



ESJ Natural/Life/Medical Sciences

Yapi Assa Fabrice,

Universitaire de Recherche et d'Application en
Télétection, Université FHB, Côte d'Ivoire

N'guessan Bi Vami Hermann,

Maître Assistant au Centre Universitaire de
Recherche et d'Application en Télétection,
Université FHB, Côte d'Ivoire

Oga Yeï Marie Solange,

UFR Sciences de la Terre et des Ressources
Minières Université Félix Houphouët Boigny
Abidjan Cocody, Côte d'Ivoire

Kpan Oulaï Jean Gautier,

Département de Géosciences, Université Peleforo
Gon Coulibaly, Côte d'Ivoire

Allechy Fabrice Blanchard,

UFR Sciences de la Terre et des Ressources
Minières Université Félix Houphouët Boigny
Abidjan Cocody, Côte d'Ivoire

Biemi Jean,

UFR- Science de la Terre et des Ressources
Minières, Côte d'Ivoire

Submitted: 25 August 2020

Accepted: 02 December 2020

Published: 31 December 2020

Corresponding author:

Yapi Assa Fabrice

DOI: [10.19044/esj.2020.v16n36p70](https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n36p70)



Copyright 2020 Assa Fabrice A,
Distributed under Creative Commons
BY-NC-ND 4.0 OPEN ACCES

Cite as:

Assa Fabrice Y, Marie Solange O, Bi Vami
Hermann N, Jean Gautier K, Blanchard A, Jean B.
(2020). Modélisation Des Extrêmes Climatiques De
La Région De La Marahoué À Partir D'un
Générateur Stochastique De Temps Mono-Site
(Weagets). *European Scientific Journal, ESJ*, 16
(36), 1. <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n36p70>

Modélisation Des Extrêmes Climatiques De La Région De La Marahoué À Partir D'un Générateur Stochastique De Temps Mono-Site (Weagets)

Résumé

L'objectif de ce travail est d'analyser et de modéliser les tendances pluviométriques extrêmes à l'horizon 2050 à partir des données pluviométriques journalières de 1980 à 2013. Ces données ont été analysées à l'aide du programme ClimPACT 2 master qui a servi de calcul des indices climatiques. Le modèle WEAGETS a été utilisé pour modéliser ces données hydroclimatiques à l'horizon 2050 à partir de la méthode des chaînes de Markov d'ordre 3. Les résultats montrent que la moyenne des cumuls de pluies moyennes mensuels observés est de 103,97 mm et celle estimée est de 100,71 mm soit un déficit de 3,26 mm par rapport à celle observée au cours de la chronique d'étude. La précipitation totale maximale d'un jour pluvieux (Rx1day) observé et généré présente une allure décroissante dans la région avec des coefficients respectifs de -0,37 et -0,25. Au cours des périodes 2014 à 2024, les localités de Zuénoula et de Sinfra seront dominées par des séquences sèches qui seront également observées durant les périodes de 2038 à 2050 dans le Sud et le Centre de la zone d'étude. Les jours consécutivement secs (CDD) vont augmenter dans toute la Marahoué, tandis que les jours consécutivement humides (CWD) vont y baisser progressivement. Ces résultats serviront à la mise en place des stratégies d'adaptation des populations face à ce fléau.

Subject: Hydroclimatologie

Mots-clés: Extrême Climatique,
Modélisation, Weagets, Marahoué.

Modelling Of Climatic Extremes Of Marahoué Region Using A Mono-Site Stochastic Generator Of Time (Weagets)

***Yapi Assa Fabrice,
N'guessan Bi Vami Hermann,***

Maître Assistant au Centre Universitaire de Recherche et d'Application en
Téléédétection, Université FHB, Côte d'Ivoire

Oga Yeï Marie Solange,

UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières Université Félix
Houphouët Boigny Abidjan Cocody, Côte d'Ivoire

Kpan Oulaï Jean Gautier,

Département de Géosciences, Université Peleforo Gon Coulibaly, Côte
d'Ivoire

Allechy Fabrice Blanchard,

UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières Université Félix
Houphouët Boigny Abidjan Cocody, Côte d'Ivoire

Biemi Jean,

UFR- Science de la Terre et des Ressources Minières, Côte d'Ivoire

DOI: [10.19044/esj.2020.v16n36p70](https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n36p70)

Abstract

The objective of this work is to analyze and model extreme rainfall trends up to 2050 based on daily rainfall data from 1980 to 2013. These data were analysed using the ClimPACT 2 master program which was used to calculate the climate indices. The WEAGETS model was used to model these hydroclimatic data by 2050 using the Markov Chain 3 method. The results show that the average monthly average rainfall accumulation observed is 103.97 mm and the estimated average rainfall is 100.71 mm, representing a deficit of 3.26 mm compared to that observed during the study chronicle. The maximum total precipitation of a rainy day (Rx1day) observed and generated shows a decreasing rate in the region with respective coefficients of -0.37 and -0.25. During the periods 2014 to 2024, the localities of Zuénoula and Sinfra will be dominated by dry sequences which will also be observed during the periods 2038 to 2050 in the southern and central parts of the study area. Consecutively dry days (CDD) will increase throughout Marahoué, while consecutively wet days (CWD) will gradually decrease there. These results

will be used to put in place strategies to help populations adapt to this scourge.

Keywords: Extreme Climate, Modelling, Weagets, Marahoué

Introduction

Les aléas d'origine hydroclimatique sont les phénomènes naturels les plus fréquents et les plus dévastateurs dont l'amplitude spatiale a permis d'affecter n'importe quel pays du monde au cours de la période 1995-2015 (Bouba et al., 2017). En dépit du contexte climatique caractérisé par une baisse de la pluviométrie annuelle, de nombreux pays de l'Afrique de l'Ouest (Ghana, Niger, Sénégal, Burkina Faso, Côte d'Ivoire, etc) sont confrontés à de graves problèmes d'inondations provoquées souvent par des pluies extrêmes soudaines (Hubert et al., 1989). Des tendances très faibles de pluies entraînant la sécheresse ont également été enregistrées dans ces pays et plus précisément en Côte d'Ivoire (Savane et al., 2001 ; Doumouya et al., 2009) provoquant des dommages sur la production agricole et aussi sur le plan socio-économique dans son ensemble. Balliet et al., 2016 ont montré que la région du Gôh a connu une baisse de la pluviométrie avec une augmentation des séquences sèches pendant les saisons pluvieuses, en utilisant le programme RClimDex. Des études menées sur les différents bassins (Comoé, Bandama et Sassandra) ont montré également une baisse des ressources en eau, tant en surface que souterraine (Savané et al., 2001; Goula et al., 2006; Kouakou et al., 2007; Goula et al., 2009). De même de nombreux travaux (Olivry et al., 1993 ; Bricquet et al., 1997) ont montré qu'au-delà d'une réponse annuelle immédiate de l'écoulement des cours d'eau à une saison des pluies déficitaire, une certaine durabilité du déficit hydrologique devait être imputée à l'effet cumulé des longues périodes de sécheresse. À partir des années 80 jusqu'en 2000, la Côte d'Ivoire a connu une longue période de déficit pluviométrique d'environ 3% par rapport à la normale 1971-2000, avec des périodes de forte sécheresse notamment en 1983 et 1998 avec des baisses respectives de 15% et 11% par rapport à la même normale (N'go et al., 2017). Ceci a causé de sérieux problèmes de manque d'eau à certaines périodes de l'année entraînant une baisse des crues, une sévérité des étiages et une précocité des tarissements des cours d'eau dans diverses régions du pays notamment dans la région de la Marahoué (Irié et al., 2014). Cette baisse des précipitations a globalement entraîné l'amenuisement des ressources en eau (Hubert et al., 2007, Abrate et al., 2013), la modification des écosystèmes naturels et des systèmes socio-économiques (Liéno 2007).

Étant donné que certains scénarii des changements planétaires indiquent que l'occurrence et l'impact des sécheresses risquent d'augmenter dans les années à venir (Watson et al., 1997 ; GIEC, 2013), il est indispensable

de pouvoir analyser les tendances de pluies extrêmes passées et futures de la zone d'étude.

L'objectif de ce travail est d'analyser et de modéliser les tendances pluviométriques extrêmes à l'horizon 2050 afin de fournir aux autorités territoriales et aux populations des outils nécessaires à la mise en place des stratégies d'adaptation à ce fléau.

Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est située au centre-ouest de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 5°15' et 6°30' Ouest et les latitudes 6°00' et 8°00' Nord (figure 1). Le Climat de type Baouléen est caractérisé par deux grandes saisons alternées par deux petites : une grande saison sèche (de décembre à février), une grande saison pluvieuse (de mars à juin), une petite saison sèche (de juillet à août) et une petite saison pluvieuse (de septembre à novembre) (Irié et *al.*, 2015). La région est drainée par le fleuve Bandama rouge qui fait office de frontière naturelle sur le côté Est, et la Marahoué qui traverse la majeure partie de la zone d'étude.

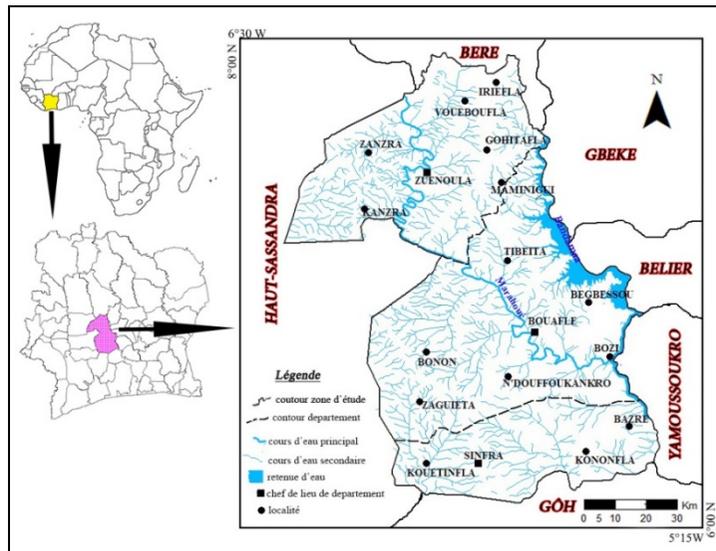


Figure 1 : Localisation géographique de la zone d'étude

Matériel et Méthodes

Matériel

Données

Les données utilisées sont essentiellement composées de séries chronologiques de hauteurs de pluies journalières et de températures sur la période 1980-2013 soit 34 ans au niveau des stations météorologiques de Zuénoula, de Bouaflé et de Sinfra, Tableau I. Ces données proviennent du

centre de réanalyse du système de prévision climatique (*CFSR*) et ont été utilisées et validées par un bon nombre d'auteurs dont Koua et *al.* (2013) dans la région de Buyo, Anoh (2014) dans le bassin versant du lac Taabo (Centre de la Côte d'Ivoire). Le choix de ces données repose sur leur large usage et leur disponibilité au pas de temps journalier. La modélisation des données est faite sur la période de 2014-2050 au niveau des stations retenues que sont la station de Zuénoula, de Bouaflé et de Sinfra.

Tableau I : Méta données des trois stations météorologiques de la Marahoué (1980 à 2013)

Station	Élévation	Latitude	Longitude	Maximum (mm)	Minimum (mm)	Moyenne (mm)	Écart-type
Zuénoula	228	-6,04	7,43	2508,25	484,90	1227,17	402,30
Bouaflé	262	-5,75	6,98	2557,41	635,64	1334,71	406,71
Sinfra	227	-5,91	6,62	2438,61	703,11	1413,14	379,93

Logiciels utilisés

Les logiciels utilisés sont de plusieurs types :

- XLSTAT 2016 a servi au rangement et au traitement statistique des données de pluie et de température ;
- le logiciel de statistique R, pour le calcul des indices climatiques ;
- les programmes informatiques *RH_test* pour le test d'homogénéité des données et
- *ClimPACT 2 Master* pour le calcul des indices climatiques au pas de temps journalier.

Ces programmes sont accessibles à partir du site web de Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices (ETCCDMI). *ClimPACT 2 Master* est un programme informatique dédié aux études climatiques, élaboré et recommandé par l'OMM (Organisation Mondiale de la Météorologie) qui fonctionne sous l'environnement du logiciel R (Alexander et Herold 2016, N'Guessan Bi et *al.*, 2018).

- WEAGETS pour la modélisation des données climatiques (Caron et *al.*, 2008, Chen et *al.*, 2012)

Méthodes

Calcul des indices climatiques

La méthodologie adoptée dans cette étude pour analyser les événements pluvieux extrêmes est celle des indices climatiques (Hountondji et *al.*, 2011 ; N'Guessan Bi et *al.*, 2018) proposée par l'équipe d'experts sur la détection des changements climatiques et les indices (ETCCDI) à partir du programme *ClimPACT 2 Master*. Ces experts ont défini vingt-sept (27) indices climatiques dont onze (11) pour caractériser la pluviométrie et seize (16) pour

les températures extrêmes (Xuelin et Yang, 2004). Ces indices décrivent les caractéristiques particulières des extrêmes pluviométriques, y compris la fréquence, l'amplitude et la persistance des événements pluvieux (Taïbi, 2016). Ces derniers peuvent être regroupés en quatre grandes catégories (Xuelin et Yang, 2004) :

- 1- indices basés sur les durées ;
- 2- indices d'intensités ;
- 3- indices basés sur les percentiles ;
- 4- indices de seuils ;

Les cinq indices pluviométriques considérés dans cette étude concernent trois indices d'intensité que sont : la hauteur de pluies totales annuelles (PRCPTOT), la précipitation totale maximale d'un jour pluvieux (Rx1day) et l'intensité de pluies journalières (SDII). Les deux autres indices sont celles basées sur la durée : les jours consécutivement secs (CDD) et les jours consécutivement humides (CWD), (Xuelin et Yang, 2004).

Le calcul des indices climatiques se déroule en de trois étapes :

- contrôle de la qualité (QC) des données utilisées ;
- test d'Homogénéité des données climatiques ;
- calcul les indices climatiques.

Avant le calcul des indices, la qualité des données est contrôlée et l'homogénéité des données testée.

○ ***Contrôle de la qualité (QC) des données***

La procédure de contrôle qualité des données devant servir au calcul des indices suit le principe suivant : Les valeurs négatives de précipitations sont remplacées par la valeur -9,99 qui correspond à l'indication d'une donnée marquante. Ensuite 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 4fois l'écart-type (Sensoy *et al.*, 2013) :

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

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.

○ ***Test d'Homogénéité des données climatiques***

L'homogénéité des données est vérifiée à l'aide d'un programme informatique *RHtest* développé par le Service Météorologique du Canada (Zhang *et al.*, 2005) et implémenté sous l'environnement du logiciel de statistique et de programmation R. Cette procédure est basée sur un modèle de double régression (Wang, 2003).

○ *Calcul les indices climatiques*

Après avoir contrôlé la qualité et testé l'homogénéité des données, l'étape suivante consiste au calcul des indices climatiques. La validation des valeurs des indices calculés suit les critères suivants : L'erreur d'estimation de la pente de la droite résultant de la régression linéaire doit être inférieure à la valeur estimée de la pente et la P-value résultant du test de significativité associé doit être inférieure à 0,05 ($P\text{-value} < 0,05$). Ainsi la tendance obtenue est statistiquement significative avec un seuil de confiance de 95% (Sensoy et *al.*, 2013).

Modélisation des données climatiques

La modélisation des données hydroclimatiques a été faite en utilisant le modèle WeaGETS à partir de la méthode des chaînes de Markov d'ordre 3 et sous l'environnement de Matlab. WeaGETS offre trois options pour générer l'occurrence des précipitations, deux options pour produire la quantité de précipitations et deux options pour simuler Tmax et Tmin. Il est également possible de lisser les paramètres de précipitation à l'aide d'harmoniques de Fourier selon l'approche de Richardson (1981) et de corriger la variabilité des précipitations et de la température à basse fréquence selon la méthode de correction spectrale de Chen et *al.*, (2010). Les données d'entrée de base comprennent un nom de fichier de données météorologiques observées, un nom de fichier pour stocker les données générées ultérieurement, une valeur seuil de précipitation de 1 mm pour un jour est considérée comme humide et le nombre d'années de données à générer également est aussi à préciser par l'utilisateur.

Exécution du programme

Il existe de nombreux sous-programmes dans le paquet WeaGETS, mais l'utilisateur doit seulement exécuter le programme principal RUN_WeaGETS.m. Toutes les options seront alors proposées sous forme de questions, présentées comme suit :

○ *Entrée de base*

Entrez un nom de fichier d'entrée (chaîne de caractères) : un nom pour les données observées doit être saisi entre guillemets simples, par exemple "nom de fichier" pour le fichier fourni ;

Entrez un nom de fichier de sortie (chaîne de caractères) : un nom pour les données générées doit être entré entre guillemets simples, par exemple "nom_de_fichier_généré" ;

Entrez un seuil de précipitations quotidiennes : le seuil de précipitation est la quantité de précipitation utilisée pour déterminer si un jour donné est pluvieux ou non (1 mm est la valeur utilisée dans cette étude) ;

Entrez le nombre d'années à générer : le nombre d'années de la série chronologique de précipitations et de températures générée est entré ici.

○ ***Modélisation des pluviométries et températures maximales et minimales journalières***

Lisser les paramètres d'occurrence et de quantité des précipitations (1) ou ne pas les lisser (0) ;

Si l'option 1 est sélectionnée, entrez le nombre d'harmoniques à utiliser (entre 1 et 4) ;

Sélectionnez un ordre de la chaîne de Markov pour générer l'occurrence des précipitations, 1 : Premier ordre ; 2 : Deuxième ordre ; 3 : Troisième ordre ;

Sélectionnez une distribution pour générer la quantité de précipitations des jours humides : 1 : Exponentielle, 2 : Gamma, 3 : Normale biaisée ou 4 : Exponentielle mixte ;

Sélectionnez un schéma pour générer Tmax et Tmin : 1 : inconditionnel ou 2 : conditionnel.

○ ***Correction de la variabilité à basse fréquence***

Corriger la variabilité basse fréquence des précipitations, Tmax et Tmin (1) ou ne pas corriger (0).

Si l'option 1 est sélectionnée, un nom de fichier contenant les données corrigées devra être saisi. Une fois la génération des données météorologiques terminée, la première année des données générées avec la correction de la variabilité à basse fréquence sera tracée.

Validation du modèle

La validation du modèle WeaGETS est appuyée dans cette étude par le test de Fisher et le coefficient de détermination. Cette application a consisté à faire des simulations à l'aide du modèle obtenu sur une période dont les données de précipitations existent et ensuite de faire une comparaison entre les données réelles et les données estimées par le modèle markovien.

Résultats

Validation du modèle WeaGETS pour la modélisation

Le test de Fisher en validation des données de précipitations générées de 2014-2050 par le modèle de Markov d'ordre 3, donne 88% à la station de Zuénoula et de Bouaflé, et 98% à la station de Sinfra. Les résultats du test de Fisher ont permis de mettre en évidence la performance du modèle de Markov d'ordre 3 à générer des données hydroclimatiques. Par ailleurs, les résultats des coefficients de détermination (R^2) entre les données observées et les données simulées des précipitations sont présentés à la figure 2. Les

corrélations (R) sont respectivement de 0,98 à Zuénoula et à Sinfra, et de 0,96 à Bouaflé. Ces corrélations ont montré la performance du modèle.

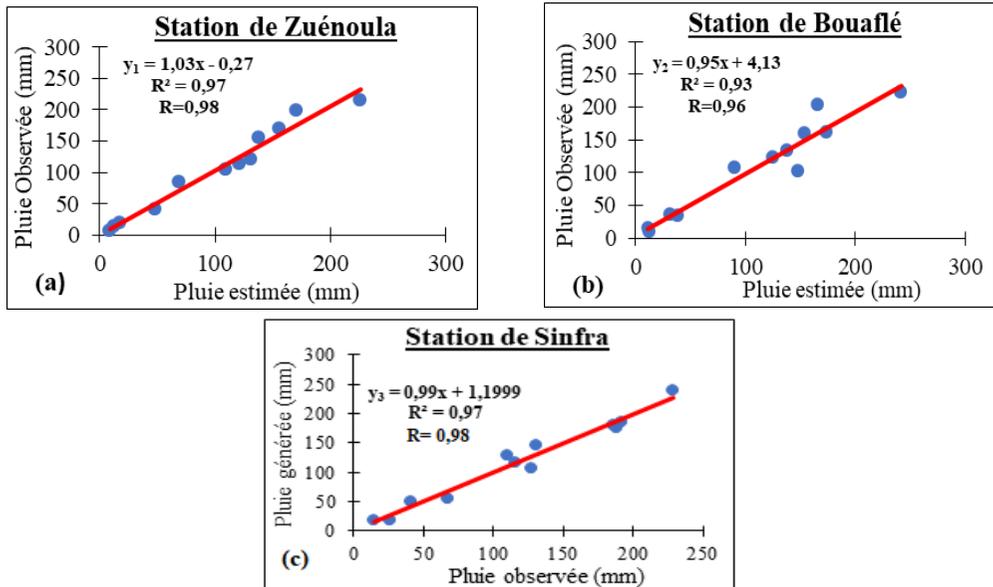


Figure 2 : Coefficient de détermination entre précipitation observée (1980-2013) et générée (2014-2050)

Prévision des hauteurs de pluie journalière dans la région de la Marahoué

La figure 3 et le tableau I illustrent les prévisions des hauteurs de pluie à l'échelle journalières dans la région de la Marahoué sur la période de 2014-2050.

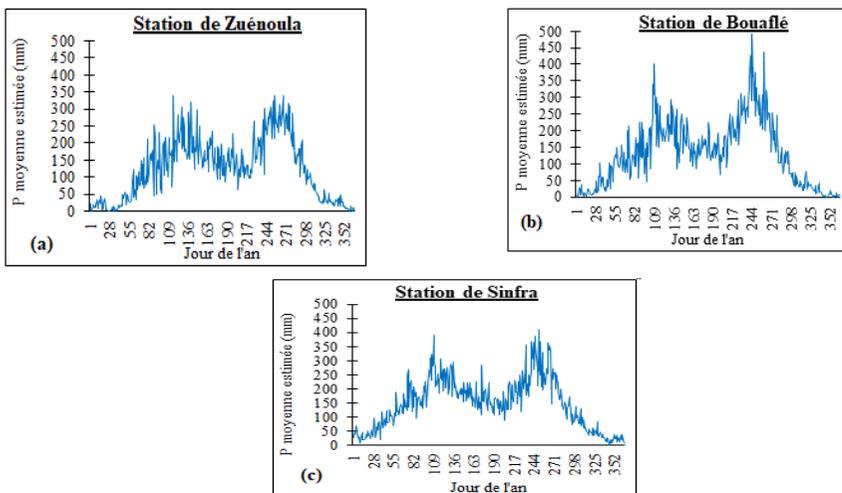


Figure 3 : Prévision des hauteurs de pluies moyennes journalières (2014-2050)

Les variabilités des hauteurs de pluies moyennes journalières observée et celles générées sont énumérées dans le tableau II. L'évolution qui représente la différence entre pluie estimée et pluie observé permet de mettre en évidence la baisse de pluie entre ces deux périodes.

Tableau II : Variabilité des hauteurs de pluies moyennes journalières dans la région

	Stations		
	Zuénoula	Bouaflé	Sinfra
Pluies observées [1980-2013]	118,27	127,83	135,57
Pluies simulées [2014-2050]	114,28	126,15	131,40
Évolution	-3,99	-1,68	-4,17

D'après le tableau II, à la station de Zuénoula, la hauteur moyenne de pluie journalière de la période 1980-2013 est de 118,27 mm, celle de la période générée 2014- 2050 est de 114,28 mm soit un déficit de 3,99 mm. Dans le département de Bouaflé, la pluie moyenne journalière observée est de 127,83 mm et celle générée est de 126,15 mm, soit une baisse de 1,68 mm par rapport à celle enregistrée durant la période d'étude. À Sinfra, par contre la pluviométrie moyenne journalière générée (131,40 mm) enregistrera une baisse de 4,17 mm par rapport à celle enregistrée au cours de la période 1980-2013 (135,57 mm).

Prévision des hauteurs de pluie mensuelle dans la région

Les prévisions du cumul de la pluviométrie à l'échelle mensuelle de la région de la Marahoué sont illustrées sur la figure 4.

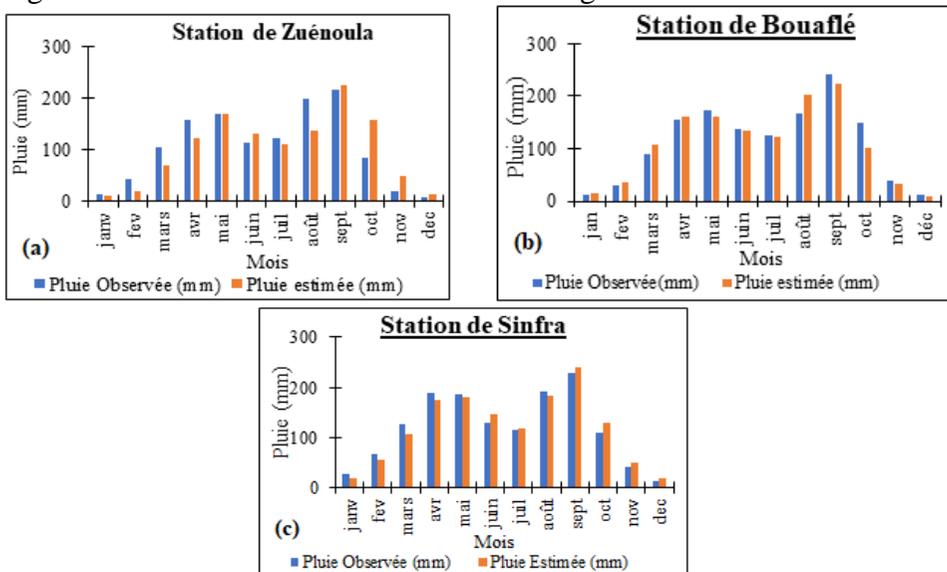


Figure 4 : Évolution des pluies mensuelles moyennes observées (1980-2013) et estimées (2014- 2050)

Le tableau III met en évidence la variabilité des hauteurs de pluies moyennes mensuelles observées et celles simulées de la zone d'étude.

Tableau III : Variabilité des hauteurs de pluies moyennes mensuelles dans la région

	Stations		
	Zuénoula	Bouaflé	Sinfra
Pluies observées [1980-2013]	117,97	127,65	135,54
Pluies simulées [2014-2050]	113,72	121,13	130,33
Évolution	-4,25	-6,52	-5,21

D'après le tableau III, dans la localité de Zuénoula, la moyenne des pluies mensuelles observées est de 117,97 mm et celle estimée est de 113,72 mm soit un déficit de 4,25 mm par rapport à celle observée au cours de la chronique d'étude. Dans le département de Bouaflé, la moyenne des pluies mensuelles observées est de 127,65 mm et celles estimées est de 121,13 mm soit une baisse de 6,52 mm par rapport à celle observée. Dans la localité de Sinfra, les moyennes de pluies mensuelles observées et celles estimées n'ont presque pas varié avec respectivement 135,54 mm et 130,33 mm soit un déficit de 5,21 mm.

Prévision des cumuls annuels de pluie

L'évolution des prévisions des pluies annuelles dans la région est montrée sur la figure 5. La pluviométrie totale moyenne annuelle de toute la chronique observée et celle générée à la station de Zuénoula sont respectivement de 1237,75 mm et 1211,26 mm, soit un déficit de 26,49 mm (figure 5 a₁ et a₂). À la station de Bouaflé, la moyenne de la pluie totale annuelle est de 1336,00 mm et celle générée 1311,25 mm, soit un déficit de 24,75 mm (figure 5 b₁ et b₂). Dans le Sud de la zone d'étude, une légère hausse de 11,93 mm de pluie générée (1424,23 mm) a été enregistrée par rapport à celle observée qui est de 1412,30 mm. La courbe de tendance présente une allure légèrement à la hausse de la pluie totale annuelle avec un coefficient de 1,62 mm par an dans la localité de Zuénoula ; par contre une allure décroissante est enregistrée dans les départements de Bouaflé et de Sinfra avec respectivement -0,97 mm et -1,61 mm chaque année.

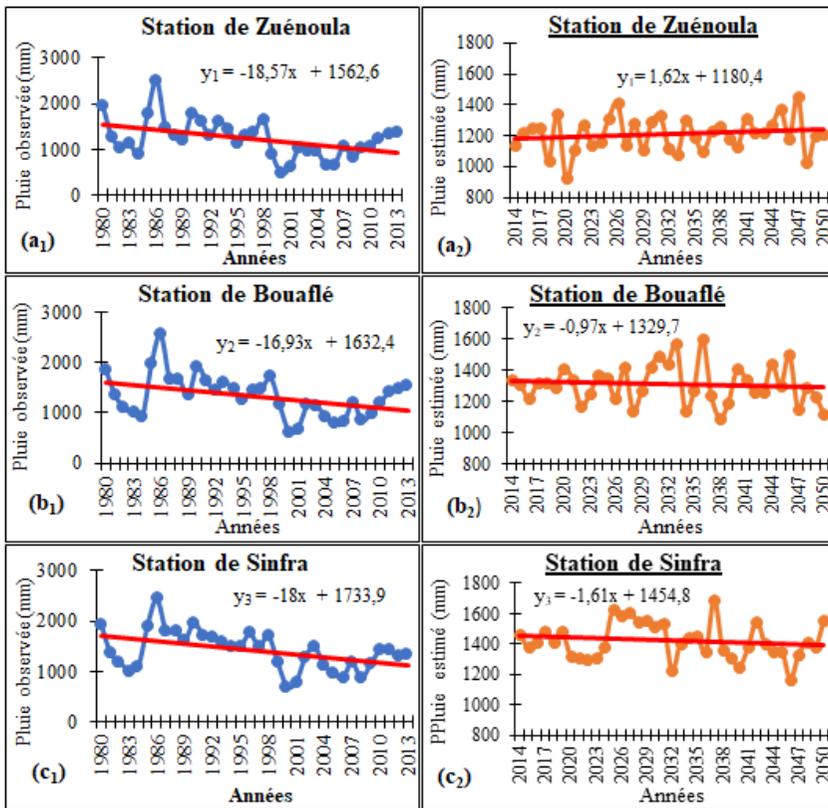


Figure 5 : Évolution des hauteurs de pluie totale observée (1980-2013) et générée (2014-2050)

Prévision de l'indice Rx1day à l'horizon 2050 dans la région

Les prévisions de la précipitation totale maximale d'un jour pluvieux sont illustrées sur la figure 6. Le modèle prévoit une légère augmentation de la précipitation totale maximale d'un jour dans les départements de Zuénoula et de Sinfra avec respectivement de 0,16 mm/jour et de 0,10 mm/jour. À Zuénoula, le pic des précipitations totales maximales sera observé en 2026 avec une hauteur de 102,58 mm/jour, alors qu'à Sinfra deux pics majeurs seront enregistrés en 2025 (90,59 mm/jour) et en 2042 (101,32 mm/jour). Contrairement aux deux autres localités, le département de Bouaflé enregistrera une baisse progressive de la précipitation totale maximale journalière avec un coefficient de -0,31 mm/jour.

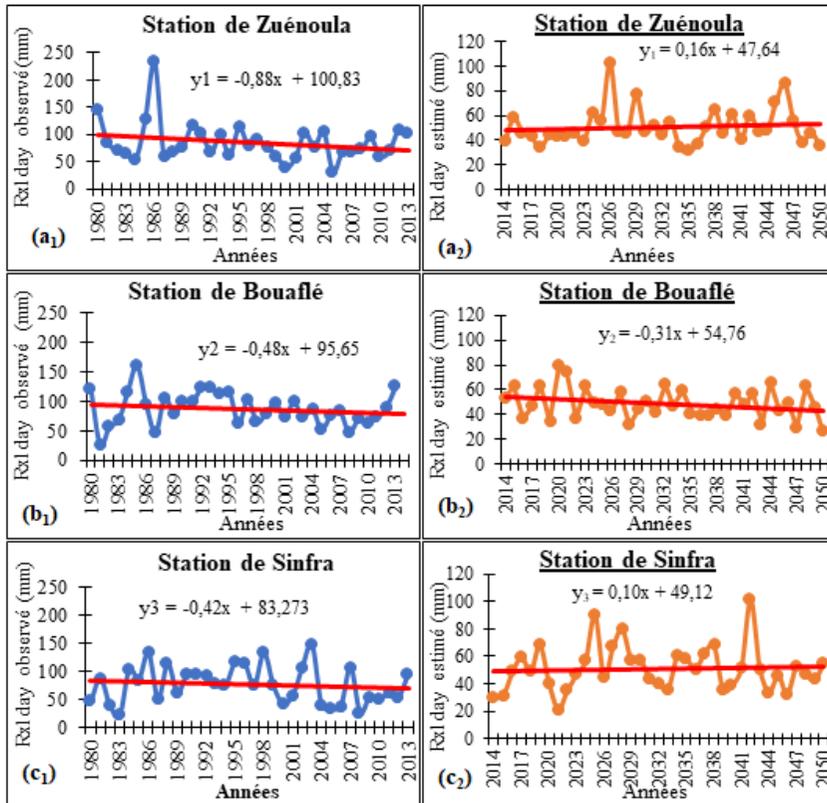


Figure 6 : Évolution de l'indice Rx1day observé (1980-2013) et généré (2014-2050)

Prévision de l'indice CDD à l'horizon 2050 dans la Marahoué

Les fluctuations des jours consécutivement secs sont illustrées sur la figure 7. Les valeurs moyennes de l'indice CDD dans le département de Zuénoula sont comprises entre 16 et 83 jours et présentent une allure croissante avec un coefficient de 0,31 jour chaque année. Dans le département de Bouaflé les jours consécutifs secs augmenteront avec un coefficient de 0,11 jour par an soit 1,10 jour chaque décennie, l'année 2042 observera des conditions de sécheresses extrêmes avec 86 jours consécutifs secs. Contrairement aux autres départements de la région de la Marahoué, Sinfra enregistrera une baisse progressive des jours consécutifs secs avec un coefficient de 0,13 jour par an, cependant au cours de certaines années des valeurs importantes (55 jours) du nombre de jours consécutif seront observées.

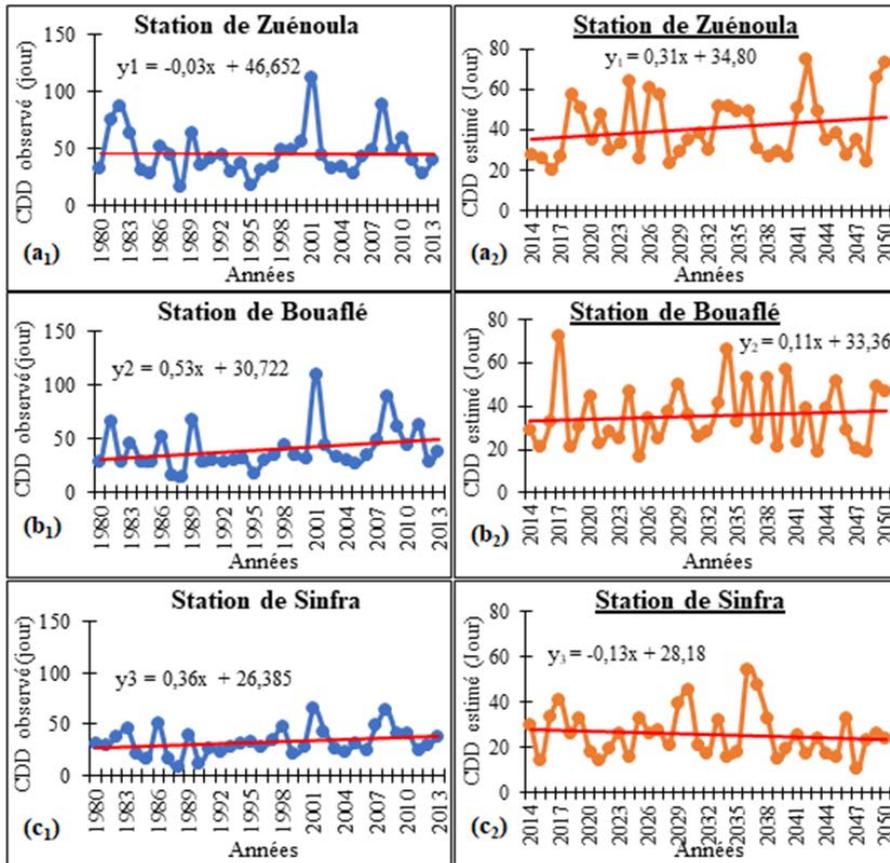


Figure 7 : Fluctuations de l'indice CDD Observé (1980-2013) et Généré (2014-2050)

Prévision de l'indice CWD à l'horizon 2050 dans la Marahoué

Les fluctuations annuelles du nombre de jours consécutivement humides sont présentées sur la figure 8. À Zuénoula, une baisse progressive des jours consécutivement humides sera enregistrée durant la chronique générée (2014-2050) avec un coefficient de -0,2 jour par an. Dans la localité de Bouaflé une légère progression à la hausse du nombre de jours consécutifs humides sera par contre observée avec un coefficient de 0,05 jour par an. Durant l'année 2035, Bouaflé observera 40 jours consécutivement humides. Dans le département de Sinfra, le nombre de jours consécutivement humide observera une légère baisse avec un coefficient de -0,051 et l'année 2041 sera la plus humide avec 42 jours consécutifs humides.

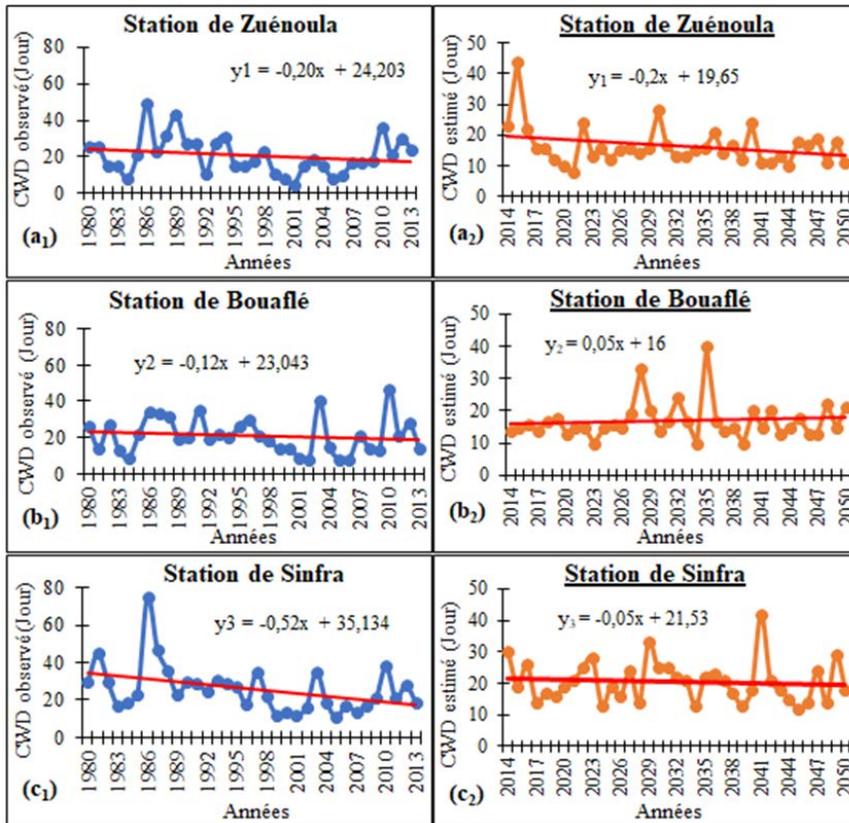


Figure 8 : Fluctuations de l'indice CWD observé (1980-2013) et généré (2014-2050)

Prévision de l'indice SDII à l'horizon 2050 dans la Marahoué

Les fluctuations futures de l'intensité journalière de précipitation (SDII) à l'horizon 2050 sont présentées sur la figure 9. Cette figure montre que les intensités journalières de précipitations varieront beaucoup d'une année à une autre dans la région de la Marahoué. À Zuénoula, une légère augmentation l'intensité journalière de précipitation avec un coefficient de 0,013 mm/jour sera enregistrée durant la période de (2014-2050). À Bouaflé et à Sinfra par contre, une légère baisse de l'intensité journalière de précipitation y sera observée avec respectivement un coefficient de -0,0083 mm/jour et -0,002 mm/jour.

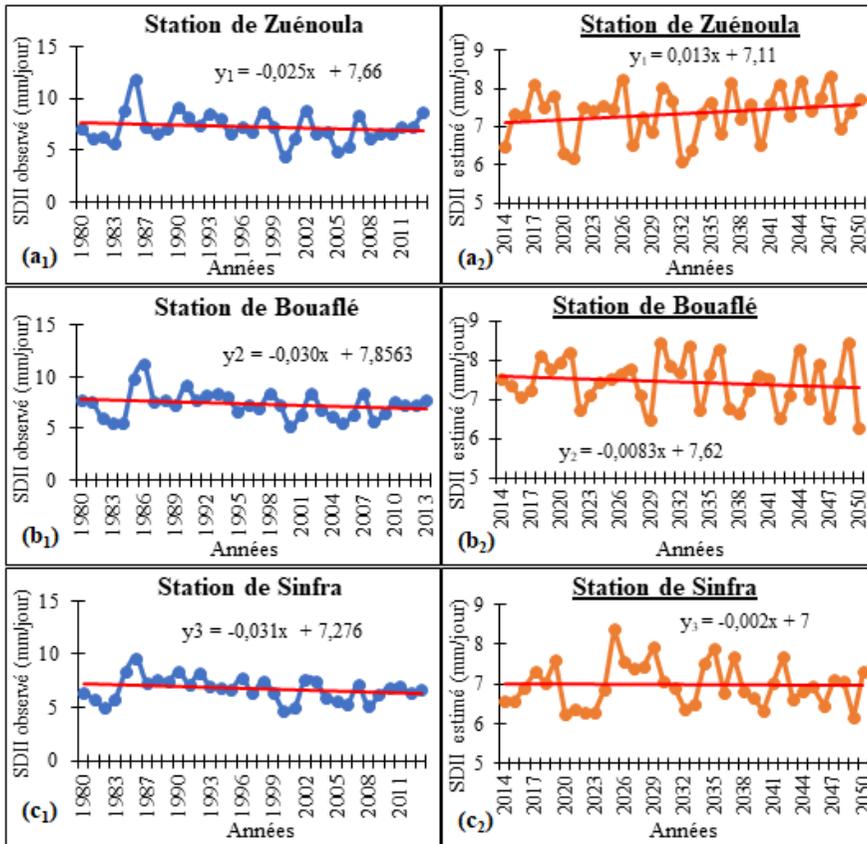


Figure 9 : Fluctuations de l'indice SDII observé (1986-2013) et généré (2014-2050)

Discussion

Les résultats de cette étude ont montré une baisse de tous les indices de précipitations. En effet, il ressort que divers indices pluviométriques calculés présentent des tendances continues vers une diminution (PRCPTOT, CWD, RX1days) sur les différentes périodes d'observation. De plus, l'étude a montré que la baisse des totaux des pluies (PRCPTOT) est plus significative dans la région avec un coefficient de -16,93. Les jours extrêmement pluvieux ont connu une baisse progressive dans la région d'étude. Cependant le nombre de jours des séquences sèches (CDD) est en hausse dans la région avec environ 5 jours chaque décennie. Les indices PRCPTOT enregistrés au cours de la saison pluvieuse influencent largement les rendements agricoles. Ainsi, une baisse de cet indice impacte négativement le rendement des cultures. Car, chaque plante a ses exigences en quantité d'eau pour couronner son cycle. Quand cette quantité n'est pas atteinte, il s'ensuit une baisse de la production. En outre, une année avec une occurrence importante de séquences sèches (CDD) se traduit par l'avènement d'un déficit des disponibilités naturelles en eau (l'écoulement superficiel ou des nappes souterraines). La sécheresse

agricole survient lorsque l'approvisionnement hydrique est insuffisant pour satisfaire les besoins en eau des plantes. De surcroît, quand la sécheresse intervient au début ou en pleine saison de croissance, elles peuvent être à l'origine d'un faux démarrage de saison ou encore hypothéquer toute une campagne agricole (Balliet, 2017). Par ailleurs, le nombre de jours pluvieux (CWD) détermine la durée des saisons pluvio-agricoles dans un lieu donné. Or la durée des cycles culturels est un facteur très déterminant de la production agricole. Elle oriente les paysans dans le choix des variétés à cultiver (Carbonel et *al.*, 1990). New et *al.*, (2006) ont montré que l'Ouest de l'Afrique connaissait une baisse des précipitations totales annuelles (PRCPTOT) et du nombre de jours de pluie. Aguilar et *al.*, (2009), dans leur analyse des précipitations de l'Afrique Centrale entre 1955 et 2006, sont arrivés aux mêmes conclusions. Outre les cumuls, Donat et *al.*, (2013) ont montré des tendances de l'indice CDD vers des conditions plus sèches en Asie de l'Est, en Australie, en Afrique du Sud, et dans des parties de l'Amérique du Sud.

Le modèle WEAGETS utilisé avec la méthode de Markov d'ordre 3 a permis de faire une projection à l'horizon 2050 des précipitations journalières de la région de la Marahoué. Les résultats montrent que la moyenne des cumuls de pluies moyennes mensuels observés est de 103,97 mm et celle estimée est de 100,71 mm soit un déficit de 3,26 mm par rapport à celle observée au cours de la chronique d'étude. Le cumul des hauteurs de pluies totales annuelles observées présente une baisse significative avec une moyenne de 1336 mm et celui généré également présente une allure légèrement décroissante avec un coefficient de -0,97 et une moyenne de 1311,25 mm soit une baisse de 24,75 mm. Caron et *al.*, (2008), dans leurs travaux dans la province du Québec au Canada, ont montré que la performance du modèle WEAGETS a généré des données hydroclimatiques avec la méthode des chaînes de Markov d'ordre 3. Chen et *al.*, (2012), ont démontré la performance du modèle WEAGETS à générer les données de précipitation et de température à l'échelle journalière. Mehan et *al.*, (2017), ont marqué la précision du modèle WEAGETS à simuler les données hydroclimatiques parmi tant de modèles de simulations. Kpan (2017) a également obtenu à partir du logiciel LARS-WG, une baisse pluviométrique de 1,86% à 4,45% d'ici 2050 dans le Sud-Est côtier de la Côte d'Ivoire. À partir du scénario A2 du modèle SDSM, Balliet (2017) a montré une baisse pluviométrique de 2,34% à l'horizon 2050 dans la région du Gôh en Côte d'Ivoire. Cette baisse générale des pluies a été constatée à l'horizon 2050 par Kouakou (2011) et Kouakou (2016) respectivement dans les bassins de la Comoé et du Bandama blanc en Côte d'Ivoire.

Conclusion

Cette étude a permis d'avoir une vue globale de la répartition des extrêmes pluviométriques dans la région de la Marahoué au cours de la période observée 1980 à 2013. À partir du modèle WEAGETS et de la méthode des chaînes de Markov d'ordre 3, la tendance future de ces extrêmes pluviométriques a été connue. Une tendance générale à la baisse des indices climatiques étudiés a été observée dans la région d'étude avec un déficit de 3,26 mm de pluie mensuelle générée pour la période 2014-2050 par rapport à celle observée au cours de la chronique d'étude (1980-2013). Cependant à l'échelle annuelle, cette baisse pluviométrique est de l'ordre de 24,75 mm. Les jours consécutivement secs (CDD) vont augmenter dans toute la zone d'étude tandis que les jours consécutivement humides (CWD) vont y baisser progressivement. Les lames d'eau journalière précipitées (SDII) vont diminuer au Sud et au Nord de la Marahoué mais une légère augmentation non significative sera observée dans quelques localités du Nord de la zone d'étude. Cette étude a montré la capacité du modèle WEAGETS et de la méthode des chaînes de Markov d'ordre 3 à bien simuler les extrêmes climatiques dans la zone d'étude. Ces résultats pourraient servir à la prise de décision afin d'améliorer les techniques et stratégies d'adaptation des populations aux risques futurs liés aux aléas climatiques.

References:

1. Abrate, T., Hubert, P., and Sighomnou, D., (2013). A study on hydrological series of the Niger River. *Hydrological Sciences Journal*, 58 (2), pp. 271-279. doi:10.1080/02626667.2012.752575.
2. Aguilar A., Aziz Barry A., Brunet M., Ekang L., Fernandes A., Massoukina M., Mbah J., Mhanda A., Do Nascimento D.J., Peterson T.C., Thamba Umba, O., Tomou M., Zhang X., 2009. Changes in temperature and rainfall extremes in West Central Africa, Guinea Conakry and Zimbabwe, 1955-2006. *Journal of geophysical research*, 114, D02115, doi : 10.1029/2008JDO11010, 2009.
3. Alexander L., and Herold N., (2016). The indices and the ClimPACT2 software. *Climate system science*, 46p. Disponible to : https://epic.awi.de/id/eprint/49274/1/ClimPACTv2_manual.pdf.
4. Anoh K. A., (2014). 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), 218 p.
5. Balliet R., (2017). Impacts du changement climatique et de la pression anthropique sur l'environnement naturel et humain de la région du Gôh (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire) : analyse de mesures endogènes

- d'adaptation. Thèse de Doctorat de l'Université Félix Houphouët Boigny de Cocody (Abidjan-Côte d'Ivoire), 193 p.
6. Bouba L., Sauvagnargues S.,Gonne B., Ayrat P.A., Ombolo A., (2017).Tendances pluviométriques et aléa inondation à l'Extrême-Nord Cameroun, numéro spécial, Geo-Eco-Trop.,41, 3, pp. 339-358.
 7. Bricquet J.P., Bamba F., Mahe G., Toure M. Et Olivry J.C., (1997). Variabilité des ressources en eau de l'Afrique Atlantique, PHI-V, 6, pp. 83-95.
 8. Carbonnel J.P, Hubert P., Valbadet E., Mermoud A. et Bariac T.H. (1990). Variabilité spatiale des précipitations soudano-sahéliennes à l'échelle décamétrique. C.R, Académie Science, Paris, Série II, pp. 1425-1430.
 9. Caron A., Leconte R., Brissette F., (2008). An improved stochastic weather generator for hydrological impact studies. Canadian Water Resources Journal, vol.33, n°3, pp.233-256.
 10. Chen J., Brissette F.P., Leconte R., (2010). A daily stochastic weather generator to preserve the low frequency of climate variability. Journal of Hydrology, 388, pp.480-490.
 11. Chen J., Brissette F.P., Leconte R., (2012). WeaGETS, a daily scale weather generator based on Matlab to generate precipitation and temperature. Procedia Environmental Sciences, 13, pp.2222–2235.
 12. Donat MG, Alexander LV, Yang H, Durre I, Vose R, Dunn RJH, Willett KM, Aguilar E, Brunet M, Caesar J, Hewitson B, Jack C, Klein Tank AMG, Kruger AC, Marengo J, Peterson TC, Renom M, Oria Rojas C, Rusticucci M, Salinger J, Elayah AS, Sekele SS, Srivastava AK, Trewin B, Villarroya C, Vincent LA, Zhai P, Zhang X, Kitching S., (2013). Updated analyses of extreme temperature and precipitation indices since the beginning of the 20th century: the hadex2 dataset. J. Geophys. Res. Atmos.118(5), p.2098–2118.
 13. Doumouya I., Kamagate B., Bamba A., Ouedraogo M., Ouattara I., Savane I., Goula B. T. A., Biemi J. (2009). Impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau et végétation du bassin versant du Bandama en milieu intertropical (Côte d'Ivoire). Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie, Issue 14, pp. 203-215.
 14. en Suède, 34 p.
 15. GIEC. (2013). Bilan sur les changements climatiques : Rapport de synthèse GIEC, Stockholm,
 16. Goula B. T. A., Kouassi V. J., et Savané I., (2006). Impacts du changement climatique sur les ressources en eau en zone tropicale humide : cas du Bandama en Côte d'Ivoire. Revue Agronomie Africaine, vol. 18, n° 1, pp.1-11

17. Hountondji Y.C., De Longueville F., Ozer P., (2011). Trends in extreme rainfall in Benin (West Africa), 1960-2000. Proceedings of the 1st International Conference of 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).
18. Hubert P., Carbonnel, J. P., Chaouche, A., (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques : application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 110, 3-4, pp. 349-367.
19. Hubert, P., Bader, J.C., et Bendjoudi, H., (2007). Un siècle de débits annuels du fleuve Sénégal. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 52, n°1, pp. 68-73. doi:10.1623/hysj.52.1.68
20. Irié G. R., Soro G. E., Goula B. T. A., (2015). Changements d'états de surface et évolutions spatio-temporelles des précipitations sur le bassin versant de la Marahoué (Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 13, 2, pp.386-397.
21. Koua T.J., Jourda J.P., Kouamé K.J., Anoh K.A. 2013. Assessment of sediments and pollutants in Lake Buyo, Côte d'Ivoire, Using SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Model. *J. Chem. Chem. Eng.* 7, pp. 1054-1059.
22. Kouakou K. E., Goula B. T. A. Et Savané I., 2007. 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), pp. 31-43.
23. Kouakou K.E. (2011). Impacts de la variabilité climatique et du changement climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant de la Comoé. Thèse Unique option sciences et gestion de l'environnement, Université d'Abobo-Adjamé, 186 p.
24. Kouakou Y. E. (2016). Adaptation au changement climatique et gestion des ressources en eau souterraine : conception d'un SIRS pour le bassin versant du Bandama Blanc à Korhogo (Nord Côte d'Ivoire). Thèse Unique de Doctorat, l'Université Nangui Abrogoua (Côte d'Ivoire), 182 p.
25. Kpan O. J. G., (2017). Incidence de la variabilité climatique sur les ressources en eau, le développement agricole et la santé des populations dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire et perspectives : cas de zone littorale d'Abidjan à Aboisso. Thèse de Doctorat de l'Université Félix Houphouët Boigny de Cocody (Abidjan-Côte d'Ivoire), 225 p.
26. Liéno, G., (2007). Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les transports de matières en suspension de

- quelques bassins versants représentatifs au Cameroun. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II.
27. Mehan S., Guo T., Gitau M. W., Flanagan D. C., (2017). Comparative study of different stochastic weather generators for the simulation of long-term climate data. *climate*, vol.5, n°26, p.40.
 28. N'Go Y. A., Kouassi K. H., Soro G. E., Meledje H. et Goula B. T. A., (2017). Dynamique et impact du climat sur les ressources hydriques et agricoles au sud-ouest de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 19, n°2, pp 304-314.
 29. N'guessan Bi V. H., Arona D., Adjakpa T., Kouadio B. H., Badara A. K., Kouame K., Assa Y., et Affian K., 2018. Apport de la télédétection à l'analyse spatio-temporelle de l'évolution des extrêmes pluviométriques dans le district d'Abidjan au Sud de la Cote d'ivoire. *Mélange*, 3, pp. 364-378.
 30. New M., Hewiston B., David B., Tsiga S.A., Kruger A., Manhinsue A., Gomez B., Coelho C.A., Masisi D.N., Kalulanga E., Bulane E., Fortunata L., Mdoka M.L. Lajoie R., (2006). Evidence of Changes in Daily Climate Extremes in Southern and Western Africa. *Journal of geophysical research*, 111, d14102, doi: 10.1029/2005jd006289.
 31. Olivry J.C., Bricquet J. P., Mahé G., (1993). Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ? (In : *Colloque AISH - Yokohama*), pp. 67-78, Publ. no 216.
 32. Richardson C. W., (1981). Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. *Water Resources Res*, 17, pp.182-90.
 33. Savane I., Coulibaly K. M., Gion P. 2001. Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. *Science et changement planétaire/Sécheresse*, Vol.12, Issue 4, pp. 231-237.
 34. Sensoy S., N. Türkoğlu , Akçakaya A., Ekici M. , Demircan, M., Ulupinar Y., Atay H., Tüvan A., and Demirbaş H ., (2013) : Trends in turkey climate indices from 1960 to 2010, proceeding of the 6th Atmospheric Science Symposium - ATMOS 2013 3 - 5 Haziran 2013, İstanbul.
 35. Taïbi, K.; Campo García, ADD.; Aguado, A.; Mulet Salort, JM. (2016). Early establishment response of different *Pinus nigra* ssp. *salzmanii* seed sources on contrasting environments : Implications for future reforestation programs and assisted population migration. *Journal of Environmental Management*. 171:184-194. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.014>
 36. Wang, X. L., (2003) : Comments on "Detection of undocumented change points : A revision of the twophase regression model." *J. Climate*, 16, pp. 3383-3385.

37. Zhang X., Aguilar E., Sensoy S., Melkonyan H., Tagiyeva U., Ahmed N., Kotaladze N., himzadeh F., Taghipour A., Hantosh T.H., Albert P., Semawi M., Karam Ali M., Said Al-Shabibi M.-H., Al-Oulan Z., ZatariT., Khelet I.-A., Hamoud S., Sagir R., Demircan M., Eken M., Adiguzel M., lexander L., Peterson T.C., and WallisT., (2005). Trends in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003. *Journal of Geophysical Research*, 110:D22104, DOI: 10.1029/2005JD006181.