

Évolution passée et future des précipitations extrêmes dans le Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire : cas du bassin versant de la rivière Lobo

Fabrice Blanchard ALLECHY^{1*}, Marc YOUAN TA^{1,2}, Vami Hermann N'GUESSAN Bi^{1,2}, Assa Fabrice YAPI¹, José Ricardo Elfried KOUAKOU² et Kouadio AFFIAN^{1,2}

¹ *Université Félix Houphouët-Boigny, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Laboratoire de Sciences du Sol, de l'Eau et de Géomatériaux, BP 582 Abidjan, Côte d'Ivoire*

² *Université Félix Houphouët-Boigny, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection, BP 801 Abidjan, Côte d'Ivoire*

(Reçu le 11 Novembre 2021 ; Accepté le 18 Janvier 2022)

* Correspondance, courriel : fabriceallechy@gmail.com

Résumé

Les événements climatiques extrêmes affectent de manière significative l'environnement, la société humaine et les moyens de subsistance. L'objectif de cette étude est d'analyser l'évolution passée et future des intensités et fréquences de pluies dans le bassin versant de la Lobo. L'approche méthodologique s'est basée sur le calcul des indices d'intensité et de fréquences de pluies à partir des données CHIRPS (1990 à 2019) et les données issues de 4 MCG (2021 à 2050). Le test de Mann Kendall a été utilisé pour évaluer les tendances et la méthode d'interpolation IDW pour analyser la répartition spatiale de ces indices. Les résultats montrent une augmentation des indices d'intensité (PRCPTOT, Rx1day, Rx3day et Rx5day) et de fréquence de pluies (R95ptot et R99ptot) pour la période de 1990 à 2019. La moyenne des 4 MGC indique que ces tendances augmenteront également avec le scénario RCP 4.5 de 2021 à 2050 à l'exception de Rx1day qui connaîtra une tendance à la baisse dans la moitié nord du bassin. Les plus importantes intensités de pluies se localiseront à l'ouest et au sud tandis que les fréquences de pluies intenses et extrêmes augmenteront du sud-est au nord-ouest du bassin. Cette étude peut aider les décideurs politiques à prendre des décisions relatives à la planification et stratégie pour lutter contre les risques d'inondation dans l'avenir.

Mots-clés : *évolution, extrêmes pluviométriques, RCP4.5, bassin de la Lobo, Côte d'Ivoire.*

Abstract

Past and future evolution of extreme precipitation in central-western of Côte d'Ivoire : case of the lobo river watershed

Extreme weather events significantly affect the environment, human society and livelihoods. The objective of this study is to analyze the past and future evolution of rainfall intensity and frequency in the Lobo watershed. The methodological approach was based on the calculation of rainfall intensity and frequency indices from CHIRPS data (1990 to 2019) and data from 4 GCMs (2021 to 2050). The Mann Kendall test was used to assess

trends and the IDW interpolation method to analyze the spatial distribution of these indices. The results show an increase in the intensity (PRCPTOT, Rx1day, Rx3day and Rx5day) and rainfall frequency (R95ptot and R99ptot) indices for the period 1990 to 2019. The average of the 4 CGMs indicates that these trends will also increase with the RCP 4.5 scenario from 2021 to 2050 with the exception of Rx1day which will show a decreasing trend in the northern half of the watershed. The highest rainfall intensities will be located in the west and south while the frequency of intense and extreme rainfall will increase from the southeast to the north-west of the watershed. This study can help policymakers to make decisions on planning and strategy to combat flood risk in the future.

Keywords : *trends, rainfall extremes, RCP4.5, Lobo watershed, Côte d'Ivoire.*

1. Introduction

Le changement climatique est le plus grand défi environnemental auquel toute l'humanité doit faire face, pour assurer la survie des espèces et permettre des conditions de vie décente pour les générations présentes et futures. Il se traduit par une augmentation des températures annuelles moyennes, une réduction et une augmentation de la variabilité des précipitations [1]. Ce qui entraîne une modification de la fréquence, de l'intensité, de l'étendue spatiale, de la durée et du moment des événements météorologiques et climatiques et produit des phénomènes climatiques inattendus [2]. L'augmentation des précipitations extrêmes en terme de fréquence et d'intensité induit des risques et des catastrophes naturelles, qui causent d'énormes dommages sur les écosystèmes naturels et le développement socio-économique [3]. Au cours des deux dernières décennies, un retour progressif des précipitations est observé en Afrique [4], notamment dans le Centre-Nord du Burkina-Faso [5]. Les résultats issus des travaux de [6] révèlent une forte variabilité spatiale de la pluviométrie annuelle 2010 et 2015. En Côte d'Ivoire, les jours très humides, les jours extrêmement humides et le cumul des hauteurs de précipitations sur 1 et 5 jours présentent une tendance à la hausse [7, 8]. Beaucoup de projections climatiques ont montré que la partie occidentale de l'Afrique va connaître une hausse importante des températures associée à une forte variabilité des précipitations [9, 10]. La Phase 5 du Projet d'Intercomparaison de Modèles Couplés (CMIP5) a montré une augmentation des fortes précipitations d'ici la fin du 21^e siècle en Afrique de l'ouest [11]. De plus, les modèles climatiques régionaux prévoient un nombre croissant de précipitations extrêmes au cours de la période de mai et juillet [12].

Ce changement de la configuration des précipitations peut provoquer des événements catastrophiques et affecter l'environnement et la société en augmentant la probabilité d'inondations dans la région en cas de fortes précipitations [13]. Des événements extrêmes de précipitations menacent la Côte d'Ivoire. Les impacts du changement climatique sur les précipitations extrêmes rendent le pays, notamment le bassin versant de la rivière Lobo plus vulnérables aux inondations. En octobre 2019, les inondations catastrophiques en Côte d'Ivoire ont touché 12900 personnes, causant 32 blessés et la mort de 12 personnes, avec 2020 maisons submergées et 72 maisons détruites [14]. Les pertes annuelles moyennes directes du pays causées par les inondations sont estimées à environ 77 millions USD par année [14]. A cela s'ajoute les risques de sécheresse qui ont entraîné des pertes représentant entre 0 et 3 % de la production totale des principales cultures du pays [14]. La fréquence de ces événements extrêmes de précipitations est susceptible d'augmenter dans l'avenir avec le réchauffement climatique. L'estimation et la compréhension de la variabilité des événements extrêmes pour le climat actuel et futur sont importantes pour la formulation de stratégies d'adaptation, d'atténuation et de planification des ressources et de l'urbanisme [15]. Il convient ainsi de connaître les tendances des extrêmes pluviométriques des zones comme le bassin versant de la Lobo, qui couvre une zone

d'un grand intérêt, dans la mesure où cette zone est essentiellement agricole dépendant des aléas climatiques et l'une des paniers économiques et alimentaires du pays. L'objectif de ce travail est d'analyser l'évolution passée et future des intensités et fréquences de pluies extrêmes dans le bassin versant de la rivière Lobo, en utilisant le scénario RCP 4.5 afin de servir d'outils d'aide et de décisions aux autorités compétentes pour une meilleure stratégie d'adaptation.

2. Méthodologie

2-1. Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant de la rivière Lobo est un sous bassin en rive gauche du fleuve Sassandra avec une superficie de 12722 km² et une longueur de 355 km. Il est situé au centre-ouest de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 6°05' et 6°55' Ouest et les latitudes 6°02' et 7°55' Nord. La rivière Lobo, l'un de ses principaux affluents prend sa source au sud de la région de Séguéla et se jette dans le Sassandra non loin de la localité de Loboville. La majeure partie du bassin appartient à la région du Haut-Sassandra, le chef-lieu de région est Daloa (*Figure 1*).



Figure 1 : Localisation du bassin versant de la rivière Lobo

Deux types de climat caractérisent le bassin versant de la Lobo : le climat équatorial de transition atténuée (climat baouléen avec deux saisons) qui s'observe dans la moitié nord du bassin avec une pluviométrie interannuelle de 1425,82 mm ; et le climat équatorial de transition (climat attiéen avec quatre saisons) qui s'observe dans l'extrême sud avec une pluviométrie interannuelle de 1523,24 mm. On distingue deux types de relief dans le bassin : les plaines dont l'altitude varie entre 160 m et 240 m, localisées au sud du bassin et les plateaux occupant la majeure partie du bassin correspondent aux altitudes variant entre 240 m et 320 m [16]. Les sols sont essentiellement de type ferrallitiques fortement ou moyennement désaturés remaniés modaux avec recouvrement issus de schistes et de granites.

2-2. Matériel

Deux types de données ont été utilisés dans cette étude :

- les données journalières de précipitations (mm) et de température ($^{\circ}\text{C}$) de dix-sept points de mesures couvrant la zone d'étude sur la période de 1981 à 2019 (soit 38 ans). Elles proviennent du Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) V2.0 disponible sur le site : <http://chg.ucsb.edu/data/chirps/> et ;
- les données journalières de précipitations, températures maximales et minimales issues de 4 modèles de circulation générale (MCG), forcés pour le futur par le scénario RCP 4.5 (**Tableau 1**) sur une période historique (1981-2005) et future (2021 à 2050).

Tableau 1 : Description des modèles climatiques générales utilisés

Nom du modèle	Institut/pays	Résolution
CanESM2	Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique	$2,81^{\circ} \times 2,79^{\circ}$
HadGEM2-ES	Met Office Halley Centre (Réalizations supplémentaires de HadGEM2-ES fournies par l'institut national de recherche spatiale)	$1,88^{\circ} \times 1,25^{\circ}$
MIROC-ESM	Agence japonaise des sciences et technologies marines et terrestres, Institut de recherche sur l'atmosphère et les océans (Université de Tokyo) et Institut national d'études environnementales.	$2,81^{\circ} \times 2,79^{\circ}$
MIROC-ESM-CHEM		$2,81^{\circ} \times 2,79^{\circ}$

L'étude de l'évolution des extrêmes climatiques dans le bassin de la rivière Lobo a été réalisée grâce aux logiciels qui suivent :

- CDO (Climate Data Operator ou Operateur de données climatiques) pour l'analyse et le traitement des données (rééchantillonnage et regridage des données) de modèles climatiques ;
- la suite *climate4R* qui est constituée d'un ensemble de package R permettant un accès aux données climatiques et permettant la correction de biais et la descente d'échelle et la visualisation des données climatiques ;
- le programme ClimPACT2 master a permis de calculer les indices climatiques ;
- XLSTAT 2014, pour les calculs statistiques des données climatiques et ;
- ArcGIS 10.5 a été utilisé pour l'interpolation spatiale des indices pluviométriques.

2-3. Méthodes

2-3-1. Traitement des données issues des MCG

Une suite de MCG CMIP5 a été utilisée pour générer des données de précipitations et températures journalières de 2021 à 2050. Ces données ont été échantillonnées à une résolution de $0,25^{\circ}$. La méthode Empirical Quantile Mapping (EQM) est largement appliquée pour corriger les biais et donne généralement de meilleurs résultats que les autres méthodes de correction des biais [17, 18]. Cette méthode utilisée dans cette étude, est dérivée du calcul de la fonction de densité de probabilité (PDF) empirique, et utilise la fonction de distribution cumulative (CDF) pour corriger les données brutes. Elle est appliquée sur la période de calibration qui correspond à notre jeu de données d'entraînement (1981-1996) tandis que la période de validation (1997-2005) est utilisée comme jeu de données de test pour étudier la performance de la procédure de

correction de biais. Les tests d'adéquation sont utilisés pour évaluer la performance de la correction de biais, notamment le coefficient de corrélation de Pearson (R), l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur moyenne absolue (MAE) et le pourcentage de biais (PBIAS) qui sont définis de manière suivante [19] :

$$R = \frac{\text{cov}(M_i, O_i)}{\sqrt{\text{var}(M_i) \text{var}(O_i)}} \tag{1}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2} \tag{2}$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M_i - O_i| \tag{3}$$

$$\text{PBIAS} = 100 \left(\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)}{\sum_{j=1}^n (O_j)} \right) \tag{4}$$

M_i étant les données historiques, O_i les données d'observations et n le nombre de données.

2-3-2. Calcul des indices climatiques

La méthode des indices climatiques [20 - 22] proposée par l'équipe d'experts sur la détection des changements climatiques et les indices (ETCCDI) a été utilisée pour analyser les intensités et fréquences extrêmes de précipitations. Cette méthode se déroule en trois étapes. D'abord, l'homogénéité des données est vérifiée à l'aide d'un programme informatique RHtest développé par le Service Météorologique du Canada et implémenté sous l'environnement du logiciel de statistique et de programmation R. Ensuite, la qualité des données est contrôlée. Ce procédé consiste à identifier les erreurs d'enregistrement qui peuvent exister sur des données journalières. Enfin, l'étape suivante est le calcul des indices des extrêmes climatiques. Dans cette étude, sur les nombreux indices climatiques définis par la communauté des climatologues, seuls les indices d'intensités (PRCPTOT, Rx1day, Rx3day et Rx5day) et de fréquences (R95ptot et R99ptot) ont fait l'objet de notre étude (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Définition des indices climatiques utilisés dans cette étude

Groupes	Indices	Nom de l'indice	Définitions	Unités
Indices d'intensité	PRCPTOT	Cumul annuel des hauteurs de pluies	Précipitations totales annuelles des jours pluvieux ($P \geq 1$ mm)	mm
	Rx1day	Hauteur maximale des précipitations d'un jour	Précipitation totale maximale d'un jour pluvieux	mm
	Rx3day	Cumul maximal des précipitations de 3 jours	Précipitation totale maximale sur 3 jours pluvieux consécutifs pendant l'année	mm
	Rx5day	Cumul maximal des précipitations de 5 jours	Précipitation totale maximale sur 5 jours pluvieux consécutifs pendant l'année	mm
Indices de fréquence	R95ptot	Fréquence des pluies intenses	Fraction de la pluie totale des jours pluvieux provenant de jours très humides	%
	R99ptot	Fréquence des pluies extrêmes	Fraction de la pluie totale des jours pluvieuses provenant de jours extrêmement humides	%

2-3-2. Analyse des tendances des indices pluviométriques

La méthode de régression linéaire a été utilisée pour étudier et analyser les tendances des précipitations dans la série chronologique. Le principal paramètre statistique (la pente) est utilisé pour indiquer le changement temporel de la variable étudiée à l'échelle spatiale. L'évaluation des tendances a été estimée à l'échelle annuelle pour les indices de précipitations extrêmes en utilisant le test de Mann-Kendall. C'est un test non paramétrique qui est largement utilisé dans les séries chronologiques hydrologiques et climatologiques [23]. Il est recommandé par l'OMM pour évaluer les tendances temporelles dans les séries chronologiques de données environnementales [24]. Les tendances ont été considérées au niveau de signification de 5 %. L'analyse spatiale des indices de précipitations extrêmes a été réalisée à l'aide de la méthode de surface à pondération par distance inverse (IDW). Cette méthode est largement appliquée dans les applications d'interpolation spatiale des données de précipitation et a donné des résultats satisfaisants [25].

3. Résultats

3-1. Evaluation de la correction de biais des données MCG

Les données CHIRPS de précipitations et températures de chaque MCG sur la période de 1997 à 2005 ont été vérifiées à l'aide du coefficient de corrélation (R), du pourcentage de biais (PBIAIS), de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et de l'erreur absolue moyenne (MAE) indiqués dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Analyse statistique de la correction de biais

Zone d'étude	Modèles	Variables	R	MAE	RMSE	PBIAS
Moitié nord du bassin versant de la Lobo	CanESM2	P	0,59	5,12	7,18	4,16
		Tmax	0,83	3,75	4,27	-6,43
		Tmin	0,72	1,57	2,01	-2,87
	HadGEM-ES	P	0,71	5,17	7,07	8,22
		Tmax	0,84	4,15	4,62	-7,81
		Tmin	0,61	1,67	2,14	-4,57
	MIROC-EMS	P	0,64	5,07	6,85	5,43
		Tmax	0,85	3,92	4,37	-7,11
		Tmin	0,79	1,64	2,08	-3,78
	MIROC-EMS -CHEM	P	0,68	4,98	7,73	4,26
		Tmax	0,84	4,31	4,71	-8,36
		Tmin	0,70	1,81	2,29	-5,03
Extrême sud du bassin versant de la Lobo	CanESM2	P	0,57	6,03	8,38	0,96
		Tmax	0,82	3,97	4,42	-7,45
		Tmin	0,67	1,47	1,80	-4,64
	HadGEM-ES	P	0,78	6,15	8,33	11,41
		Tmax	0,83	4,38	4,77	-8,82
		Tmin	0,58	1,67	2,08	-4,55
	MIROC-EMS	P	0,79	5,81	7,89	1,82
		Tmax	0,84	4,18	4,56	-8,22
		Tmin	0,75	1,57	1,91	-5,32
	MIROC-EMS-CHEM	P	0,64	5,85	7,85	1,61
		Tmax	0,84	4,53	4,85	-9,34
		Tmin	0,65	1,78	2,14	-6,41

La corrélation de la moyenne des points de mesures des données journalières de températures et de précipitations dans la moitié nord du bassin varie de 0,59 à 0,85, la RMSE est comprise entre 2,01 et 7,18 et la MAE varie de 1,64 à 5,17. Les pourcentages de biais ont donné des résultats variant de -7,11 % à 8,22 %. Dans l'extrême sud, la corrélation est de 0,57 à 0,84. La MAE et la RMSE varient respectivement de 1,47 à 6,15 et de 1,8 à 7,89. Le pourcentage de biais oscille de -9,34 % à 11,41 %. La corrélation des données après la correction de biais est comprise entre -1 et 1 et sont plus proche de 1. Les valeurs de MAE et RMSE sont également plus proches de 1 avec un pourcentage de biais très faible inférieur à environ 11,5 %. Les résultats de l'analyse statistique de la correction de biais impliquent que les données de précipitations et de températures peuvent être utilisées pour les changements des extrêmes climatiques futures.

3-2. Analyse et prévision des extrêmes pluviométriques dans le bassin versant de la Lobo

3-2-1. Evolution des extrêmes pluviométriques de 1990 à 2019

3-2-1-1. Indices d'intensité

Les variations moyennes annuelles et tendances linéaires des indices d'intensité sont présentées par les **Figures 2** et **3**. Dans la moitié nord du bassin, PRCPTOT a fluctué de 1047,61 mm à 1581,76 mm avec une moyenne de 1239,99 mm. Avec une moyenne de 87,92 mm, Rx3day a oscillé entre 65,51 mm et 121,39 mm. Rx5day a atteint au maximum 166,11 mm avec une moyenne de 109,38 mm.

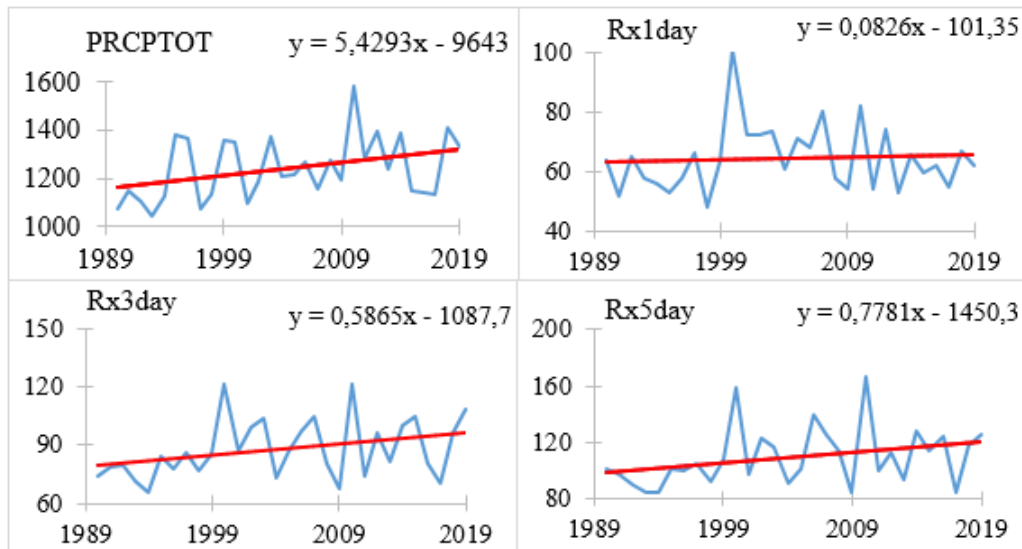


Figure 2 : Variations annuelles et tendances linéaires des indices d'intensité dans la moitié nord du bassin de 1990 à 2019

Dans l'extrême sud du bassin, PRCPTOT a varié entre 1122,75 mm et 2015,79 mm avec une moyenne 1498,89 mm. Rx1day s'est situé entre 60,01 mm à 102,56 mm avec une moyenne n'excédant pas 72,89 mm. Rx3day a varié entre 72,14 mm et 147,8 mm avec une persistance pouvant atteindre 95,68 mm. Rx5day a eu une moyenne de 123,61 mm et a oscillé entre 83,24 et 235,81 mm. Les indices d'intensité en générale ont présenté tous des tendances à la hausse.

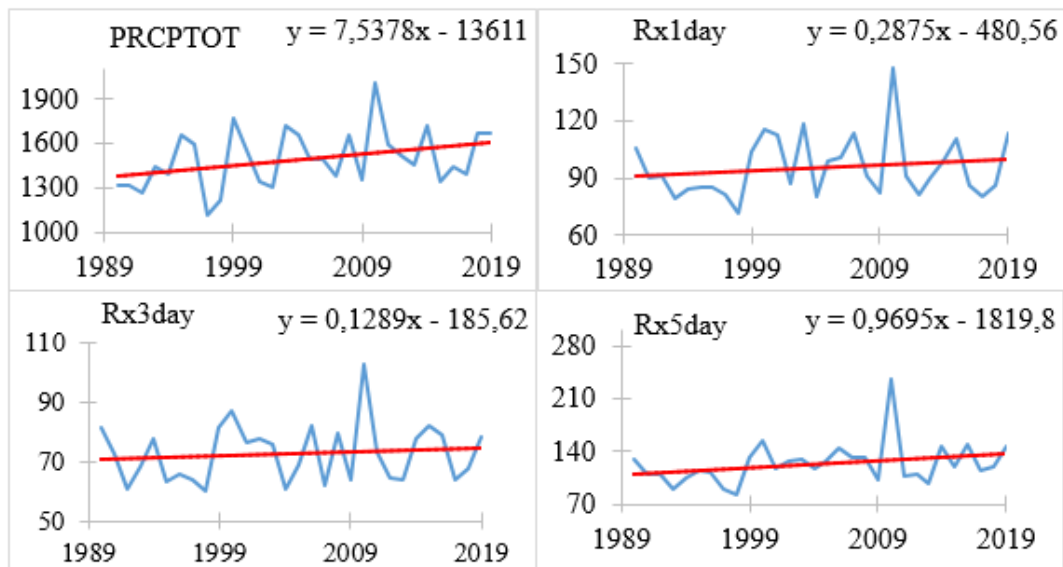


Figure 3 : Variations annuelles et tendances linéaires des indices d'intensité dans l'extrême du bassin de 1990 à 2019

Les indices PRCPTOT, Rx1day, Rx3day et Rx5day ont respectivement augmenté de 5,43 mm/an, 0,082 mm/an, 0,586 mm/an et 0,778 mm/an dans la moitié nord du bassin. Ces mêmes tendances ont aussi été enregistrées dans l'extrême sud du bassin mais avec PRCPTOT et Rx5day qui sont statistiquement significatifs (p-value est

égal respectivement à 0,045 et 0,04). Ainsi, il a eu une hausse de 7,54 mm/an de PRCPTOT, 0,129 mm/an de Rx1day, 0,287 mm/an de Rx3day, 0,969 mm/an. Statistiquement PRCPTOT, Rx3day et Rx5day sont significatifs avec des p-values respectifs de 0,03, 0,034 et 0,016 dans la moitié nord et dans l'extrême sud, c'est seulement PRCPTOT et Rx5day qui sont significatifs (p-values respectives 0,045 et 0,04). Les plus fortes intensités de pluies ont lieu en 2010, par contre les plus faibles ont été enregistrées en 1998.

3-2-1-2. Indices de fréquence

Les **Figures 4** et **5** indiquent les variations moyennes annuelles et tendances linéaires des indices de fréquence de pluies du bassin versant de la Lobo. La moitié nord du bassin est marquée par R95ptot qui a atteint au maximum 32,97 % avec une moyenne de 18,91 %. R99ptot s'est situé entre 1,51 % à 12,28 % avec une moyenne de 5,44 % (**Figure 4**). Les tendances de ces indices sont tous à la hausse. La fréquence de pluies intenses et la fréquence de pluies extrême ont augmenté respectivement de 0,077 % par an et 0,024 % par an.

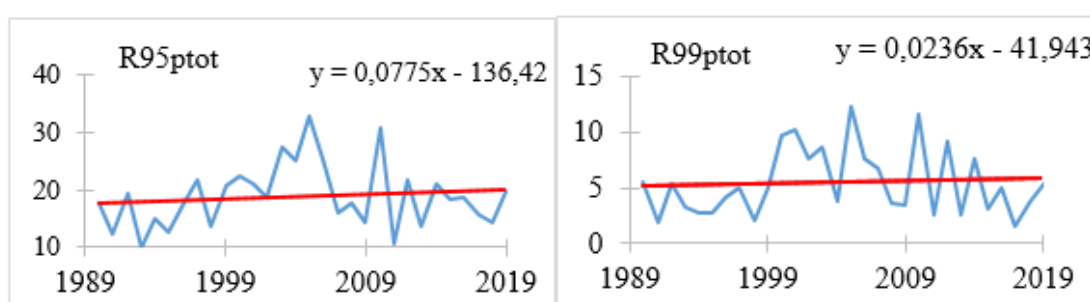


Figure 4 : Variations annuelles et tendances linéaires des indices de fréquence dans la moitié nord du bassin de 1990 à 2019

Quant à l'extrême sud du bassin, il est marqué par une fluctuation de R95ptot qui n'a pas excédé 29,54 % et une persistance de 19 %. R99ptot a une moyenne de 5,46 % et s'est étendu jusqu'à 14,22 % (**Figure 5**). L'extrême sud du bassin a également connu les mêmes tendances que la moitié nord. Ainsi, les fréquences de pluies intenses et extrêmes ont connu une hausse respectivement de 0,092 % et 0,013 %.

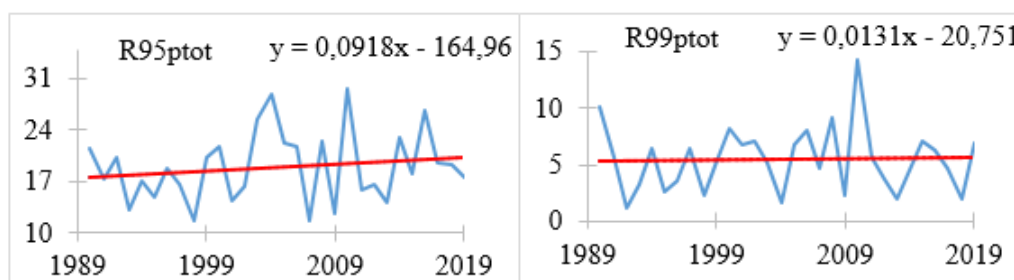


Figure 5 : Variations annuelles et tendances linéaires des indices de fréquence dans l'extrême du bassin de 1990 à 2019

Les p-values des indices de fréquence sont statistiquement non significatifs et varient de 0,1 à 0,49 sur l'ensemble du bassin. La plus grande fréquence de pluies intenses a été enregistrée en 2005 et la plus faible en 1993, tandis que la fréquence de pluies extrêmes la plus remarquable a eu lieu en 2010 et la moins remarquable en 1992.

3-2-2. Evolution des extrêmes pluviométriques de 2021 à 2050

3-2-2-1. Indices d'intensité

Les prévisions des indices d'intensité de pluies obtenues avec la moyenne des modèles dans la moitié nord du bassin (**Figure 6**) montrent que PRCPTOT sera compris entre 1024,89 mm et 1412,04 mm avec une moyenne de 1195,87 mm. Rx1day aura une persistance de 27,65 mm et n'excèdera pas 38,28 mm. Rx3day pourra atteindre au maximum 90,1 mm avec une moyenne de 52,14 mm et Rx5day oscillera entre 55,43 et 108,42 mm avec une moyenne de 69,15 mm.

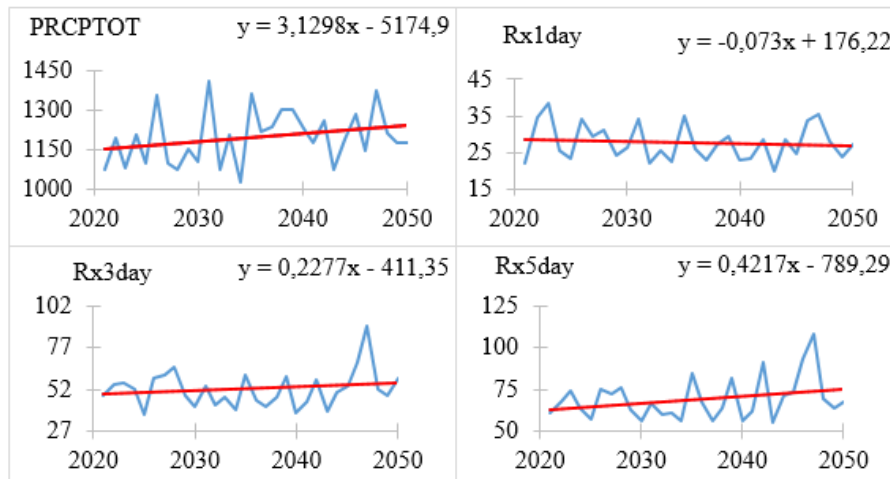


Figure 6 : Variations annuelles et tendances linéaires des indices d'intensités dans la moitié nord du bassin de 2021 à 2050

Dans l'extrême sud du bassin (**Figure 7**), PRCPTOT se situera entre 1245,86 et 1677,08 mm avec une persistance de 1418,42 mm. Rx1day aura une moyenne de 28,66 mm et variera de 21,06 à 42,19 mm. Avec une moyenne de 55,31 mm, Rx3day sera entre 40,12 et 92,77 mm. Quant à Rx5day, il oscillera entre 56,52 à 115,27 mm avec une persistance de 75,16 mm.

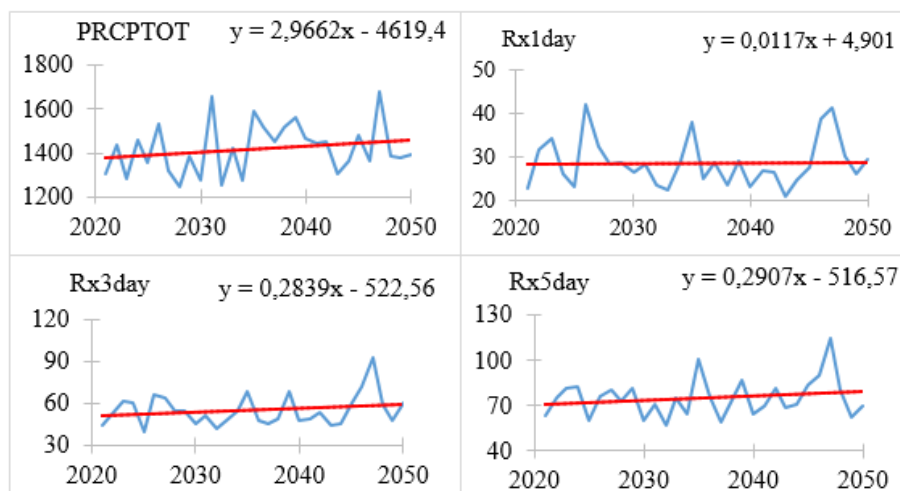


Figure 7 : Variations annuelles et tendances linéaires des indices d'intensité dans l'extrême sud du bassin de 2021 à 2050

Les indices d'intensité de pluies extrêmes présentent des tendances à la hausse sauf Rx1day qui montre une tendance en régression dans la moitié nord du bassin. Ces tendances sont non significatives car les p-values sont compris entre 0,16 et 0,49. Elles montrent que PRCPTOT augmentera de 3,13 mm/an, Rx3day de 0,23 mm/an, Rx5day de 0,42 mm/an tandis que Rx1day diminuera de 0,07 mm/an dans la moitié nord du bassin. Par contre l'extrême sud du bassin sera marquée par une augmentation de l'intensité des pluies avec 2,97 mm/an de PRCPTOT ; 0,01 mm/an de Rx1day ; 0,28 mm/an de Rx3day et 0,29 mm/an de Rx5day. Les quantités de pluies les plus importantes seront enregistrées en 2047 et les moins importantes en 2025, 2034 et 2043.

3-2-2-2. Indices de fréquence

Les **Figures 8** et **9** illustrent la variation et tendance linéaire des indices de fréquence sur la période future de 2021 à 2050. Dans la moitié nord du bassin, la moyenne des MCG prévoit une fluctuation de 0,19 % à 18,44 % de R99ptot avec une persistance de 4,78 % et R95ptot qui aura une moyenne de 17,75 % et n'excédera pas 29,44 %. Le bassin versant de la Lobo connaîtra une augmentation de 0,17 % par an de R95ptot et 0,062 % par an de R99ptot dans sa partie nord (**Figure 8**).

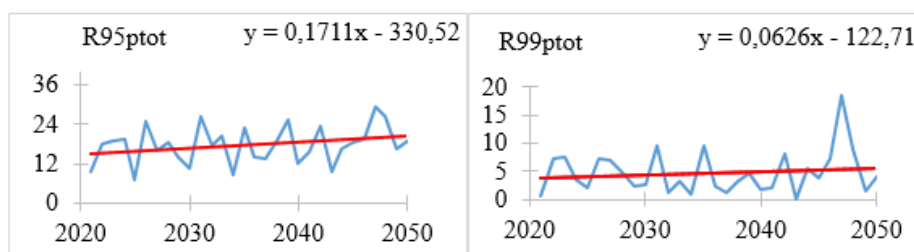


Figure 8 : Variations annuelles et tendances linéaires des indices de fréquence dans la moitié nord du bassin de 2021 à 2050

L'extrême sud du bassin sera marqué par une variation de R95ptot allant de 8,78 % et 29,06 % avec une valeur moyenne de 17,01 %. R99ptot pourra atteindre au maximum 19,41 % et aura une persistance de 4,56 %. L'extrême sud connaîtra également une hausse de 0,16 % par an de R95ptot et 0,07 % par an de R99ptot (**Figure 9**).

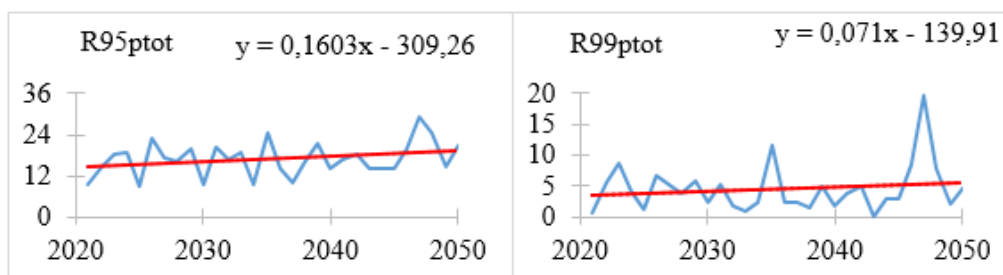


Figure 9 : Variations annuelles et tendances linéaires des indices de fréquence dans l'extrême sud bassin de 2021 à 2050

Les indices de fréquence montrent tous une tendance à la hausse. Avec des p-values variant de 0,11 à 0,49, aucun indice n'est statistiquement significatif sur l'ensemble de la zone étudiée. L'année 2047 enregistrera la fréquence de pluies la plus élevée et la plus faible sera observée en 2025 et 2043.

3-3. Caractéristiques spatiales des indices climatiques extrêmes dans le bassin de la Lobo

3-3-1. Répartition spatiale des indices pluviométriques extrêmes de 1990 à 2019

3-3-1-1. Indices d'intensité

La répartition spatiale des indices d'intensité de pluies extrêmes dans le bassin est illustrée par la **Figure 10**. Les intensités de pluies extrêmes ont augmenté généralement du nord-est vers le sud-ouest du bassin de la rivière Lobo. En effet, les précipitations totales annuelles les plus importantes ont été localisées dans l'extrême sud du bassin dans les localités de Loboville et Grand-zattry tandis que les moins importantes ont été enregistrées au nord dans les localités de Séguéla et Vavoua. Quant aux intensités de pluies sur 1 jour, 3 jours et 5 jours, elles ont été plus importantes dans l'ouest du bassin notamment dans les localités de Pélézi, Zoukougbeu et Loboville. Les moins importantes ont été observées à Vavoua et Séguéla.

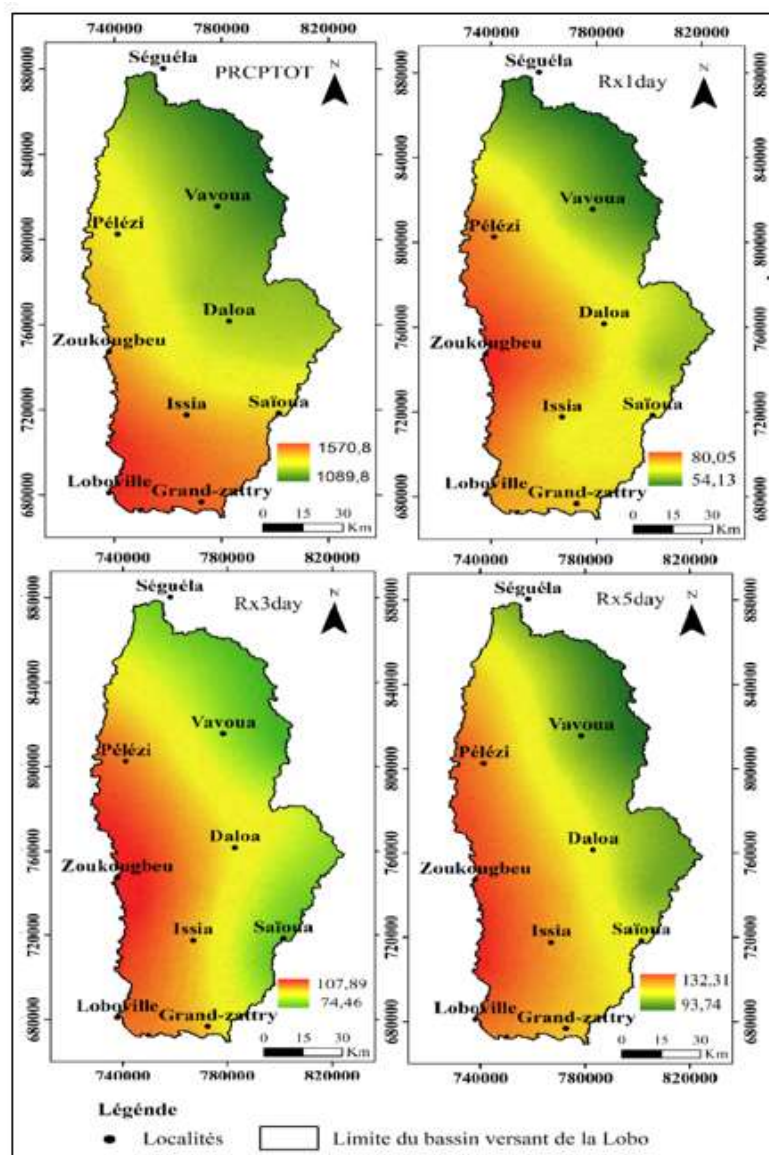


Figure 10 : Répartition spatiale des indices d'intensité dans le bassin versant de la rivière Lobo de 1990 à 2019

3-3-1-2. Indices de fréquence

La **Figure 11** montre la distribution spatiale des indices de fréquence dans le bassin versant de la Lobo. En examinant les distributions spatiales de ces indices, les fréquences de pluies intenses et extrêmes ont été minimales au nord, à l'est et au sud-est du bassin. Les fréquences maximales ont concerné la partie ouest et centrale du bassin (Pélési, Zoukougbeu et Daloa), avec une légère variation de la couverture spatiale du maximum de la fréquence de pluies extrêmes vers l'est, plus étendue que celle de la fréquence de pluies intenses.

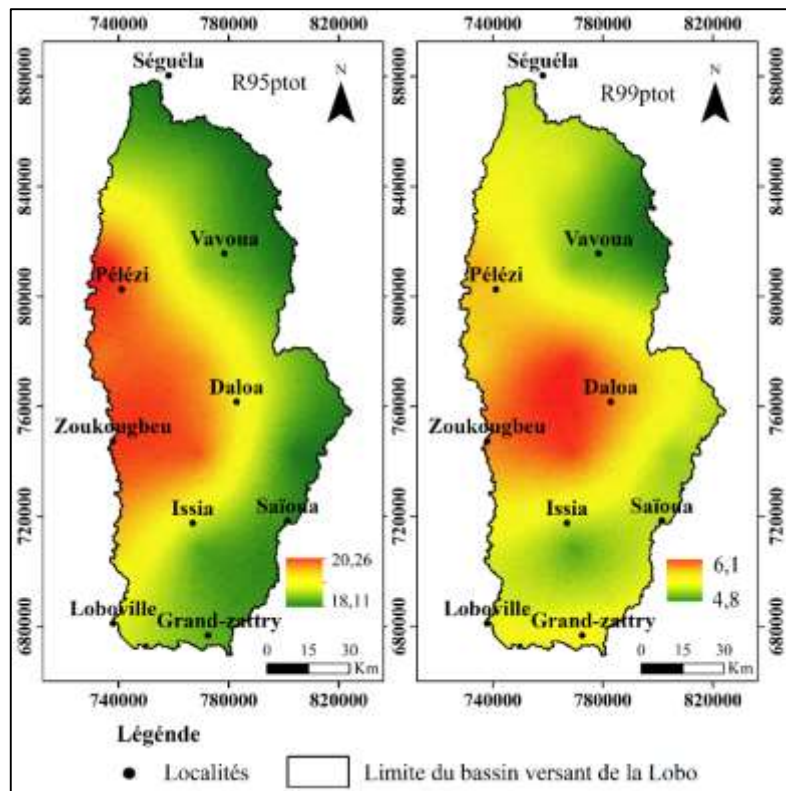


Figure 11 : Répartition spatiale des indices de fréquence dans le bassin versant de la rivière Lobo de 1990 à 2019

3-3-2. Répartition spatiale des indices pluviométriques extrêmes de 2021 à 2050

3-3-2-1. Indices d'intensité

La **Figure 12** présente la répartition spatiale des indices d'intensité de pluies extrêmes de 2021 à 2050 dans le bassin versant de la Lobo. Les hauteurs totales de pluies annuelles (PRCPTOT) diminueront du sud-ouest au nord-est du bassin avec les quantités de pluies importantes à Zoukougbeu, Loboville, Issia et Grand-zattry et les quantités de pluies moins importantes à Vavoua et Séguéla. Les cumuls des hauteurs de pluies sur 1, 3 et 5 jours (Rx1day, Rx3day et Rx5day) augmenteront du nord-est vers le sud-ouest avec les plus forts cumuls qui seront enregistrés à l'ouest (Pélési et Zoukougbeu) et les plus faibles à l'est du bassin de la Lobo.

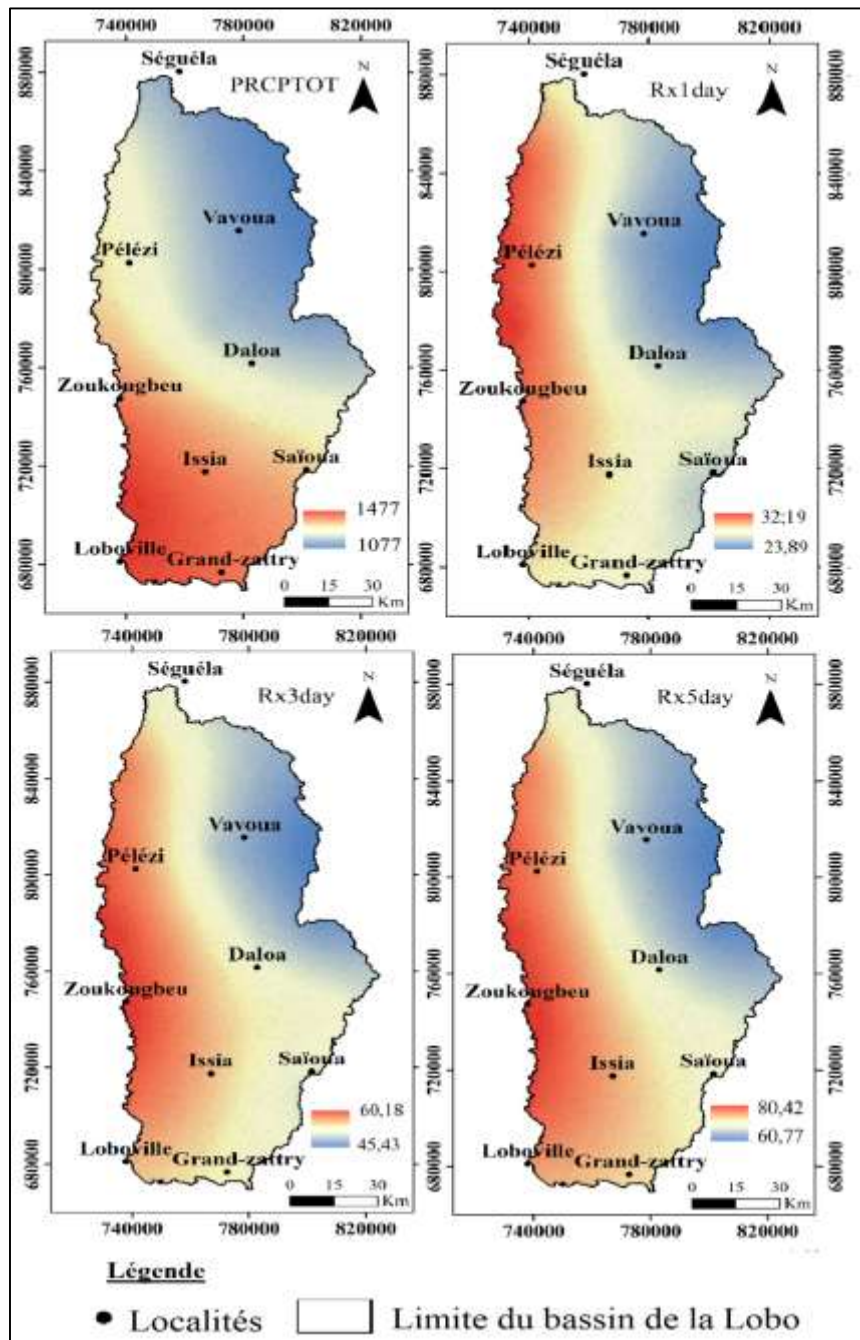


Figure 12 : Répartition spatiale des indices d'intensité dans le bassin versant de la rivière Lobo de 2021 à 2050

3-3-2-2. Indices de fréquence

La répartition spatiale des indices de fréquence dans le bassin de la rivière Lobo pour la période de 2021 à 2050 est illustrée par la **Figure 13**. Elle montre que les fréquences de pluies intenses ($R95_{ptot}$) et extrêmes ($R99_{ptot}$) augmenteront du sud-est vers le nord-ouest. Les localités de Pélési et Séguéla enregistreront des fréquences de pluies intenses et extrêmes les plus importantes, tandis que les fréquences de pluies intenses et extrêmes les moins importantes s'observeront dans les localités de Grand-zatry, Loboville, Issia et Saïoua.

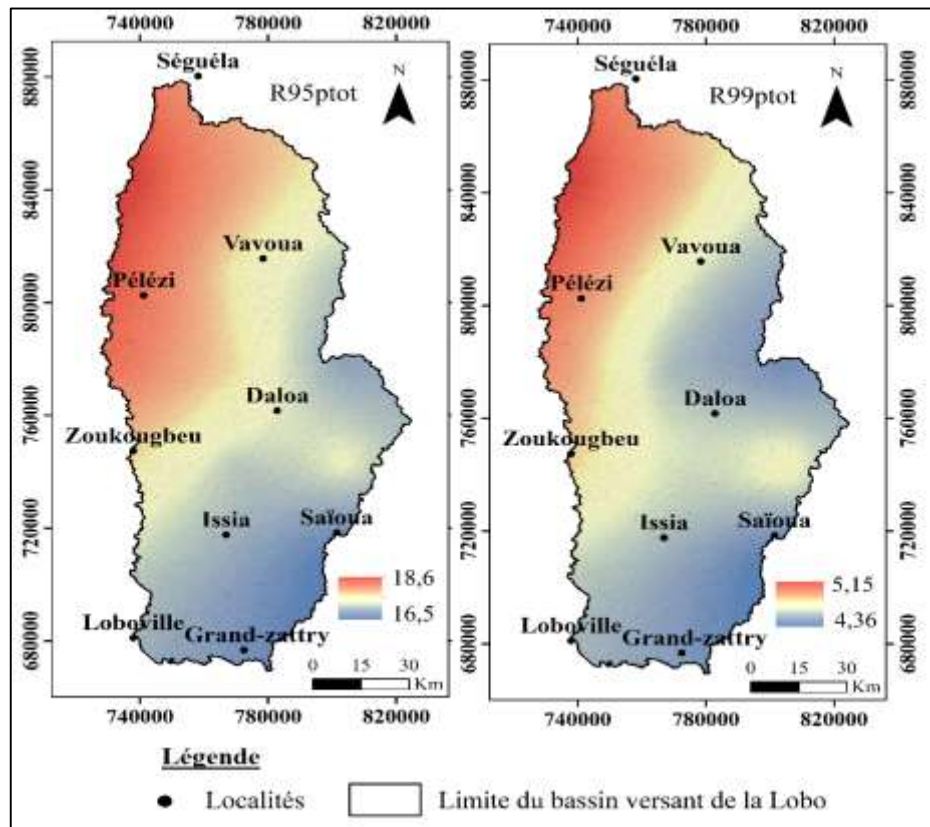


Figure 13 : Répartition spatiale des indices de fréquence dans le bassin versant de la rivière Lobo de 2021 à 2050

4. Discussion

4-1. Validation des données MCG

L'évolution passée (1990 à 2019) et future (2021 à 2050) des intensités et fréquences de pluies extrêmes dans le bassin versant de la Lobo s'est basée sur la méthode de calcul des indices climatiques à partir des données CHIRPS (journalières de précipitations et températures) sur la période de 1981 à 2019. Le choix de ces données repose sur leur large usage, leur disponibilité, leur pas de temps journalier, leurs points de mesures couvrant toute la zone d'étude, leur très faible présence de lacunes et leur résolution spatiale très fine de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. C'est un ensemble de données qui résulte de la combinaison des données provenant d'observations au sol et les données d'observations par satellite afin de réduire les biais [26]. Des études de comparaison et de validation [27 - 29] menées dans diverses régions ont révélé une meilleure performance de l'ensemble de données du produit CHIRPS en référence aux données des stations. Les données journalières de pluies et températures issues de 4 modèles de MCG sur la période de 2021 à 2050 ont été utilisées pour la projection à l'horizon 2050. Ces données ont été corrigées par la méthode de correction de biais Empirical Quantile Mapping et évaluées par le coefficient de corrélation, RMSE, MAE et PBIAIS. La corrélation des données après la correction de biais est comprise entre -1 et 1. Les valeurs de MAE et RMSE sont plus proches de 1 et le pourcentage de biais très faible inférieur à environ 11,5 %. Les données ainsi validées ont servi à caractériser les événements pluvieux extrêmes dans le bassin versant de la Lobo.

4-2. Evolution passée des extrêmes pluviométriques

Les indices d'intensité et de fréquence ont été utilisés pour évaluer les changements des extrêmes de précipitations. Ils sont importants pour un certain nombre d'impacts potentiels, notamment les inondations, l'érosion des sols, les ressources en eau, l'agriculture et les écosystèmes en général. L'analyse des tendances linéaires montre en générale une augmentation des indices d'intensité dans le bassin versant de la rivière Lobo pour la période de 1990 à 2019. La moitié nord du bassin a été marquée par une augmentation de 5,43 mm/an de hauteurs de pluies totales (PRCPTOT) ; de 0,08 mm/an ; 0,58 mm/an ; 0,78 mm/an respectivement des cumuls de précipitations sur 1, 3 et 5 jours (Rx1day, Rx3day et Rx5day). Quant à l'extrême sud du bassin, il a connu une hausse de PRCPTOT avec 7,53 mm/an ; Rx1day de 0,28 mm/an ; Rx3day de 0,13 mm/an et Rx5day de 0,97 mm/an. L'augmentation des intensités de pluies dans cette zone pourrait s'expliquer par l'augmentation de l'effet de serre, due aux activités humaines qui entraînerait le réchauffement des étendues d'eau et de l'atmosphère, près de la surface, donc plus d'évaporation et d'évapotranspiration. L'évaporation et l'évapotranspiration élevées à cause de températures plus fortes chargerait l'air en humidité et augmenteraient l'intensité et la fréquence des pluies. Des études sur les changements historiques des extrêmes de précipitations en Afrique de l'ouest ont également montré une augmentation de 0,0588 mm/an des hauteurs de pluies annuelles en Côte d'Ivoire sur la période de 1981 à 2015 [30]. Des études similaires menées en Afrique ont constaté un retour progressif des précipitations, une augmentation de l'intensité de pluies à partir de 1990 [4]. En outre, la tendance des indices de fréquence dans le bassin est à la hausse avec 0,08 % de R95ptot et 0,024 % de R99ptot dans sa moitié nord. Dans son extrême sud, on observe aussi une augmentation de 0,09 % et de 0,013 % respectivement des indices R95ptot et R99ptot. Les tendances observées en Bosnie Herzégovine ont abouti à la même conclusion avec une augmentation des indices de fréquences notamment R95ptot et R99ptot respectivement de 0,012 % et 0,038 % à la station de Mostar de 1961 à 2015 [31]. L'augmentation des indices d'intensité et de fréquence ont été plus importante dans la partie centrale, sud et ouest du bassin. Cela indique que le centre, le sud et l'ouest du bassin versant de la Lobo sont les zones les plus vulnérables aux catastrophes liées aux inondations, comme les pertes de vies humaines, la destruction des cultures.

4-3. Evolution future des extrêmes pluviométriques

La moyenne des 4 MCG sous le scénario de gaz à effet de serre RCP4.5 simulent une tendance à la hausse des indices d'intensités à l'exception de Rx1day qui connaîtra une tendance à la baisse dans la moitié nord du bassin sur la période de 2021 à 2050. En effet, l'indice PRCPTOT aura une tendance à la hausse de 3,12 mm/an dans la moitié nord et de 2,97 mm/an dans l'extrême sud du bassin. Ces résultats sont similaires aux résultats des travaux antérieurs dans la région d'Asasa en Ethiopie, qui ont montré à l'aide du scénario RCP4.5 de 17 modèles de MCG une augmentation de 2,016 mm/an de précipitations totales annuelles d'ici 2050 [32]. Quant aux indices Rx1day, Rx3day et Rx5day, ils connaîtront respectivement dans le bassin de la Lobo une tendance à la baisse de 0,073 mm/an et une tendance à la hausse de 0,23 mm/an et 0,42 mm/an dans la moitié nord du bassin. Cependant, ces indices augmenteront tous de 0,012 mm/an ; 0,28 mm/an et 0,29 mm/an dans l'extrême sud du bassin. Ces indices d'intensités augmenteraient aussi globalement en Chine à l'avenir [33]. Les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 prévoient aussi une augmentation de Rx1day dans le nord-ouest de la Chine et une diminution de Rx5day dans la plupart des régions de la Chine sauf à l'ouest de la Chine [34]. Par ailleurs, les indices de fréquences seront tous à la hausse dans la moitié nord avec 0,17 % de R95ptot et 0,06 % de R99ptot. L'extrême sud du bassin connaîtra aussi une augmentation de 0,16 % de R95ptot et de 0,07 % de R99ptot. Ces tendances à la hausse des indices d'intensité et de fréquence plus remarquables dans le centre, l'ouest et le nord-ouest du bassin entraîneraient dans ces zones du bassin, des risques liés aux précipitations, comme les inondations qui entraîneraient la dégradation des sols et pourraient avoir des impacts possibles sur l'environnement et le rendement des cultures.

5. Conclusion

Ce travail a permis d'analyser l'évolution passée et future des intensités et fréquences de précipitations dans le bassin versant de la rivière Lobo. Six indices climatiques basés sur les intensités et fréquences de pluies ont été calculés de 1990 à 2019 et de 2021 à 2050 à l'aide de climPACT2. Les résultats ont montré une augmentation des intensités et fréquences de pluies avec des quantités et fréquences de pluies remarquables observées au sud, au centre et à l'ouest du bassin. Par ailleurs, le scénario RCP4.5 prévoit aussi une hausse d'intensités et de fréquences de pluies. Les plus importantes intensités de pluies auront lieu au sud et à l'ouest, par contre les plus fortes fréquences de précipitations seront enregistrées au nord-ouest. Ce travail suggère que les parties ouest et sud du bassin de la rivière Lobo seront confrontées à plus de risques d'inondation et d'érosion du sol dans l'avenir, qui pourraient impacter négativement l'ensemble de l'agriculture et la sécurité alimentaire.

Références

- [1] - D. SOTO and T. BAHRI, Building resilience for adaptation to climate change in the agriculture sector. *Proceedings of a Joint FAO/OECD workshop, food and agriculture organization*, (2012) 355 p.
- [2] - IPCC, Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation : Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, (2012), Disponible en ligne sur www.ipcc.ch
- [3] - S. WANG, Y.-J. ZHAN, G.-Y. REN, A. B. SHRESTHA, R. RAJBHANDARI, Y.-Y. REN, J. SANJAY, Y. XU, X.-B SUN and Q.-L. YOU, Changes in Extreme Precipitation Events over the Hindu Kush Himalayan Region during 1961-2012, *Advances in Climate Change Research*, 8(3) (2017) 166 - 175
- [4] - G. PANTHOU, T. LEBEL, T. VISCHÉL, G. QUANTIN, Y. SANE, A. BA, O. NDIAYE, A. DIONGUE-NIANG and M. DIOPKANE, Rainfall intensification in tropical semi-arid regions: the Sahelian case, *Environmental Research Letters*, Volume 13, N°6, (2018) 10 p
- [5] - P. N. KABORE, A. OUEDRAOGO, L. SOME et J. MILLOGO-RASOLODIMBY, Les facteurs déterminants de la production de céréales sèches en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 11, 1 (2015) 214 - 230
- [6] - P. N. KABORE, A. OUEDRAOGO, M. SANON, P. YAKA et L. SOME, Caractérisation de la variabilité climatique dans la région du centre-nord du Burkina Faso entre 1961 et 2015, *Climatologie*, volume 14 (2017) 82 - 95
- [7] - R. BALLIET, M. B. SALEY, M. SOROKOBY, V. H. N'GUESSAN BI, A. N'DRI, K. B. DJE, J. BIEMI, Evolution des extrêmes pluviométriques dans la région du Goh (centre-ouest de la Côte d'Ivoire). *European scientific journal*, volume 12, (2016) 14 p.
- [8] - K. N. D. ATCHEREMI, J. P. R. JOURDA, M. B. SALEY, K. J. KOUAME, R. BALLIET, Etude de l'évolution des extrêmes pluviométriques et de température dans le bassin versant de rivière Davo (sud-ouest de la Côte d'Ivoire) à partir de certains indices du logiciel Rclimdex. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°36, (2018) 99 - 117
- [9] - Y. M. KOUAME, G. E. SORO, K. E. KOUAKOU, Z. A. KOUADIO, N. E. H. MELEDJE, T. A GOULA BI, S. ISSIAKA, Scénarios des changements climatiques pour les précipitations et les températures en Afrique subsaharienne tropicale humide : Cas du bassin versant de Davo, Côte d'Ivoire, *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°18 (2013) 197 - 213
- [10] - K. E. KOUAKOU, Z. A. KOUADIO, F. W. KOUASSI, T. A GOULA BI, I. SAVANE, Modélisation de la température et de la pluviométrie dans un contexte de changement climatique : cas de l'Afrique de l'Ouest. *Afrique Sciences*. 10(1), (2014) 145 - 160

- [11] - A. DIEDHIOU, A. BICHET, R. WARTENBURGER, S. I. SENEVIRATNE, D.P. ROWELL, S. B. MOUHAMADOU, I. DIALLO, S. TODZO, N. E. TOURÉ, M. CAMARA, et al. Changements des extrêmes climatiques sur l'Afrique de l'Ouest et du Centre à un réchauffement global de 1,5 °C et 2 °C. *Environmental Research Letters*, 13, (2018) 1 - 11
- [12] - K. H. Cuisinier, E. K. Vizy, Impact du changement climatique sur les saisons de croissance du milieu du XXI^e siècle en Afrique. *Climate Dynamic*, 39, (2012) 2937 - 2955
- [13] - ZHANG, Y. and LIANG, C. Analysis of Annual and Seasonal Precipitation Variation in the Qinba Mountain area, China. *Scientific Reports*, 10, 961 (2020) 13 p
- [14] - UNDRR, Profil de risque catastrophe d'inondations et sécheresse - République de Côte d'Ivoire, (2019) 150 p
- [15] - I. DIBA, M. CAMARA, A. B. SARR, J. BASSE, H. N. SABALY et A. DIEDHIOU, Caractérisation des extrêmes composés de précipitation et de température au Sénégal : climat présent et future *Afrique SCIENCE*, 18(1), (2021) 242 - 259
- [16] - A. B. YAO, 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) 186 p
- [17] - K. B. KIM, M. BRAY and D. HAN, An improved bias correction scheme based on comparative precipitation characteristics, *Hydrological Processes*, 29(9), (2015) 2258 - 2266
- [18] - Y. SARVINA, T. PLUNTKE and C. BERNHOFER, Comparing bias correction methods to improve modelles *Journal meteorologi dan geofisika*. Volume 19, n°2, (2018) 103 - 110
- [19] - W. CHAOWIWAT, K. SARINNAKORN, S. WEESAKUL, Future changes in extreme rainfall over Thailand using multi-bias corrected GCM rainfall data, *Journal of Climate Change Science*, n° 9, (2019) 25 p.
- [20] - T. POPOV, S. GNJATO, G. TRBIC, M. IVANISEVIC, Analysis of extreme precipitation indices in the East Herzegovina (Bosnia and Herzegovina). *Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic SASA*, volume 69 (1), (2019) 1 - 16
- [21] - V. H. N'GUESSAN BI, T. T. ADJAKPA, F. B. ALLECHY, M. YOUAN TA, A. F. YAPI K. AFFIAN, Variabilité et prévision des extrêmes climatiques dans le bassin de la Lobo (Centre-Ouest de la Côte D'Ivoire) : Apport des Chaînes de Markov et du générateur de temps MulGETS, *International Journal of Engineering Science Invention*, Juin 2020, vol. 9, (2020) 44 - 54
- [22] - A. F. YAPI, M. S. OGA, V. H. N'GUESSAN BI, J. G. KPAN, F. B. ALLECHY, J. BIEMI, 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), (2020) 71 - 91
- [23] - C. J. MARTINEZ, J. J. MALESKI, M. F. MILLER, Trends in precipitation and temperature in Florida, USA, *Journal of hydrology*, Vol. 452- 453, (2012) 259 - 281
- [24] - P. SHI, X. MA, X. CHEN, S. QU, Z. ZHANG, Analysis of variation trends in precipitation in an upstream catchment of Huai river, *Mathematical Problems in Engineering*, Volume (2013), Article ID 929383, 11 p
- [25] - R. T. COOPER, Projection des futurs extrêmes de précipitations dans la région métropolitaine de Bangkok, *Heliyon* 5 (5), article e01678 (2019) 19 p
- [26] - C. TOTE, D. PATRICIO, H. BOOGAARD, R. VAN DER WIJNGAART and E. TARNAVSKY, C. FUNCK, Evaluation of satellite rainfall estimates for drought and flood monitoring in Mozambique. *Remote Sensing*. Volume 7, N°2, (2015) 1758 - 1776
- [27] - T. POMÉON, D. JACKISCH and B. DIEKKRÜGER, Evaluating the performance of remotely sensed and reanalysed precipitation data over West Africa using HBV light. *Journal of Hydrology*, 547, (2017) 222 - 235
- [28] - S. M. NOGUEIRA, M. A MOREIRO, M. M. VOLPATO, Evaluating precipitation estimates from Eta, TRMM and CHIRPS data in the South-Southeast Region of Minas Gerais State-Brazil. *Remote Sensing*. 10(2) 313, (2018) 16 p.

- [29] - C. D. GELETA and T. A. DERESSA, Evaluation of Climate Hazards Group InfraRed Precipitation Station (CHIRPS) satellite-based rainfall estimates over Finchaa and Neshe Watersheds, Ethiopia. *Engineering Reports*. (2020) 16 p.
- [30] - S. R. M. DIDI, M. LY, K. KOUADIO, A. BICHET, A. DIEDHIOU, H. S. J COULIBALY, K. C. A. KOUADIO, T. J. H. COULIBALY, S. OBAHOUNDE and I. SAVANÉ, Using the CHIRPS dataset to investigate historical changes in precipitation extremes in West Africa, *Climate*, 8, 84, (2020) 28 p.
- [31] - T. POPOV, S. GNJATO, G. TRBIĆ, M. IVANIŠEVIĆ, Trends in extreme daily precipitation indices in Bosnia and Herzegovina. *Collection of Papers - Faculty of Geography at the University of Belgrade*. 65 (1), (2017) 20 p
- [32] - A. T. GARI, M. GETNET, L. NIGATU, Observed and Future Climate Variability, Trend and Extremes in Central Highlands of Ethiopia : A Case Study at Arsi Robe, Asasa, Debre Zeit and Kulumsa Areas. *Environment Pollution and Climate Change*, 2, 163. (2018) 10 p.
- [33] - Z. YUAN , Z. YANG, D. YAN, J. YIN, Historical changes and future projection of extreme precipitation in China. *Theor. Appl. Climatology*, (2015) 1 - 15
- [34] - L. LI, N. YAO, D. L. LIU, S. SONG, H. LIN, X. CHEN, Y. LI, Historical and future projected frequency of extreme precipitation indicators using the optimized cumulative distribution functions in China, *Journal of Hydrology*, 579, 124170, (2019) 12 p