

VARIABILITE ET PREVISION DES EXTREMES CLIMATIQUES DANS LE BASSIN DE LA LOBO (CENTRE- OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE) : APPORT DES CHAINES DE MARKOV ET DU GENERATEUR DE TEMPS MULGETS

N'GUESSAN Bi Vami Hermann^{1,2}, ADJAKPA Tchépko Théodore³,
ALLECHY Fabrice Blanchard¹, YOUAN TA Marc^{1,2}, ASSA Yapi Fabrice^{1,2},
AFFIAN Kouadio^{1,2}

¹Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement, UFR STRM,
Université Felix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire.

²Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT),
Université Felix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire.

³Centre Interfacultaire de Formation et de Recherche en Environnement pour le Développement
Durable (CIFRED), Université d'Abomey Calavi, Bénin

ABSTRACT : In recent decades, Côte d'Ivoire has been faced with a high level of climate variability, which has led to numerous natural disasters. The objective of this study is to analyse and predict climate extremes based on daily rainfall data from 1984 to 2013. The MulGETS weather generator based on Markov chains of order 1 and the index calculation method were respectively used to predict the precipitation fields from 2021 to 2050 and calculate the PRCPTOT (total annual precipitation), R1mm (number of rainy days), R10mm (number of days of intense rainfall) and R20mm (number of days of very intense rainfall) indices. During the period 1984 to 2013, the northern half of the Lobo basin is characterized by PRCPTOT ranging from 503.7 mm to 2566.12 mm with R1mm not exceeding 265 days. R10mm can reach a maximum of 52 days with R20mm ranging from 1 day to 28 days. The extreme south of the basin gives rise to PRCPTOT not exceeding 2363.8 mm with R1mm ranging from 149 days to 301 days. R10mm extends over a period of 73 days with R20mm ranging from 1 day to 19 days. Over the period from 2021 to 2050, the northern half of the basin will be marked by PRCPTOT not exceeding 1916mm with R1mm up to 244 days. R10mm will vary from 16 days to 56 days with R20mm ranging from 5 days to 27 days. As for the extreme south of the basin, PRCPTOT will be between 1047.03 mm and 1720.03 mm with R1mm ranging from 194 days to 266 days. R10mm may extend over a maximum of 52 days with R20mm not exceeding 24 days. The Lobo basin is generally characterized by a decrease in all these indices over the two study periods.

KEYWORDS - Climatic extremes, Chain Markov, MulGETS, Lobo

Date of Submission: 13-06-2020

Date of Acceptance: 29-06-2020

1. INTRODUCTION

Les changements climatiques constituent l'un des plus grands défis auxquels l'humanité doit faire face au cours du XXI^e siècle. Ils constituent aujourd'hui une menace potentiellement majeure pour l'environnement et le développement durable [1]. L'Afrique de l'ouest, l'une des régions du monde les plus vulnérables à la variabilité climatique subira les plus extrêmes événements climatiques. La Côte d'Ivoire à l'instar des autres pays, n'est pas exemptée car elle est soumise aux variations climatiques depuis ces dernières décennies [2] ; [3]. Les travaux de [4] , [2] , [5] ont montré un déficit de pluviométrie en Côte d'Ivoire en général et particulièrement dans le bassin versant de la Lobo depuis 1970. La production agricole et l'économie locale sont tributaires des aléas climatiques car le secteur agricole du pays est généralement du type pluvial. Tout changement dans la fréquence ou la gravité des événements météorologiques et climatiques extrêmes ont des répercussions importantes dans son secteur agricole. Ils provoquent la fréquence des décalages saisonniers (confusion sur le calendrier cultural), ce qui a pour corolaire une baisse régulière et effective de près de la moitié des productions ou rendements de l'agriculture pluviale, industrielles et vivrières [6]. Les conséquences des extrêmes climatiques sur les économies des pays africains sont indéniables, en ce sens qu'ils sont les plus vulnérables [7]. Selon [8], les événements climatiques extrêmes devraient devenir plus fréquents avec le réchauffement climatique. L'étude et la compréhension des changements dans les précipitations extrêmes est d'une grande importance en raison de leur grand impact sur la société et les écosystèmes par rapport aux changements des précipitations moyennes [9].

De ce fait, une analyse sur les tendances des extrêmes pluviométriques est devenue nécessaire. La présente étude propose donc une analyse et une prévision des extrêmes climatiques à travers le calcul des indices pluviométriques en vue de mettre en évidence leur variabilité et évolution spatio-temporelle. Il s'agira de manière spécifique d'analyser l'évolution des caractéristiques pluviométriques à savoir la quantité, la fréquence et la répartition spatiale, à travers des indices pluviométriques. La présente recherche s'est articulée autour de quatre sections. La première section a présenté la zone d'étude. La seconde section a décrit le générateur de temps MulGETS qui a permis la prévision des données de pluies journalières de 2021 à 2050 et le modèle markovien de premier ordre à deux états. Les résultats et la discussion ont été exposés dans la troisième section suivie de la conclusion dans la quatrième section.

II. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La rivière Lobo est l'un des principaux affluents située sur la rive gauche du fleuve Sassandra. Elle prend sa source à 400 m d'altitude au sud de Séguéla et se jette dans le Sassandra non loin de la localité de Loboville. Avec une superficie de 12722 km² et s'étend sur une longueur de 355 km. Elle est située au centre-ouest de la Côte d'Ivoire entre 6°05' et 6°55' de longitude Ouest et entre 6°02' et 7°55' de latitude Nord (Fig.1). Le bassin de la Lobo couvre les départements de Daloa, Issia, Zoukougbeu et Vavoua. Sa population est estimée à 1530303 habitants [10], soit une densité de 120 habitants/km². La majeure partie du bassin appartient à la région du Haut Sassandra avec pour chef-lieu de région Daloa. Le bassin versant de la Lobo est soumis à deux types de climats selon le régime des précipitations [11] : le climat équatorial de transition atténué (climat baouléen) observé dans la moitié nord du bassin caractérisé par deux saisons (une saison sèche et une saison humide) et le climat équatorial de transition (climat attiéen) marqué par quatre saisons (deux saisons sèches et deux saisons humides), s'observe dans l'extrême sud. Deux grands types de relief se partagent le bassin : les plaines d'altitude variant de 160 à 240 m, localisées au sud du bassin et les plateaux d'altitudes 240 m et 320 m occupant la majeure partie du bassin [11]. Le bassin versant de la Lobo est localisé dans le domaine guinéen et appartient au secteur mésophile avec des zones forestières propices à l'agriculture. Il est essentiellement constitué de sols de type ferrallitique fortement ou moyennement désaturés remaniés modaux avec recouvrement issus de schistes et de granites. Les formations géologiques de ce bassin se regroupent en deux grandes entités que sont les roches magmatiques de types plutoniques et volcaniques et les roches métamorphiques de types migmatites et schisteux.

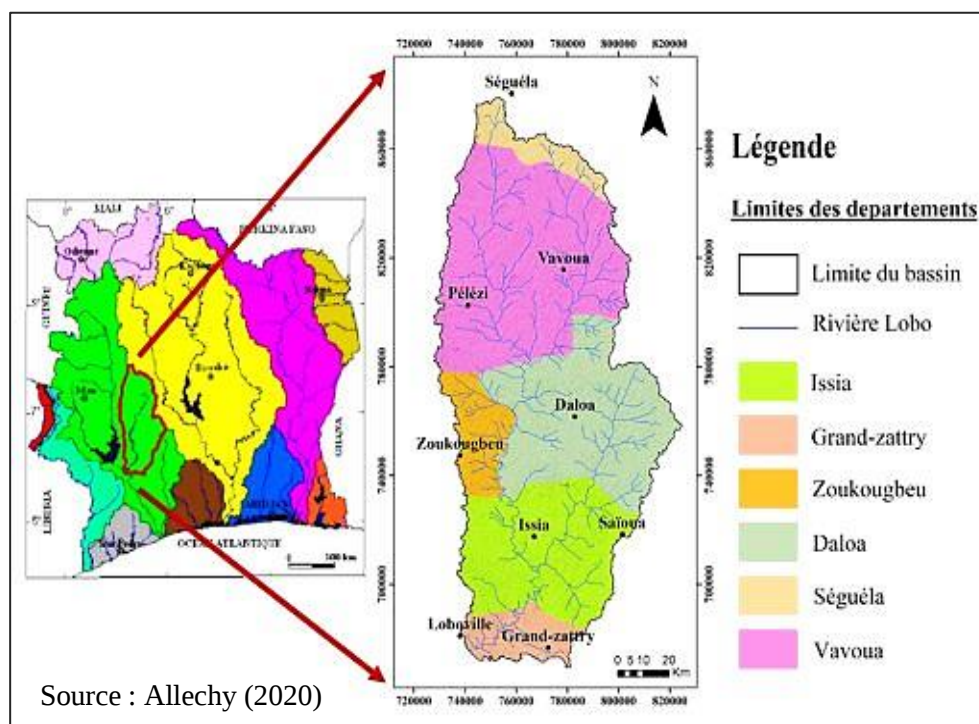


Fig.1 : Localisation du bassin versant de la Lobo

III. MATERIEL ET METHODES

3.1. Matériel

3.1.1. Données

Dans le cadre de cette étude, les données de précipitations journalières de dix-sept stations météorologiques couvrant la zone d'étude sur la période de 1984 à 2013 provenant du centre de réanalyse du système de prévision climatique (CFSR) ont été exploitées. Elles sont disponibles sur le site : <https://globalweather.tamu.edu/#pubs> et ont servi de référence pour la prévision des données de pluies journalières de 2021 à 2050.

3.1.2. Logiciels

Les logiciels utilisés sont de plusieurs types :

- ✓ XLSTAT 2016 a servi au rangement et au traitement statistique des données pluviométriques ;
- ✓ Matlab 2014 a permis de faire pour la prévision des données journalières de précipitation et à la modélisation markovienne ;
- ✓ ClimPACT 2 master implémenté sous l'environnement R 3.4.4 a permis de calculer les indices climatiques ;
- ✓ ArcGIS 10.5 a permis de réaliser les cartes de répartition spatiale des différents indices.

3.2. Méthodes

3.2.1. Générateur de temps MulGETS

Multi-site weather Generator of École de Technologie Supérieure (MulGETS) a été mis au point par [12]. C'est un générateur de temps stochastique permettant de générer des données climatiques statistiquement similaires à des données observées sur plusieurs sites. MulGETS est une extension d'un générateur météorologique à site unique WeaGETS (Weather Generator of École de Technologie Supérieure) qui convient aux petits bassins versants où une seule station peut être utilisée pour représenter l'ensemble du bassin versant [12]. Il utilise un modèle autorégressif linéaire de premier ordre pour générer la température et une distribution multi-gamma (une combinaison de plusieurs distributions gamma) et une distribution multi-exponentielle pour générer les quantités de précipitations quotidiennes. Ce générateur du temps a été utilisé pour prédire les données de précipitations dans la présente étude. Les détails de ce générateur du temps sont connus dans les travaux de [13], [12], [14]. Le principe de ce générateur stochastique de temps est basé sur la méthode des chaînes de Markov d'ordre 1 à deux états.

3.2.2. Modèle de chaînes de Markov

Plusieurs travaux ont porté sur l'analyse des précipitations à partir des chaînes de Markov ([15] ; [16] ; [17] ; [18]) car elles décrivent bien les échos de précipitations. Cette démarche a pour avantage d'exprimer les probabilités conditionnelles de passage de l'état précédent (jour précédent) à l'état de la journée en cours [17]. Les chaînes de Markov tiennent compte aussi de la liaison entre les jours successifs et permettent de traiter les problèmes à information incertaine ou incomplète [19]. Ce modèle sera du premier ordre si la pluie de l'année k ne dépend que de l'année précédente, c'est-à-dire du passé le plus proche de l'état. Il sera d'ordre h si la pluie de l'année k dépend des $k-1$, $k-2$, ..., $k-h$ années passées. La chaîne de Markov d'ordre 1 est introduite par une probabilité (1) :

$$P(X_{n+1} = j | X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0) = P(X_{n+1} = j | X_n = i)$$

$$\text{Avec : } P(X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0) = 0$$

Et on note (2) :

$$P_{ij} = P(X_{n+1} = j | X_n = i)$$

où P_{ij} est le i ème élément de la j ème colonne de la matrice de transition de la chaîne de Markov.

Ainsi l'état de l'année k ne dépend que de l'état de l'année $k-1$ pour le processus de Markov d'ordre 1.

3.2.3. Méthode des indices climatiques

L'approche méthodologique adoptée dans cette étude pour analyser les événements pluvieux extrêmes est basée sur la méthode des indices climatiques ([20] ; [21] ; [22] ; [23] ; [18] ; [24]) proposée par l'équipe d'experts sur la détection et les indices des changements climatiques [25] de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). L'avantage d'utiliser les indices pour la détection du changement climatique est qu'ils permettent une comparaison facile des tendances entre diverses régions appartenant à des zones climatiques différentes. Ils sont facilement compréhensibles et maniables pour des études d'impacts climatiques sur le plan socio-économique [26]. La communauté des climatologues a défini de nombreux indices climatiques dont certains d'entre eux ont été repris et adaptés à différentes séries de données à l'aide de programme de calcul sous forme de logiciel. Le calcul des indices climatiques se déroule en de trois étapes :

- ✓ Test d'homogénéité des données

L'homogénéité des données est vérifiée à l'aide d'un programme informatique RHtest développé par le Service Météorologique du Canada [27] et implémenté sous l'environnement du logiciel de Statistique et de programmation R. Cette procédure est basée sur un modèle de double régression [28].

✓ Contrôle de la qualité (QC) des données utilisées

Le procédé de contrôle de qualité aide à identifier les erreurs d'enregistrement qui peuvent exister sur des données journalières. Les principes sont les suivants :

- les données manquantes ou négatives de précipitations et températures sont remplacées par la valeur - 99,9 avant le contrôle de qualité par le logiciel ;
- il n'est pas possible d'avoir plus de 365 à 366 observations journalières par année ;
- le mois de février ne doit pas avoir plus de 28 observations quelle que soit l'année considérée ;
- la détection des valeurs aberrantes se fait à partir d'un seuil fixé à une valeur égale à la moyenne des hauteurs de pluies sur toute la période d'étude augmentée ou diminuée de 4 fois l'écart-type [29] (3) :

$$P(ab) = P(moy) \pm 4 \times STD$$

avec : $P(ab)$: Valeur de précipitation aberrante, $P(moy)$: Valeur de précipitation donnée et STD : Ecart-type ;

- le pourcentage des données manquantes est également vérifié lors de cette étape car il doit être inférieur à 25 %, condition nécessaire pour que le programme informatique calcul des indices.

✓ Calcul des indices climatiques.

Le groupe d'experts sur la détection des changements climatiques et les indices (ETCCDI : Expert Team on Climate Change Detection and Indices) a défini plusieurs indices pour caractériser les précipitations et les températures extrêmes. Cependant quatre indices de précipitations feront l'objet de cette étude à savoir : PRCPTOT (Cumul annuel des hauteurs de pluies), R1mm (nombre de jours pluvieux), R10mm (nombre de jours de pluies intenses) et R20mm (nombre de jours de pluies très intenses). La méthodologie utilisée a permis d'obtenir les résultats ci-après.

IV. RESULTATS

4.1. Evolution interannuelle des indices pluviométriques de 1984 à 2013

4.1.1. Dans la moitié nord du bassin de la Lobo

Cumul annuel des hauteurs de pluies (PRCPTOT)

De 1984 à 1993, le cumul annuel des hauteurs de pluies a varié de 1227,56 mm à 2566,12 mm avec une moyenne de 1766,23 mm. De 1994 à 2003, ce cumul a été compris entre 440,31 mm et 1879,84 mm avec une persistance de 1235,32 mm. De 2004 à 2013, il s'est étendu jusqu'à 2772,29 mm avec une persistance de 1208,35 mm. La tendance générale du cumul annuel des hauteurs de pluies sur les 30 années a été à la baisse de 26,467 mm/an soit 794,01 mm..

Nombre de jours pluvieux (R1mm)

De 1984 à 2013, le nombre de jours pluvieux n'a pas excédé pas 269 jours avec une moyenne de 210 jours. De 1984 à 1993, ce nombre a été compris entre 85 jours à 250 jours avec une moyenne de 169 jours. De 2004 à 2013, le nombre de jours pluvieux s'est étendu sur une durée de maximum 255 jours avec une persistance de 170 jours. La moitié nord du bassin versant de la Lobo a connu une baisse des jours pluvieux de 1,97 j/an soit 59 jours.

Nombre de jours de pluies intenses (R10mm)

De 1984 à 1993, le nombre de jours intense a oscillé entre 27 jours à 73 jours avec une moyenne de 49 jours. De 1994 à 200, ce nombre a été compris entre 5 jours à 54 jours avec une persistance de 29 jours. De 2004 à 2013, il a varié de 10 jours à 57 jours avec une persistance de 33 jours. Sur toute la période d'étude, la tendance générale a été à la baisse de 0,69 j/an soit 21 jours.

Nombre de jours de pluies très intenses (R20mm)

De 1984 à 1993, la moitié nord du bassin de la Lobo a été marquée par une variation de 8 jours à 28 jours de pluies très intenses avec une moyenne de 15 jours. De 1994 à 2003, le nombre de jours de pluies très intenses a été entre 1 jour et 21 jours avec une moyenne de 9 jours. Ce nombre a varié de 1 jour à 25 jours avec une moyenne de 8 jours durant la période de 2004 à 2013. La tendance générale montre que le bassin de la Lobo a connu une baisse de 9 jours en 30 ans.

4.1.2. Dans l'extrême sud du bassin de la Lobo

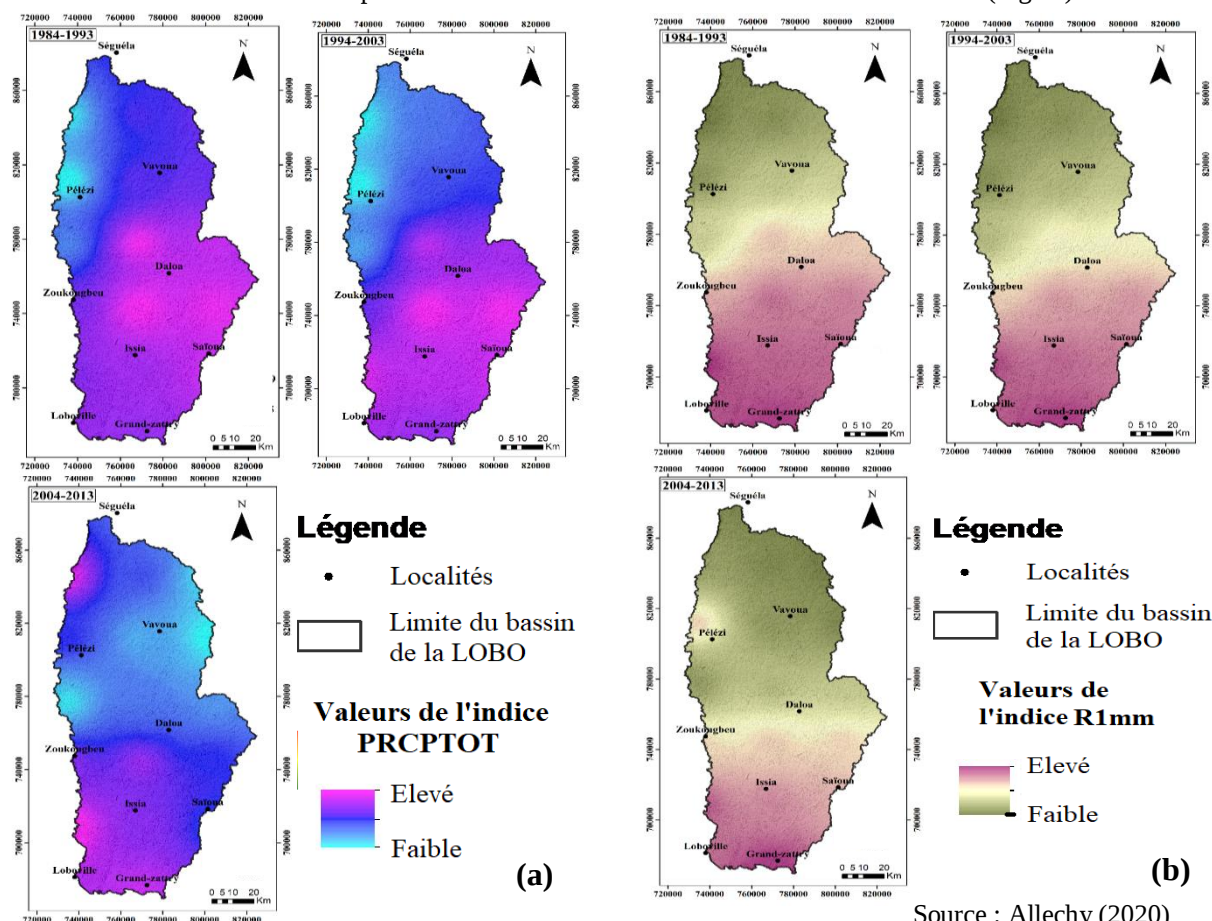
Cumul annuel des hauteurs de pluies (PRCPTOT)

Le cumul annuel des hauteurs de pluies dans l'extrême sud du bassin de la Lobo a oscillé entre 1082,25 mm et 2363,82 mm avec une persistance de 1826,27 mm de 1984 à 1993. Ce cumul a été compris entre 719,58 mm et

1940,15 mm avec une moyenne de 1360,24 mm de 1994 à 2003. De 2004 à 2013, il est entre 987,72 mm et 2442,53 mm avec persistance de 1394,25 mm. La tendance générale du cumul annuel des hauteurs de pluies a été à la baisse de 20,52 mm/an soit 615,6 mm. Au cours des décennies 1984 à 1993 et 1994 à 2003, les valeurs élevées du cumul annuel des hauteurs de pluies se sont localisées au centre et au sud. De 2004 à 2013, ces valeurs se sont essentiellement situées au sud, sud-ouest et au nord-ouest du bassin de la Lobo (Fig.2a).

Nombre de jours pluvieux (R1mm)

De 1984 à 1993, le nombre de jours pluvieux a été compris entre 209 jours et 301 jours avec une moyenne de 248 jours. De 1994 à 2003, ce nombre a oscillé entre 149 jours et 272 jours avec une persistance de 216 jours. De 2004 à 2013, il s'est étendu sur une durée maximum de 269 jours avec une moyenne de 215 jours. Sur toute la période d'étude, la tendance générale a été à la baisse de 1,61 j/an soit 48 jours. Le nombre de jours pluvieux a donc baissé dans l'extrême sud du bassin de 48 jours. Les séquences humides les plus importantes se sont localisées au sud et les moins importantes au nord du bassin de la Lobo sur les 3 décennies (Fig.2b).



Source : Allechy (2020)

Fig.2 : Evolution spatio-temporelle du cumul annuel de précipitations (a) et du nombre de jours pluvieux (b) dans le bassin de la Lobo de 1984 à 2013

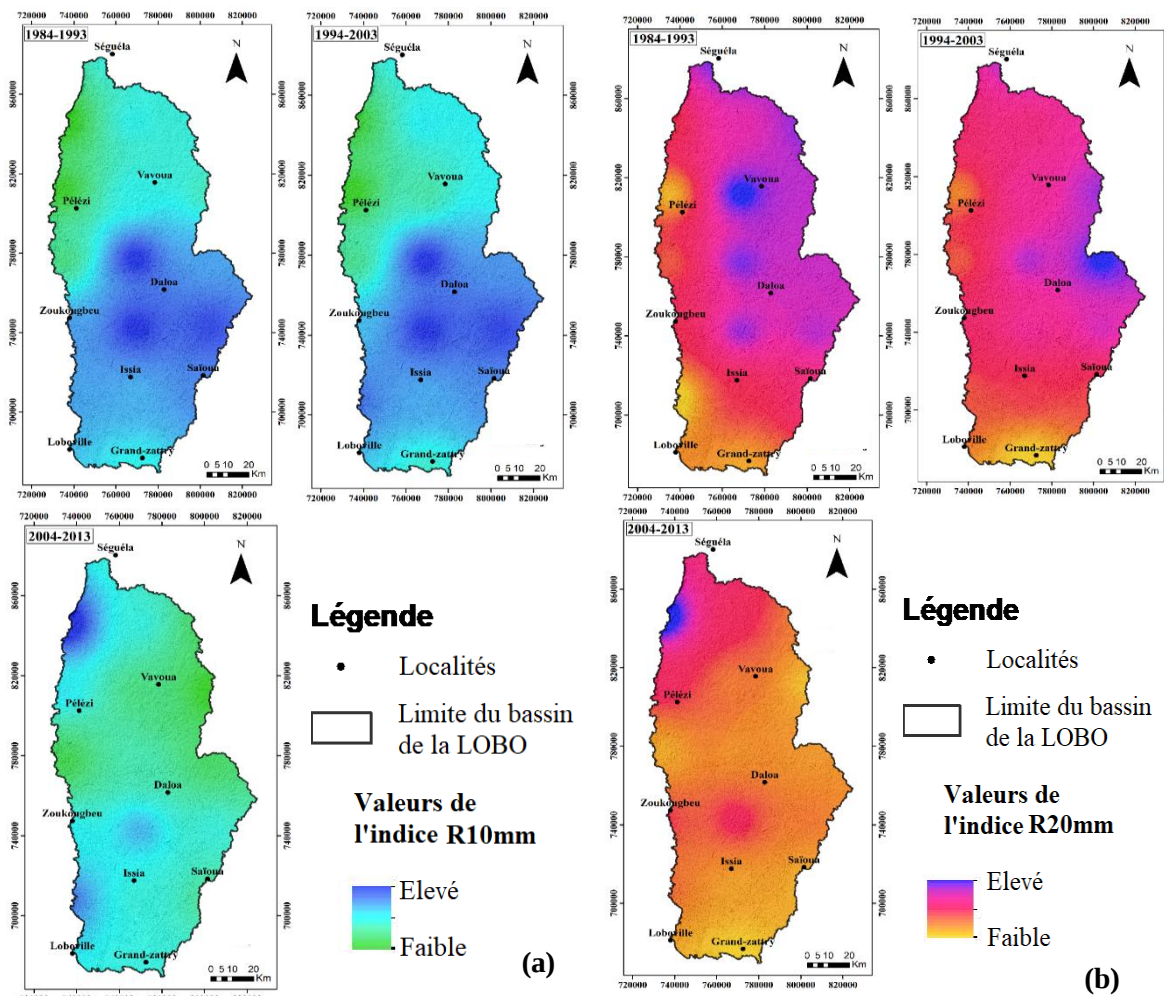
Nombre de jours de pluies intenses (R10mm)

Sur la période de 1984 à 1993, le nombre de jours de pluies intenses se situe entre 21 jours et 67 jours avec une persistance de 49 jours. Il peut atteindre au maximum 54 jours avec une moyenne de 30 jours durant la période de 1994 à 2003. Ce nombre n'excède pas 73 jours avec une persistance de 35 jours au cours de la période de 2004 à 2013. De façon générale, le nombre de jours de pluies intenses a diminué de 0,64j/an soit 19 jours sur l'extrême sud du bassin de la Lobo. Les longues séquences sont localisées dans la moitié sud sur les deux décennies de 1984 à 1993 et 1994 à 2003. Ces séquences sont concentrées au nord-ouest et au sud-ouest pendant la dernière décennie de 2004 à 2013 (Fig.3a).

Nombre de jours de pluies très intenses (R20mm)

De 1984 à 1993, cet indice se situe entre 3 jours et 19 jours avec une persistance de 13 jours. De 1994 à 2003, il est compris entre 1 jour et 13 jours avec une moyenne de 7 jours. De 2004 à 2013, le nombre de jours très intenses est entre 1 jour et 14 jours avec une persistance de 7 jours. Sur toute la période d'étude, la tendance générale de l'indice R20mm est en régression. L'extrême sud du bassin est donc caractérisé par une baisse de 8

jours de pluies très intenses. Les longues séquences de jours de pluies très intenses sont localisées au centre et à l'est de 1984 à 1993, à l'est de 1994 à 2003 et au nord-ouest de 2004 à 2013 (Fig.3b).



Source : Allechy (2020)

Fig.3 : Evolution spatio-temporelle du nombre de jours de pluies intenses (a) et du nombre de jours de pluies très intenses (b) dans le bassin de la Lobo de 1984 à 2013

4.2. Evolution interannuelle des indices pluviométriques de 2021 à 2050

4.2.1. Dans la moitié nord du bassin de la Lobo

Cumul annuel des hauteurs de pluies (PRCPTOT)

De 2021 à 2030, ce cumul variera de 982,9 mm à 1871,5 mm avec une persistance de 1406,54 mm. De 2031 à 2040, il sera compris entre 862,3 mm et 1916 mm avec une moyenne de 1285,5 mm. De 2041 à 2050, le cumul annuel des hauteurs de pluies pourra atteindre 1881,4 mm avec persistance de 1370,98 mm. La tendance générale du cumul annuel des hauteurs de pluies sur les 30 années sera à la baisse de 1,78 mm/an soit 53,55 mm.

Nombre de jours pluvieux (R1mm)

Durant la période de 2021 à 2030, le nombre de jours pluvieux n'excèdera pas 239 jours avec une persistance de 188 jours. De 2021 à 2040, ce nombre sera compris entre 134 jours à 244 jours avec une moyenne pouvant atteindre 183 jours. De 2041 à 2050, le nombre de jours pluvieux s'étendra sur une durée de maximum 234 jours avec une persistance de 183 jours. Le nord du bassin de la Lobo connaîtra une baisse des jours pluvieux de 0,25 j/an soit environ 8 jours de 2021 à 2050.

Nombre de jours de pluies intenses (R10mm)

La période de 2021 à 2030 sera caractérisée par un nombre de jours intense pouvant atteindre 56 jours avec une persistance n'excédant pas 41 jours. La période de 2031 à 2040 donnera lieu à un nombre de jours intenses oscillant de 16 jours à 52 jours avec une moyenne de 37 jours. La période de 2041 à 2050 quant à elle sera marquée par un nombre de jours intenses variant de 29 jours à 53 jours avec une persistance de 38 jours. Sur toute la période d'étude, la tendance générale sera à la baisse de 0,69 j/an soit 21 jours.

Nombre de jours de pluies très intenses (R20mm)

De 2021 à 2030, la moitié nord du bassin de la Lobo sera marquée par une variation allant de 8 jours à 27 jours de pluies très intenses avec une moyenne de 18 jours. De 2031 à 2040, le nombre de jours de pluies très intenses sera entre 5 jours et 25 jours avec une persistance n'excédant pas 15 jours. Il variera de 9 jours à 24 jours avec une moyenne pouvant atteindre 16 jours durant la période de 2041 à 2050. Le bassin de la Lobo connaîtra une baisse de 2 jours de pluies très intenses en 30 ans.

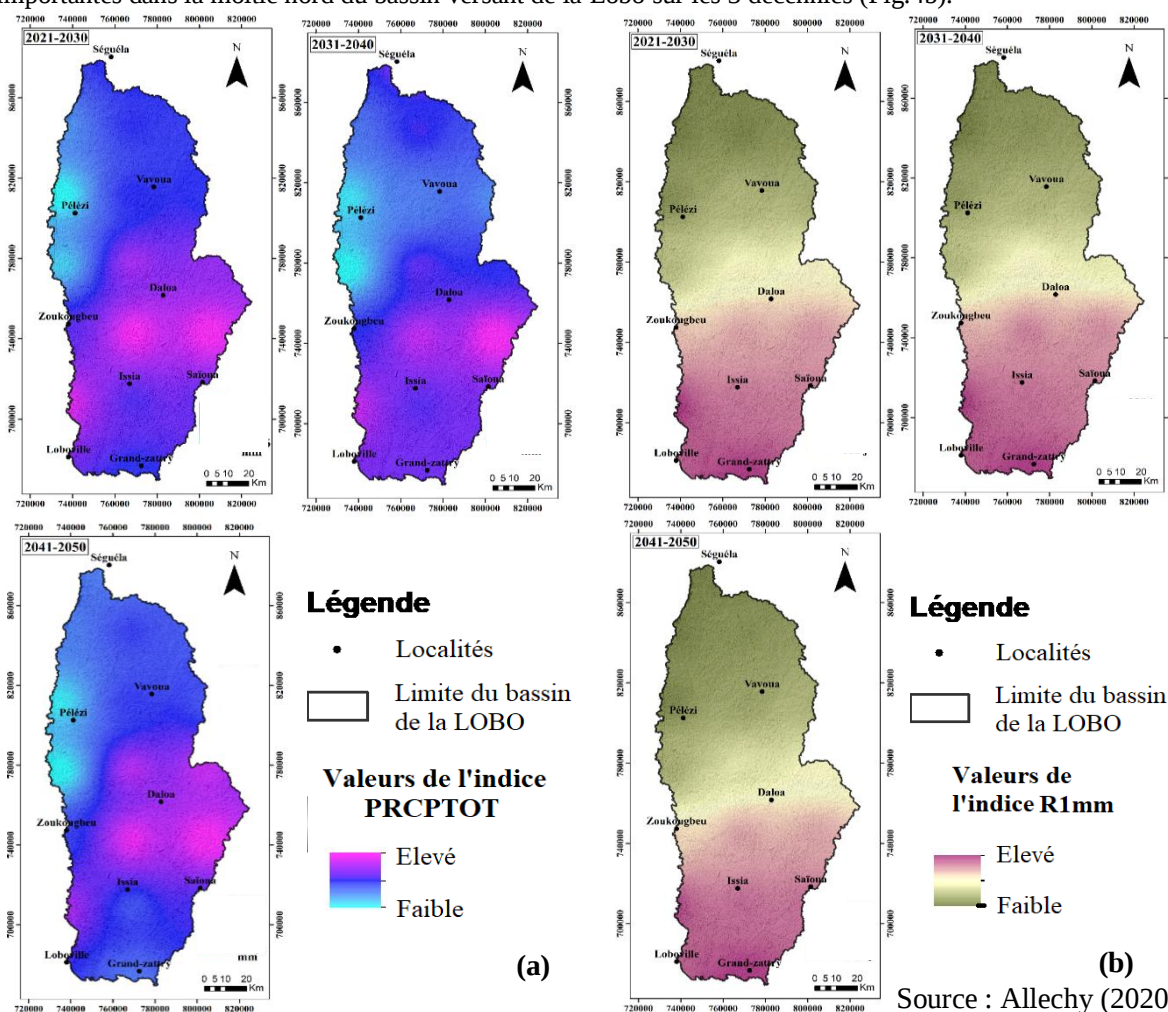
4.2.2. Dans l'extrême sud du bassin de la Lobo

Cumul annuel des hauteurs de pluies (PRCPTOT)

Le cumul annuel des hauteurs de pluies oscillera de 1125,75 mm à 1712,18 mm avec une persistance de 1414,49 mm pendant la décennie de 2021 à 2030. Ce cumul sera entre 1047,03 mm et 1705,55 mm avec une moyenne de 1343,17 mm pendant la période de 2031 à 2040. De 2041 à 2050, il se situera entre 1148,9 mm et 1720,03 mm avec une persistance de 1373,08 mm et 535,33 mm. La tendance générale du cumul annuel des hauteurs de pluies sera à la baisse de 4 j/an soit 120 jours. La distribution spatiale du cumul annuel des hauteurs de pluies montre qu'au cours des deux décennies 2021 à 2030 et 2031 à 2040, les plus forts cumuls annuels des hauteurs de pluies seront localisés au centre, à l'est et au sud-ouest du bassin. De 2041 à 2050, ils auront lieu essentiellement au centre et à l'est du bassin de la Lobo (Fig.4a).

Nombre de jours pluvieux (R1mm)

De 2021 à 2030, le nombre de jours pluvieux sera compris entre 232 jours et 266 jours avec une moyenne de 232 jours. De 2031 à 2040, ce nombre oscillera entre 198 jours et 257 jours avec une persistance de 228 jours. De 2041 à 2050, il s'étendra sur une durée maximum de 250 jours avec une persistance de 227 jours. Sur toute la période d'étude, le nombre de jours pluvieux baissera 0,34j/an soit de 10 jours. La distribution spatiale de cet indice montre que les séquences humides les plus importantes seront localisées dans la moitié sud et les moins importantes dans la moitié nord du bassin versant de la Lobo sur les 3 décennies (Fig.4b).



Source : Allechy (2020)

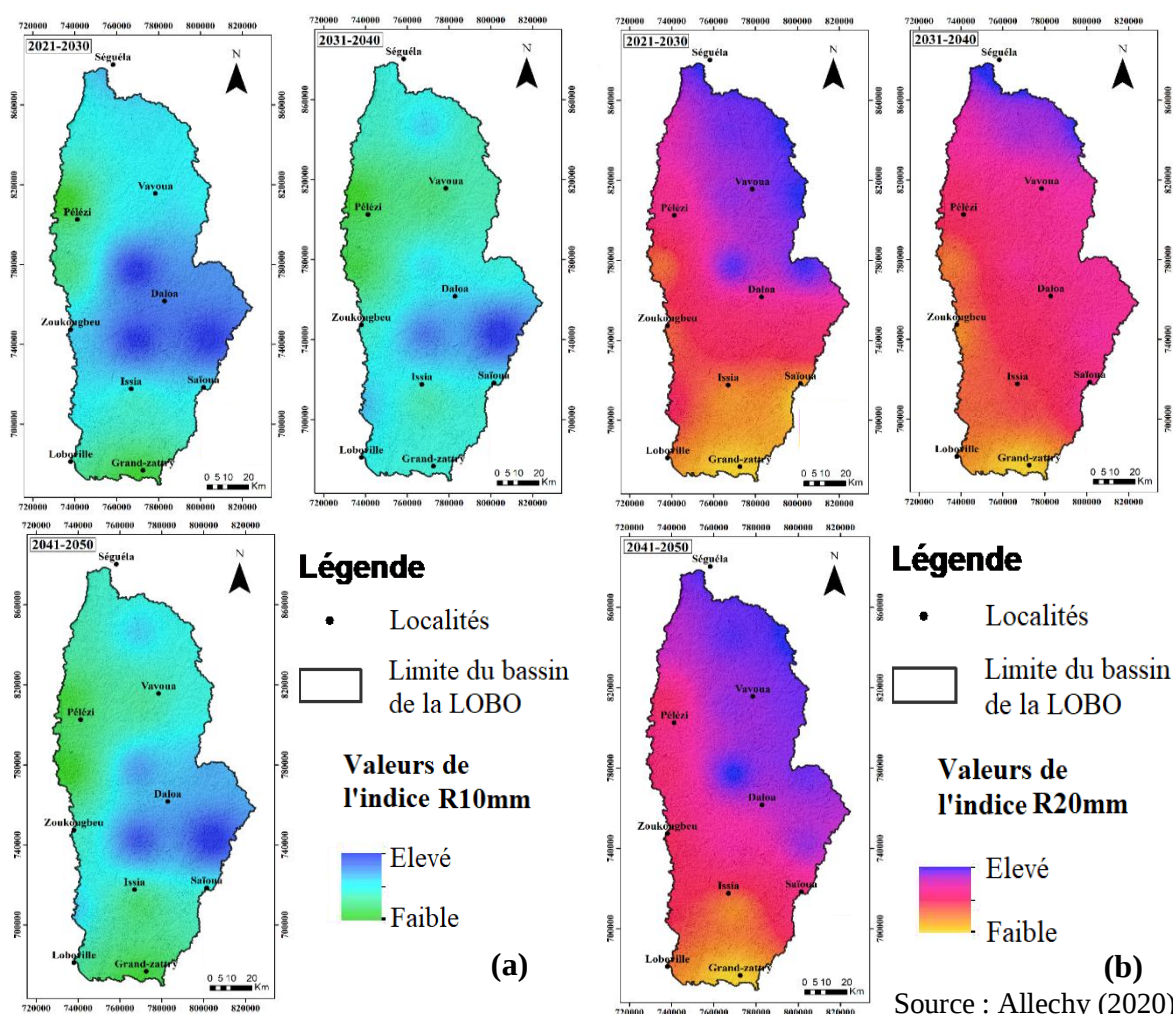
Fig.4 : Evolution spatio-temporelle du cumul annuel de précipitations (a) et du nombre de jours pluvieux (b) dans le bassin de la Lobo de 2021 à 2050

Nombre de jours de pluies intenses (R10mm)

Sur la période de 2021 à 2030, le nombre de jours de pluies intenses se situera entre 27 jours et 46 jours avec une persistance 38 jours. Il pourra atteindre au maximum 50 jours avec une moyenne de 36 jours durant la période de 2031 à 2040. Ce nombre n'excèdera pas 52 jours avec une persistance de 36 jours au cours de la période de 2041 à 2050. De façon générale, le nombre de jours de pluies intenses diminuera de 0,12j/an soit 4 jours. Les longues séquences seront localisées au centre de 2021 à 2030. Ces séquences se concentreront au nord, au centre et à l'est au cours des deux dernières décennies (Fig.5a).

Nombre de jours de pluies très intenses (R20mm)

De 2021 à 2030, cet indice se situera entre 8 jours et 24 jours avec une persistance de 15 jours. De 2031 à 2040, il sera compris entre 7 jours et 19 jours avec une moyenne de 13 jours. De 2041 à 2050, le nombre de jours de pluies très intenses sera entre 7 jours et 23 jours avec une persistance de 14 jours. Sur toute la période d'étude, la tendance générale de l'indice R20mm sera en régression. L'extrême sud du bassin sera donc caractérisé par une baisse de 2 jours de pluies très intenses. Les longues séquences des jours de pluies très intenses seront localisées au nord de 2021 à 2040, au centre et au nord-est de 2021 à 2030 et 2041 à 2050 (Fig.5b).



Source : Allechy (2020)

Fig.5 : Evolution spatio-temporelle du nombre de jours de pluies intenses (a) et du nombre de jours de pluies très intenses (b) dans le bassin de la Lobo de 2021 à 2050.

IV. DISCUSSION

Cette étude a consisté à analyser et à prévoir les extrêmes pluviométriques dans le bassin de la Lobo sur les périodes 1984 à 2013 et 2021 à 2050. Les données utilisées proviennent du centre de réanalyse du système de prévision climatique (CFSR). Les travaux de [30] ont montré que ces données sont aussi bonnes que les mesures d'une station et ont l'avantage de mieux traduire l'évènement pluvieux mesuré par les satellites. Aussi plusieurs études effectuées avec les données CFSR, ont indiqué leur validité ([31]; [32]; [33] ; [34]). Les séries de précipitations journalières issues de CFSR présentent aussi une bonne correspondance temporelle avec celles

observe [35]. L'approche méthodologique a été basée respectivement sur l'utilisation des indices de pluies journalières d'extrêmes proposés par les experts du ETCCDI et les modèles de Markov. Les indices ont l'avantage de décrire les caractéristiques particulières des extrêmes. Aussi, les chaînes de Markov, largement utilisées pour l'analyse des précipitations ([36]; [16]; [24]) décrivent bien les champs de précipitations journalières. Elles ont pour avantage de tenir compte de l'effet de mémoire. Les travaux de [37] [18] Stern *et al.*, 2006 et N'Guessan bi, 2014 ont abouti à la même conclusion. Le modèle de Markov d'ordre 1 de MulGETS a été sélectionné pour générer de manière adéquate les données journalières de précipitations. Ces résultats sont conformes aux travaux de [13], [12] et [14]. La présente étude a mise en évidence une diminution du cumul de précipitations annuelles, du nombre de jours pluvieux, du nombre de jours de pluies intenses et du nombre de jours de pluies très intense dans le bassin de la Lobo. Elle montre une tendance générale à la baisse pour la période de 1984 à 2013. Ces résultats sont similaires aux travaux de [38] dans le nord de la Malawi. Ces tendances soulignées dans ces travaux sont conformes aux travaux de [39]; [40] sur l'analyse des extrêmes climatiques respectivement dans le bassin versant de Ouémé au Bénin et à l'Est de la Bosnie Herzégovine. Aussi a-t-il été démontré que tous les indices de précipitations ont diminué au cours des dernières décennies à Djibouti dans le travaux réalisés par [41]. Par ailleurs, les indices calculés dans le futur sur la période de 2021 à 2050 présentent aussi une tendance à la baisse. Le bassin de la Lobo connaîtra donc une baisse de ces indices dans un futur proche. [42] ont abouti à la même conclusion dans leurs travaux réalisés au Bénin (Afrique de l'ouest). Ces résultats corroborent ceux de [43] qui, en utilisant le modèle climatique régional CCLM, ont prédit une réduction significative des précipitations à la fin du siècle en Afrique de l'Ouest. Ils sont également conformes au récent rapport spécial du [44] qui indique que l'Afrique de l'Ouest connaîtra probablement des sécheresses plus longues et plus intenses dans un avenir proche.

VI. CONCLUSION

Cette étude a permis d'apprécier la variabilité et la prévision des extrêmes pluviométriques sur le bassin de la Lobo à partir de 1984 à 2013 et de 2021 à 2050 en utilisant les indices climatiques. L'analyse de la tendance de ces indices montre une baisse généralisée du nombre de jours de pluies sur l'ensemble du bassin sur toutes les périodes d'étude. Cette baisse est plus importante dans la moitié nord du bassin de 1984 à 2013 et plus importante dans l'extrême sud du bassin de 2021 à 2050. Ainsi, cette étude pourrait permettre aux décideurs la mise en place des stratégies d'adaptation nécessaire pour une meilleure mobilization et gestion des ressources en eau face aux risques et des catastrophes naturelles.

VII. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Laboratoire Mixte Internationale (LMI) Nexus Eau-Climat-agriculture-Energie pour son appui financier apporté pour la réalisation de cette étude.

RÉFÉRENCES

- [1] Koumassi D. H., Tchiboza A. E., Vissin E. et Houssou C, Analyse fréquentielle des événements hydro-pluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin, *Afrique SCIENCE* 10(2), 2014, ISSN 1813-548X, pp. 137 – 148
- [2] Ardoïn B. S, *Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne*. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, 2004, 330p.
- [3] Kouakou K. E., Goula B. T. A. et Savané I, Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface en zone tropicale humide: Cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (Côte d'Ivoire - Burkina Faso). *European Journal of Scientific Research*, 16 (1), 2007, pp. 31-43.
- [4] Konan B, *Modélisation et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du Sassandra (Côte d'Ivoire)*. Thèse de doctorat 3ème cycle, Université d'Abobo-Adjamé, 2002, 146p.
- [5] Yao A. B., Goula B. T. A., Kouadio Z. A., Kouakou K. E., Kane A. et Sambou S, Analyse de la variabilité climatique et quantification des ressources en eau en zone tropicale humide. Cas du bassin versant de la Lobo au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, 19, 2012, pp. 136-157.
- [6] Nelson, G. C., M.W. Rosegrant, J. Koo, R. Robertson, T. Sulser, T. Zhu, C. Ringler, S. Msangi, A. Palazzo, M. Batka, M. Magalhaes, R. Valmonte-Santos, M. Ewing, and D. Lee. *Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation*. (Food Policy Report 21. Washington, D.C.: International Food Policy Research Institute, 2009, 30p)
- [7] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (Eds.), Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2007
- [8] Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J., Noguer M., Van Der Linden P. J., Dai X., Maskell K. et Johnson C. A, *Climate change 2001: The scientific basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, New York, Cambridge University Press, 2001.
- [9] Hartmann, D.L., Klein Tank, A.M.G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (sous la dir. de). *Climate change 2013: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013, pp. 159–254.
- [10] Recensement Général de la Population et de l'Habitat, *Rapport d'exécution et présentation des principaux résultats*, Institut national de la statistique, 2014, 49p
- [11] Yao A. B, *Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (centre-ouest de la Côte d'Ivoire)*, Thèse Unique de Doctorat, Université Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 2014, 186p.

- [12] Chen J, Brissette PF, Leconte R, Caron A, A versatile weather generator for daily precipitation and temperature. *Transactions of the ASABE*, 55(3), 2012, pp 895-906
- [13] Brissette FP, Khalili M, Leconte R, Efficient stochastic generation of multi-site synthetic precipitation data. *J. Hydrol.* 345, 2007, pp 121–133.
- [14] Chen J, Brissette FP, Zhang XJ, A multi-site stochastic weather generator for daily precipitation and temperature. *Transactions of the ASABE*, 57, 2014, pp 1375–1391.
- [15] Benzerti Z, Habaieb H.E, Etude de la persistance de la sécheresse en Tunisie par utilisation des chaînes de Markov (1909-1996). *Sécheresse*, 12, , 2001, 215-20.
- [16] Liana C, et Elena C, Evaluation of the transition probabilities for daily precipitation time series using a Markov chain model. *The 3rd International Colloquium Mathematics in Engineering and Numerical Physics*, Oct 7-9, Bucharest, Romania, 2004, p.82-89.
- [17] Meddi et Meddi, Etude de la persistance de la sécheresse au niveau de sept plaines algériennes par utilisation des chaînes de Markov (1930-2003), *Courrier du Savoir – N°09*, Mars 2009, pp 39-48.
- [18] N'Guessan Bi VH, *Modélisation markovienne du champ de précipitations et du mode d'occupation du sol pour une prévision du risque d'inondation à l'aide de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques (SIG) : cas du département de Sinfra (centre-ouest de la Côte d'Ivoire)*, Thèse Unique de Doctorat, Université Felix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire, 2014, 194p.
- [19] Dequier J, *Chaîne de Markov et application*, Mémoire de probatoire en informatique, Université de Grenoble, France, 2005, 35p.
- [20] Zhang X, And Yang F, RCLimDex 1.0, User Manual. *Climate Research Branch Environment, Downsview, Ontario, Canada*, 2004, 23p.
- [21] New M, Hewiston B, David B, Tsiga SA, Kruger A, Manhinsue A, Gomez B, Coelho CAS, Masisi DN, Kalulanga E, Bulane E, Fortunata L, Mdoka ML et Lajoie R, Evidence of trends in daily climate extremes over southern and West Africa. *Journal of Geophysical Research*, 111, 2006, D14102, doi:10.1029/2005JD006289
- [22] Aguilar A, Aziz Barry A., Brunet M, Ekang L, Fernandes A, Massoukine M, Mbah J, Mhanda A, Do Nascimento DJ, Peterson TC, Thamba Umba, O, Tomou M, et Zhang X, Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry and Zimbabwe, 1955-2006. *Journal of geophysical research*, 114, 2009, DO2115, doi:10.1029/2008JD011010.
- [23] Hountondji YC, De Longueville F, Ozer P, Trends in extreme rainfall events in Benin (West Africa), 1960-2000. *Proceedings of the 1st International Conference on Energy, Environment and Climate Change*, 26-27 August 2011, Ho Chi Minh City, Vietnam. <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/96112> (April 19, 2016).
- [24] N'Guessan Bi VH, Diedhiou A, Kouadio BH, Kone AB, Koffi K, Affian K. Apport de la télédétection à l'analyse spatio-temporelle du mode d'alternance et d'occurrences des épisodes humides: apport des indices climatiques et chaînes de Markov; cas du district d'Abidjan. *Actes du 1er colloque international Nexus Eau Energie Alimentation et Habitat du 12 au 14 décembre*, Ouagadougou, Burkina Faso. 2018, pp 69-80
- [25] ETCCDI, Climate Change Indices, Definitions of the 27 Core Indices ,2009,. Retrieved from http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml
- [26] Christensen JH, Carter TR et Giorgi F, Prudence employs new methods to assess European climate change, *E.O.S.* 83, 2002, 147p.
- [27] Zhang X, Aguilar E, Sensoy S, Melkonyan H, Tagiyeva U, Ahmed N, Kutaladze N, himzadeh F, Taghipour A, Hantosh TH, Albert P, Semawi M, Karam Ali M, Said Al-Shabibi M.-H., Al-Oulan Z, Zatar T, Khelet I.-A, Hamoud S, Sagir R, Demircan M, Eken M, Adiguzel M, Iexander L, Peterson TC, Wallis T, Trends in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003. *Journal of Geophysical Research*, 110, 2005, D22104, DOI: 10.1029/2005JD006181
- [28] Wang XL, Comments on "Detection of undocumented change points: A revision of the twophase regression model. *J. Climate*, 16, 2003, pp 3383-3385.
- [29] Sensoy S, N Türkoğlu , Akçakaya A, Ekici M, Demircan M, Ulupinar Y, Atay H, Tüvan A, Demirbaş H, Trends in turkey climate indices from 1960 to 2010, *proceeding of the 6th Atmospheric Science Symposium - ATMOS 2013* Haziran, İstanbul, 2013, pp 3 – 5
- [30] Fuka DR, CA MacAllister, AT Degaetano, and ZM Easton, Using the Climate Forecast System Reanalysis dataset to improve weather input data for watershed models. *Hydrol. Proc*, 2013, DOI: 10.1002/hyp.10073.
- [31] Najafi MR., H Moradkhani, and TC Piechota, Ensemble Streamflow Prediction: Climate Signal Weighting Methods vs. Climate Forecast System Reanalysis. *Journal of Hydrology*, 2011, pp 442-443
- [32] Dile YT, R Srinivasan, Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 2014, pp 1-16
- [33] Anoh KA, *Apport d'un SIG et du modèle agro-hydrologique SWAT dans la gestion durable des ressources en eaux du bassin versant du lac de Taabo (Centre de la Côte d'Ivoire)*. Thèse de Doctorat de l'Université Félix Houphouët Boigny de Cocody (Abidjan-Côte d'Ivoire), 2014, 218 p.
- [34] Froidurot S, et Diedhiou A, Characteristics of wet and dry spells in the West African monsoon system. *Atmospheric Science Letters*, 18, Groisman et Knight, 2008, pp 125-131.
- [35] Khedhaouiria D, *Post-traitement stochastique des précipitations journalières issues de réanalyses: application à la réanalyse CFSR au Canada*. Thèse en sciences de l'eau, Université de Québec, 2018, 212p
- [36] Chèze I, Jourdain S, Calcul des quantiles de durées de retour de la température par la méthode gev. In Calcul des températures à risque, *Météo France, DP/SERV/BEC*, Toulouse, France, 2003, pp. 1-50
- [37] Stern R, Rijks D, Dale I, Et Knock J, *Instat Climatic Guide*, 2006, 330p.
- [38] Cosmo N, Tallaksen LM et Yu Xu C, Growing season length and rainfall extremes analysis in Malawi. Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions, *Proceedings of FRIEND-Water 2014*, Montpellier, France, October 2014 (IAHS Publ. 363, 2014), pp 361-366
- [39] Attogouinon A, Agnidé EL, Y. N'Tcha M'Po and R Houngue, Extreme Precipitation Indices Trend Assessment over the Upper Oueme River Valley-(Benin), *Hydrology* 4, 36; 2017, Doi:10.3390/hydrology4030036
- [40] Popov T, Gnjata S, Trbić G, Ivanišević M., Analysis of extreme precipitation indices in the East Herzegovina (Bosnia and Herzegovina), *Original scientific paper*, 69(1), <https://doi.org/10.2298/IJGI1901001P>, J. Geogr. Inst. Cvijic. 2019, pp. 1–16
- [41] Ozer P, Mahamoud A, Recent Extreme Precipitation and Temperature Changes in Djibouti City (1966– 2011). *J. Climatol.*, 2013, Doi:10.1155/2013/928501
- [42] N'Tcha M'Po Y, EA Lawin 2, BK Yao 1, GT Oyerinde, A Attogouinon 4 and AA Afouda, Decreasing Past and Mid-Century Rainfall Indices over the Ouémé River Basin, Benin (West Africa). *Climate*, 5, 74; 2017, doi:10.3390/cli5030074
- [43] Dosio A et Panitz HJ, Climate change projections for CORDEX Africa with COSMO-CLM regional climate model and differences with the driving global climate models. *Clim. Dyn.* 46, 2016, pp 1599–1625

- [44] Intergovernmental Panel on Climate Change, Summary for Policymakers. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability; Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA. 2014.

N'GUESSAN Bi Vami Hermann, et. al. "Variabilite Et Prevision Des Extremes Climatiques Dans Le Bassin De La Lobo (Centre-Ouest De La Côte D'ivoire) : Apport Des Chaines De Markov Et Du Generateur De Temps Mulgets." *International Journal of Engineering Science Invention (IJESI)*, Vol. 09(06), 2020, PP 44-54. Journal DOI- 10.35629/6734