSL et MPSIEM) ont affiché des tendances à la hausse des précipitations. Ces projections se sont basées sur une période de référence de 1950-2005. Les modèles climatiques ECEARTH et HadGEM2 ont affiché une tendance haussière des pluies annuelles respectivement entre 6 et 10% et entre 1 à 15%. Les modèles IPSL et MPSIEM ont affiché également une tendance à la hausse des pluies annuelles entre 6 et 10% dans le nord-est du Bénin. Dans le même temps, ces modèles ont affiché une tendance baissière des pluies annuelles entre 6 et 10% dans quelques communes situées dans le nord-ouest et le sud du Bénin. Les projections climatiques à l'horizon 2050 réalisées par Kpan *et al.* (2021) dans la Région du Sud-Est de la Côte d'Ivoire à l'aide du modèle HadCM3 inclus dans le logiciel LARS-WG, avec comme période de référence 1963-2014 ont affiché des résultats similaires. Elles prévoient également une tendance à la hausse des températures de 0,1°C à 0,2°C entre 2015 et 2050. De plus, les précipitations connaîtront une hausse de 3 à 6% entre 2015 et 2050.

## **Conclusion**

La présente étude a permis de constater que les zones climatiques soudanienne et sud-soudanienne sont, comme la plupart des différentes zones climatiques des pays de l'Afrique de l'Ouest, confrontées aux variabilités et changements climatiques, avec cependant, des différences entre les zones climatiques. En effet, les différents tests de détection de rupture de stationnarité ont permis de relever diverses modifications dans les séries météorologiques. Les quantités d'eau précipitées ont connu des instabilités dans les deux zones d'étude avec une modification plus marquée dans la zone sud-soudanienne où une reprise de la pluviosité a été observée à partir de 1988. Par contre, dans la zone soudanienne, la quantité d'eau précipitée a connu une baisse à partir de 2013. Les zones

climatiques d'étude ont enregistré au cours de la période de 1980 à 2019 environ 65% d'années où les quantités d'eau précipitées sont proches de la moyenne (entre les amplitudes -0,99 et 0,99). De plus, les températures maximales et minimales ont connu des successions régulières et périodiques d'années chaudes. La zone soudanienne a enregistré majoritairement des températures maximales (57,5%) et minimales (60%) proches de la normale (entre les amplitudes -0,99 à 0,99) au cours de la période 1980 à 2019. La zone sud-soudanienne a enregistré au cours de la même période plusieurs années où les températures maximales (57,5%) et minimales (52,5%) sont proches de la normale. Les différents modèles climatiques utilisés prévoient non seulement une augmentation des précipitations, mais également une hausse des températures maximales dans la zone d'étude. Par contre, les modèles climatiques utilisés prévoient une stabilité et une baisse des températures minimales moyennes dans les zones soudanienne et sud-soudanienne à l'horizon 2050.

### **Références bibliographiques**

- Akognongbe, A. (2009). *Analyse hydrologique multi-échelle du bassin de l'Ouémé supérieur : processus dominants à l'origine des écoulements*. Rapport de Master Recherche Eau et Environnement, Université de Montpellier 2, IRD, 50 p.
- Akponikpe, P.B.I., Tovihoudji, P., Lokonon, B., Kpadonou, E., Amegnaglo, J., Segnon, A.C., Yegbemey, R., Hounsou, M., Wabi, M., Totin, E., Fandohan-Bonou, A., Dossa, E., Ahojo, N., Laourou, D. & Aho, N. (2019). *Etude de Vulnérabilité aux changements climatiques du Secteur Agriculture au Bénin*. Rapport d'étude, Climate Analytics GmbH, Berlin, 97 p.
- Alamou, E.A., Quenum, G.M.L.D., Lawin, E.A., Badou, D.F. & Afouda, A.A. (2016). Variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le bassin de l'Ouémé, Bénin. *Afrique Science*, 12(3) : 315-328.
- Amoussou, E. (2010). *Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire*

Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest). Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, France, 313 p.

Ardoïn-Bardin, S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, France, 436 p.

Atiye, Y.E. (2017). Caractérisation des risques hydroclimatiques dans le bassin versant béninois du fleuve mono à l'exutoire d'athiémé. Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 255 p.

Badjana, H.M., Hounkpe, K., Wala, K., Batawila, K., Akpagana, K. & Edjame, K.S. (2014). Analyse de la variabilité temporelle et spatiale des séries climatiques du nord du Togo entre 1960 et 2010. *European Scientific Journal*, 10 (11) : 257-275.

Bambara, D., Sawadogo, J., Kabore, O. & Bilgo, A. (2019). Variabilité de certains paramètres climatiques et impacts sur la durée des périodes humides de développement végétal dans une station au centre et une autre au nord du Burkina Faso. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 19 (1) : 1-22, <https://doi.org/10.4000/vertigo.24384>

Bello, D.O., Ahoton, L.E., Saidou, A., Akponikpè, I.P.B., Ezin, V.A., Balogoun, I., Aho, N. (2017). Climate change and cashew (*Anacardium occidentale* L.) productivity in Benin (West Africa) : perceptions and endogenous measures of adaptation. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 11(3): 924-946.

Biaou, C.F. (2006). Monographie de la commune de Djougou. Mission de décentralisation, Bénin, Afrique Conseil, 48 p.

Bodian, A. (2014). Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, 8 : 297-312.

Bodian, A., Bacci, M. & Diop, M. (2016). Impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin de la Casamance.

Association Internationale de Climatologie, Lausanne, Besançon, 433-438.

Bodian, A., Dezetter, A. & Dacosta, H. (2012). Apport de la modélisation pluie-débit pour la connaissance de la ressource en eau : application au haut bassin du fleuve Sénégal. *Climatologie*, 9 : 109-125.

Bodian, A., Dezetter, A., Diop, L., Deme, A., Djaman, K. & Diop, A. (2018). Future Climate Change Impacts on Streamflows of Two MainWest Africa River Basins: Senegal and Gambia. *Hydrology*, 5(21): 1-18.

Boko, M., Kosmowski, F. & Vissin, W.E. (2012). Les Enjeux du Changement Climatique au Bénin : Programme pour le Dialogue Politique en Afrique de l'Ouest. *Konrad-Adenauer-Stiftung*, Bénin, 65 p.

Buishand, T.A. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, 58(1-2), p. 11-27, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90066-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90066-X)

Buishand, T.A. (1984). Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology*, 73(1-2), 51-69, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90032-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90032-5)

Cisse, P. (2014). Comportements des éleveurs sahéliens maliens face à la variabilité climatique. *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, 1 : 107-121.

Collins, W.J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C.D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A. & Woodward, S. (2011). Development and evaluation of an Earth-System model-HadGEM2. *Geosci. Model Dev.*, 4(4): 1051–1075, <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>

Deme, A., Gaye, A.T. & Hourdin, F. (2015). Les projections du climat en Afrique de l'Ouest. Évidences et incertitudes : 61-87. In Sultan, B. Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A. & Soumaré, M.A. « les sociétés

*rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* », IRD Éditions, 463 p.

Diawara, H. & Lobanov, V.A. (2019). Identification des modèles adéquats de prévision du climat sahélien sur la base du CMIP5: Cas du Mali. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 4(2): 1360-1366, <https://dx.doi.org/10.22161/ijeab.45.10>

Diba, I., Camara, M., Sarr, A.B., Basse, J., Sabaly, H.N. & Diedhiou, A. (2021). Caractérisation des extrêmes composés de précipitation et de température au Sénégal : climat présent et futur. *Afrique Science*, 18(1) : 12-30.

Djohy, G.L., Edja, A.H. & Nouatin, G.S. (2015). Variation climatique et production vivrière : la culture du maïs dans le système agricole péri-urbain de la commune de Parakou au Nord-Benin. *Afrique Science*, 11(6) : 183-194.

Djohy, G.L., Sounon Bouko, B., Dossou, P.J. & Yabi, J.A. (2021). Perception des changements climatiques par les éleveurs de bovins et observations météorologiques dans le bassin de l'Ouémé supérieur au Bénin. *Rev. Elev. Med. Vet. Pays Trop.*, 74 (3): 145-152, <https://doi.org/10.19182/remvt.36761>

Djohy, G.L., Totin, V.S.H., Kinzo, N.E., Sinwongou, M.A., Avahouin, C.N.N., Akplogan, K.N. & Doumahoun, D.S.E. (2017). Extrêmes climatiques dans le domaine soudanien au Bénin : étude comparée des perceptions populaires et des données climatologiques de l'ASCENA. Colloque de l'AIC, Université de Sfax, Tunisie, 281-286.

Doukpolo, B. (2014). *Changements climatiques et productions agricoles dans l'Ouest de la République Centrafricaine*. Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 337 p.

Dufresne, J.L., Foujols, M.A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benshila, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., De Noblet, N., Duvel, J.P., Ethe, C., Fairhead,

L., Fichet, T., Flavoni, S., Friedlingstein, P., Grandpeix, J.Y., Guez, L., Guilyardi, E., Hauglustaine, D., Hourdin, F., Idelkadi, A., Ghattas, J., Joussaume, S., Kageyama, M., Krinner, G., Labetoulle, S., Lahellec, A., Lefebvre, M.P., Lefevre, F., Levy, C., Li, Z.X., Lloyd, J., Lott, F., Madec, G., Mancip, M., Marchand, M., Masson, S., Meurdesoif, Y., Mignot, J., Musat, I., Parouty, S., Polcher, J., Rio, C., Schulz, M., Swingedouw, D., Szopa, S., Talandier, C., Terray, P., Viovy, N. & Vuichard, N. (2013). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model : from CMIP3 to CMIP5. In : Presentation and analysis of the IPSL and CNRM climate models used in CMIP5. *Climate Dynamics*, 40 (9-10): 2123-2165, <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>

Faye, C., Sow, A.A. & Ndong, J.B. (2015). Étude des sècheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal. *Physio-Géo, Géographie physique et environnement*, 9 : 17-35.

GIEC (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques*. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève, Suisse, 103 p.

GIEC (2020). Changement climatique et terres émergées. Résumé à l'intention des décideurs. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 36 p.

GIEC (2022). Changement climatique 2022 : Impacts, adaptation et vulnérabilité. Résumé pour les décideurs. Deuxième partie du sixième rapport d'évaluation du GIEC, 35 p.

Gilbert, R.O. (1987). *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. Van Nostrand Reinhold Company: New York, 320 p., <https://www.osti.gov/servlets/purl/7037501>

Gnangle, C.P., Glele Kakai, R., Assogbadjo, A.E., Vodounnon, S., Yabi, J.A. & Sokpon, N. (2011). Tendances climatiques passées,

modélisation, perceptions et adaptations locales au Bénin. *Climatologie*, 8: 27-41.

Hangnon, H., De Longueville, F. & Ozer P. (2015). Précipitations 'extrêmes' et inondations à Ouagadougou : quand le développement urbain est mal maîtrisé. Association Internationale de Climatologie, Liège, Belgique, 497-502.

IPCC (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. University Press, Cambridge, UK, and New York, 582 p.

IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 151 p.

Jones, P.G. & Thornton, P.K. (2013). Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications, *Agricultural Systems*, 114, 1-5.

Jones, P.G. (2013). MarkSim Standalone for DSSAT Users. International Center for Tropical Agriculture (CIAT), Cali, Colombia, 10 p.

Jones, P.G., Thornton, P.K. (2000). MarkSim: Software to generate daily weather data for Latin America and Africa. *Agronomy Journal*, 92(3):445–453, <https://doi.org/10.2134/agronj2000.923445x>

Kabore, P.N., Ouedraogo, A., Sanon, M., Yaka, P. & Some, L. (2017). Caractérisation de la variabilité climatique dans la région du centre-nord du Burkina Faso entre 1961 et 2015. *Climatologie*, 14 : 82-95.

Kora, O. (2006). *Monographie de la Commune de Tchaourou*. Mission de décentralisation, Cotonou, Bénin, Afrique Conseil, 45 p.

Koumassi, D.H. (2014). *Risques hydroclimatiques et vulnérabilités des écosystèmes dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Couberi*.

Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 244 p.

Kpan, O.J.G., Gnamba, F.M., Gahi, Z.N., Kouame, B., Baka, D., Oga, Y.M.S. & Biemi, J. (2021). Simulation des précipitations et des températures annuelles du sud-est côtier ivoirien à l'horizon 2050 avec le logiciel LARS-WG 5 et le modèle HadCM3. *Revue Africaine et Malgache de Recherche Scientifiques*, 9(1) : 23-31.

Ly, M., Traore, S.B., Alhassane, A. & Sarr, B. (2013). Evolution of some observed climate extremes in the West African Sahel. *Weather and Climate Extremes*, 1: 19-25.

Mann, H.B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13, 245.

Mehdaoui, R., Mili, E.M. & Seghir, A. (2018). Caractérisation à l'aide du SPI de la Sécheresse climatique dans le bassin versant de Ziz (Sud-Est, Maroc). *European Scientific Journal*, 14 (21): 177-194.

Métadier, M. (2006). *Bilan hydrologique du bassin de la Donga (zone soudanienne centre-Bénin) et d'un de ses sous-bassins par modélisation (Topamma) : Etude du réalisme*. Rapport de Master Recherche Eau et Environnement, Agro Montpellier, IRD, 89 p.

Nicholson, S.E. (2001). Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. *Climate research*, 17 : 123-144.

OMM (2012). *Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé*. Organisation Météorologique Mondiale, 17 p.

OMM (2018). *Guide des pratiques climatologiques*. Organisation météorologique mondiale, 160 p.

Pettitt, A.N. (1979). A Non-Parametric Approach To The Change-Point Problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126-135, <https://doi.org/10.2307/2346729>

Richardson, C.W. (1981). Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resources*

Research, 17(1):182-190,  
<https://doi.org/10.1029/WR017i001p00182>

Sambakhe, D. (2018). Recherche de carte d'idéotypes de sorgho d'après un modèle de culture : optimisation conditionnelle à l'aide d'un métamodèle de krigeage. Thèse de doctorat, Université Montpellier, France, 116 p.

Sambou, S., Dacosta, H. & Paturel, J.E. (2018). Variabilité spatio-temporelle des pluies de 1932 à 2014 dans le bassin versant du fleuve Kayanga/ Gèba (République de Guinée, Sénégal, Guinée Bissau). *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, 12 : 61-78.

Sebbar, A. (2013). *Etude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie au Maroc (1935 2005): Réactualisation de la carte des précipitations*. Thèse de doctorat, Université Hassan II Mohammedia - Casablanca, Maroc, 187 p.

Seidou, O., Zango, B.S. & Nathan Boongo, B.B. (2017). Évaluation de la performance des modèles climatiques sur le Niger. Rapport technique II, République du Niger, 330 p.

Sintondji, L., Badou, F., Ahouansou, M., Hounkpe, J., Assogba Balle, R., Gaba, C., & Vissin E. (2019). Etude de Vulnérabilité face aux changements climatiques du Secteur Ressources en Eau au Bénin. Rapport d'étude, Climate Analytics gGmbH, Berlin, 62 p.

Soro, G.E., Anouman, D.G.L., Goula Bi, T.A., Srohorou, B. & Savane, I. (2014). Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique à diverses échelles de temps en climat de type soudanais : cas de l'extrême nord-ouest de la Cote d'Ivoire. *Larhyss Journal*, 18 : 107-124.

Sylla, M.B., Gaye, A.T. & Jenkins, G.S. (2012). On the fine-scale topography regulating changes in atmospheric hydrological cycle and extreme rainfall over West Africa in a regional climate model projections. *International Journal of Geophysics*, 1-15:  
<https://doi.org/10.1155/2012/981649>

Trotochaud, J., Flanagan, D.C. & Engel, B.A. (2016). A simple technique for obtaining future climate data inputs for natural resource models. *Applied Engineering in Agriculture*, 32(3): 371-381.

Vissin, W.E. (2007). *Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger*. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, France, 310p.

Wang, G. (2004). A conceptual Modeling Study on Biosphere Atmosphere Interactions and Its Implications for Physically Based Climate Modeling. *Journal of Climate*, 17(13) : 2572-2583.

Yang, S. & Cui, X. (2019). Building Regional Sustainable Development Scenarios with the SSP Framework. *Sustainability* 2019, 11, 5712; doi:10.3390/su11205712