International Journal of Innovation and Applied Studies
ISSN 2028-9324 Vol. 44 No. 3 Jan. 2025, pp. 732-748
© 2025 Innovative Space of Scientific Research Journals
http://www.ijias.issr-journals.org/

Analyse des tendances des pluies extrêmes dans le département du Mono, République du Bénin (Afrique de l'Ouest)

[Analysis of trends in extreme rainfall in the department of Mono, Republic of Benin (West Africa)]

Modestine Victoire Bessan[1], Expédit Wilfrid Vissin[1], Katchele Faustin Ogou[2], and Euloge Ogouwale[1]

[1]Laboratoire Pierre Pagney Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, 03 BP 1122, Jéricho, Benin

[2]Laboratory of Atmospheric Physics, Department of Physics, Faculty of Science and Technology, University of Abomey-Calavi, Godomey, Benin

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the ***Creative Commons Attribution License***, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The study of extreme rainfall events is of paramount importance for socio-economic management and safeguarding. Road infrastructure, population, agricultural activities are among the sectors most affected by these events. To take the measures to reduce the impacts of these events, this work aims to characterize extreme rainfall in the Mono department over the period from 1960 to 2022. Daily rainfall data for the above-mentioned period interval are used. The methods used are: linear regression, generalized extreme values and the return period based on the Gumel formula and the standardized rainfall index. Trends in maximum daily rainfall were also explored for rainfall amounts ≥ 10 mm and 20 mm, 95th, 99th and 99.5th percentiles. In general, a positive trend of the extremes events is observed at the district of Grand-Popo (0,207 mm/year) while in Athieme (-0,216 mm/year) and Bopa (-0,114 mm/year), a decrease in these extremes events is evident, but with a slight increase over the department. The return periods between 2 and 5 years have experienced rainfall amounts varying between 80 and 125 mm throughout the department. These results are useful for water resources management and consequently those of agricultural activities as well as climate change adaptation and resilience.

KEYWORDS: climate change, extremes rainfall, standardized precipitation index.

RESUME: L'étude des évènements extrêmes de pluie revêt d'une importance capitale pour la gestion et la sauvegarde socio-économiques. Les infrastructures routières, la population, les activités agricoles font partie des secteurs les plus touchés par ces évènements. Pour pouvoir prendre des dispositions afin de réduire les impacts de ces évènements, ce travail se veut de caractériser les pluies extrêmes dans le département du Mono sur la période de 1960 à 2022. Les données journalières de pluie pour l'intervalle de période ci-mentionnée sont utilisées. Les méthodes employées sont: la régression linéaire, les valeurs extrêmes générales et la période se basant la formule de Gumel et l'indice standardise de pluie. Les tendances de pluie maximum journalière, des quantités de pluie ≥ 10 mm et 20 mm, des $95^{e,}$ 99^{e} et $99,5^{e}$ percentiles ont été également explorées. En général, une tendance des plus extrêmes sont observées au niveau de Grand-Popo (0,207 mm/an) pendant qu'au niveau de Athieme (-0,216 mm/an) et Bopa (-0,114 mm/an), une diminution de ces extrêmes est évidente mais une légère augmentation au niveau départemental. Les périodes de retour comprises entre 2 à 5 ans ont connu des quantités de pluie variant entre 80 à 125 mm sur tout le département. Ces résultats sont utiles pour la gestion des ressources en eau et par conséquent celles activités agricoles.

MOTS-CLEFS: changement climatique, pluies extrêmes, indice standardisé de pluie.

Corresponding Author: Katchele Faustin Ogou

1 INTRODUCTION

L'ensemble du globe connait de bouleversements sur plusieurs plans dont l'un d'eux le plus vécu par la planète terre est l'environnement. Ainsi, les évènements extrêmes causent d'énormes dégâts tant au niveau global [1], région par exemple en Afrique de l'Ouest [2,3] et pays [4,5]. Ces évènements hasardeux sont souvent causés par le changement et ou la variabilité climatique. Une étude antérieure a montré que l'impact socio-économique des extrêmes est important [6]. Les régions tropicales et en particulier celles du golfe de Guinée subissent les évènements hydro climatiques extrêmes à l'instar des précipitations violentes, les inondations et les sècheresses et ont des conséquences néfastes sur vie humaine ainsi que sur les activités socio-économiques [7]. Des études ont caractérisé les évènements extrêmes au Benin [4,8] avec un fort lien entre les transports de l'humidité des océans vers la terre et les évènements extrêmes [8].

Afin de réduire les désastres dus à ces variations climatiques, il est nécessaire d'en avoir une compréhension profonde qui permettra d'adopter de stratégies de résilience, de préparation pour s'y accommoder. Les mécanismes lies à ces évènements sont diverses et inclus plusieurs paramètres climatiques tels que la température, la précipitation, les vents, etc. La précipitation étant l'une des plus importants paramètres dans l'occurrence des évènements hasardeux, notre étude est focalisée sur cette variable pour analyser les tendances des évènements extrêmes dans le département du Mono.

L'objectif spécifique de cette étude est de caractériser les événements extrêmes pluviométriques dans le département du Mono. L'originalité de cette étude réside dans sa version plus récente d'une part et d'autre part, la première à se focaliser sur le département. En effet, plusieurs études sont focalisées sur le bassin Mono [9–11] qui ont inclus une partie du Togo dont les résultats sont bénéfiques surtout aux riverains de la vallée. La commune de Bopa a enregistré d'inondations dans ses sept (07) communes et près de 150km d'infrastructures routières dégradées [12]. La période d'étude couvre l'intervalle 1960 à 2022 avec les données de stations du département. Les Techniques utilisées dans cette analyse sont: le calcul des percentiles, et la régression linéaire et le calcul des périodes de retour des extrêmes pluviométriques.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 DONNÉES ET ZONE D'ÉTUDE

Le département du Mono est localisé au Sud-Ouest du Bénin entre 6°15' et 7° N 45' de latitude d'une part, et entre 1°35' et 2°E13' de longitude d'autre part (figure 1). Il est limité au Nord par les départements du Couffo, au Sud par l'océan Atlantique, à l'Ouest par la république du Togo et à l'Est, par le département de l'Atlantique. Le département se retrouve globalement dans la région du golfe de Guinée et ses parties hautes et moyennes sont en grande partie sur le territoire togolais [13]. La zone d'étude couvre les communes de Lokossa, Athiémé, Grand-Popo, Houéyogbé, Comè et Bopa comme le montre la figure 1 ci-dessous.

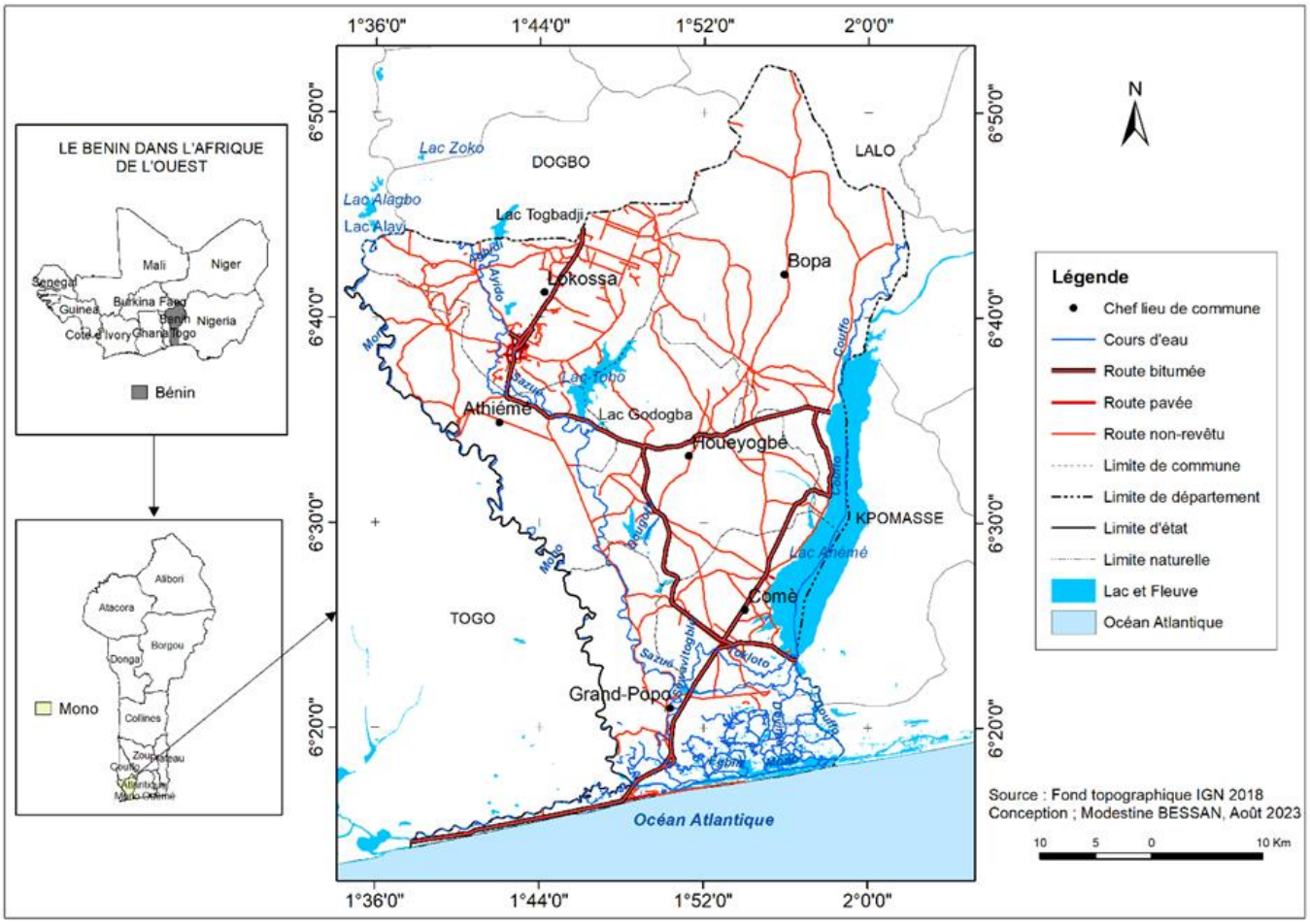


Fig. 1. Carte de localisation du département du Mono

Les données utilisées dans cette étude sont obtenues de l'Agence nationale de la Météorologie du Benin. Au nombre des stations disponibles, seulement quelques-unes remplissent les conditions de données manquantes ayant une portion moins de 10% ont été retenues pour les études ultérieures. Il s'agit de pluviométrie des stations de Bopa, Grand-Popo et Athiémé couvrant la période de 1960 à 2022.

2.2 DONNÉES

Elles constituent des données pluviométriques obtenues à l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA) sis à Cotonou et à Météo-Bénin.

Des séries pluviométriques journalières de 1960 à 2022 provenant de dix (10) stations situées dans le département du Mono et dans son environnement immédiat (Aplahoué, Athiémé, Bopa, Lonkly, Dogbo, Grand-Popo, Bohicon, Cotonou, Abomey et Ouidah) sont obtenues. Dans le but d'assurer une bonne couverture spatiale en termes de champ de pluie, des données de neuf (9) autres stations pluviométriques environnantes (Agouna, Allada, Lomé-Ville, Tchetti, Toffo, Atapkamè, Tabligbo, Lokossa et Niaouli) ont été complétées pour le remplissage des données manquantes avec les stations les plus proches.

2.3 MÉTHODOLOGIE

2.3.1 INDICES ET ANALYSE DE LA TENDANCE DES EXTRÊMES PLUVIOMÉTRIQUES

Plusieurs indices d'analyse de l'évolution des évènements extrêmes existent: la lame d'eau moyenne précipitée par jour humide (Simple day intensity index, SDII), le nombre total de jours caractérisés par des précipitations ≥ 10 mm et ≥ 20 mm (P10 et P20), etc., [14,15]. Dans la présente thèse, six (6) indices pluviométriques ont été déterminés et ont permis d'explorer la

série chronologique journalière des pluies dans le département du Mono et d'y analyser la dynamique des évènements extrêmes. Il s'agit du total pluviométrique, du nombre total de jours humides (avec des pluies journalières ≥1 mm), de la pluviométrie maximale enregistrée en 1 jour (Px1J) et de trois autres indices basés sur les 95e, 99e et 99,5e percentiles. Les tendances linéaires sont évaluées en utilisant le model commun suivant:

$$Y_i = \alpha X_i + \beta \quad (1)$$

Où α et β désignent respectivement le coefficient de régression et la constante. Pour $\alpha < 0$ indique une tendance à la baisse alors que $\alpha > 0$ indique une tendance à la hausse de la droite de régression tandis que $\alpha = 0$ représente un état statique de celle-ci.

2.3.2 Analyse Des Périodes De Retour Des Extrêmes Pluviométriques

Un modèle d'analyse tout à fait approprié pour résoudre un éventail de problèmes liés aux extrêmes climatiques [16] et, fondé sur les lois de probabilité est employé. Il offre un cadre mathématique très rigoureux pour l'estimation des valeurs rares à extrêmes d'un aléa naturel [17]. Il comprend la loi généralisée des extrêmes, Generalized Extreme Value (GEV) distribution [18] et la loi de Pareto généralisée, Generalized Pareto (GP) distribution [19]. Ces deux lois permettent respectivement de caractériser le comportement en loi de maxima annuels et de dépassements de seuils élevés. Spécifiquement, l'estimation des périodes de retour des évènements extrêmes du département du Mono s'est basée sur la distribution Générale des Valeurs Extrêmes (GEV) et de son cas particulier, la distribution de Gumbel.

- **Présentation des distributions GEV et Gumbel**

La fonction de répartition de la loi générale des valeurs extrêmes (GEV) est donnée par l'expression suivant:

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1 + k\left(\frac{x-a}{b}\right)\right]^{-1/k}\right\} \quad (2)$$

Où *k* est un paramètre de courbure et imposé non nul; et où, a et b sont respectivement les paramètres de localisation (position) et d'échelle; x est la variable (les hauteurs de pluie).

Lorsque le paramètre *k* devient nul, la distribution GEV se réduit à la distribution de Gumbel [20]. La loi de Gumbel s'exprime alors par la formule suivante:

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right] \quad (3)$$

Où a est le paramètre de position, b le paramètre d'échelle, x la variable (hauteurs de pluie).

Il a été utilisé ici la distribution de Gumbel parce qu'elle est décrite par deux paramètres alors que celle de GEV nécessite trois paramètres, d'où Gumbel présente une expression mathématique plus simple. Cette hypothèse a de plus, été déjà préalablement testée et validée au moyen de différents tests statistiques [21].

- **Identification de la période de retour**

Les valeurs extrêmes de pluie s'obtiennent en inversant la fonction de répartition correspondant à la loi de probabilité sous-jacente aux valeurs maximales annuelles. Le quantile x_q ayant une période de retour T est défini par la grandeur x vérifiant l'expression:

$$F(x_q) = 1 - \frac{1}{T} \quad (4)$$

La fréquence d'un événement pluvieux x caractérisé par la quantité de pluie tombée, mesure la rareté de cet événement exprimée par un paramètre dénommé la période de retour T qui est l'inverse de sa probabilité de dépassement annuelle d'après la formule [22]:

$$PR = \frac{1}{1-F(x_i)} \quad (5)$$

Avec F (x_i) = la probabilité de non-dépassement qu'il convient d'attribuer à chaque valeur x_i.

- **Qualification des événements pluvieux extrêmes**

Une fois, les périodes de retour (Q) identifiées, elles ont permis de qualifier les évènements extrêmes. Ainsi, selon la classification internationale des événements extrêmes [23], un évènement pluvieux est qualifié de: normal si le Q < 6 ans; d'anormal si le Q = 6 ans; très anormal si le Q = 10 ans; d'exceptionnel si le Q = 30 ans; très exceptionnel si le Q = 100 ans. Il convient de noter que le logiciel Hydrologic Engineering Center Statistical Software Package (HEC-SSP) a été utilisé pour cette analyse (période de retour).

3 RÉSULTATS

3.1 TENDANCE DE LA PLUVIOMÉTRIE MAXIMALE ENREGISTRÉE EN UN JOUR (PX1J)

La figure 2 ci-dessous présente la tendance des hauteurs de pluie maximales enregistrées en un jour au niveau du bassin du Mono. La tendance linéaire des pluies au niveau de ces stations n'est pas significative au seuil de confiance de 5% avec des valeurs de coefficient de régression α = 0,190; α = 0,071 et α = 0,100 respectivement pour les stations d'Athiémé, Bopa et Grand-Popo. Pendant que les stations d'Athiémé et de Bopa montrent une tendance à la baisse, celle de Grand-Popo montre une tendance à la hausse avec un coefficient de régression de -0,216 mm, -0,114 mm et 0,207 mm par an respectivement.

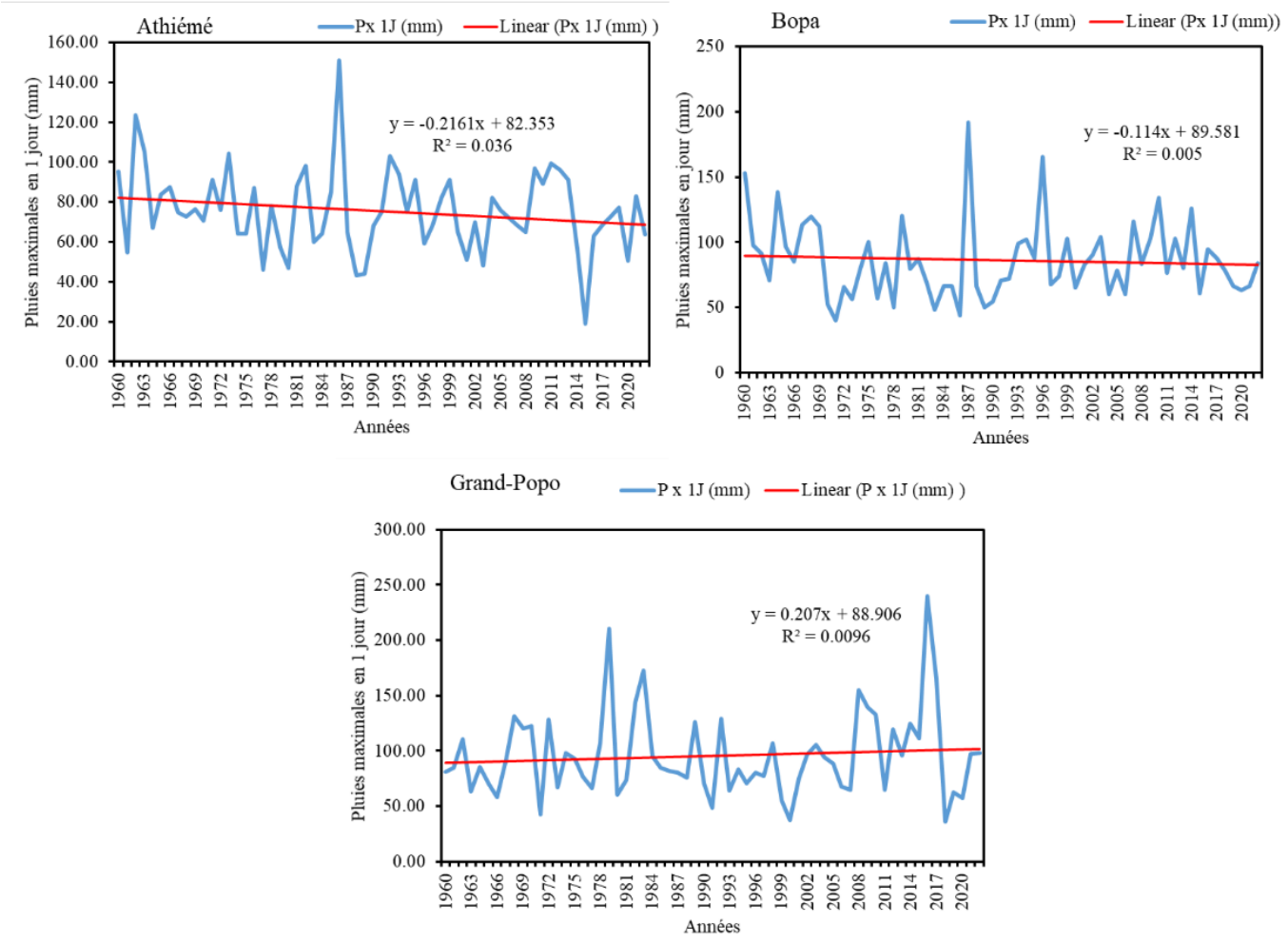


Fig. 2. Tendance des pluies maximales enregistrées en un jour (Px1J) dans le bassin du Mono

De l'analyse de cette figure (figure 2), il ressort que la hauteur de pluie maximale enregistrée en un jour présente une tendance à la baisse au niveau des communes et stations d'Athiémé et Bopa et une tendance à la hausse à Grand-Popo, soit 67% de baisse et 33% de hausse. Soumises au test *t* de Student, aucune de ces deux tendances n'est statistiquement significative au seuil de 95%. Le tableau 1 ci-dessous dresse les valeurs des probabilités *p* du test statistique t de Student.

Tableau 1. Valeurs des probabilités p et des coefficients de régression du Px1J

Indice	Pluviométrie maximale (mm) enregistrée en 1 jour (Px1J)		
Communes/Stations	Athiémé	Bopa	Grand-Popo
Coefficients de régression	-0,216	-0,114	0,207
Probabilités p de test "t" au seuil de confiance de 95%	0,136	0,582	0,444

Les faibles valeurs des coefficients de régression des équations enregistrées dans le tableau 1 indiquent que les tendances observées sont très légères. Ceci est confirmé par les valeurs de "p" qui sont toutes, très supérieures à 0.05 (p>0.05). Ainsi, on constate qu'au bout de 100 ans, la pluie maximale quotidienne baisse de 21.6 mm à Athiémé et de 11.4 mm à Bopa par contre à Grand-Popo, cette pluie maximale en un jour connaît une hausse de 20,7 mm de pluie.

3.2 Indice Totale Pluie Et Tendances

La figure 3 suivante décrit la tendance de totale pluie sur la période qui concerne les trois stations d'étude. Il est évident que la pluie totale a connu une diminution dans les stations de Athiémé et de Bopa pendant que l'on observe une augmentation de la pluie à Grand-Popo. Ces taux de variation sont de -2,925 mm; -1,038 mm et 8,962 mm par an pour lesdites stations respectivement. Toutefois, ces coefficients de régression ne sont pas significatifs au seuil de confiance de 5%.

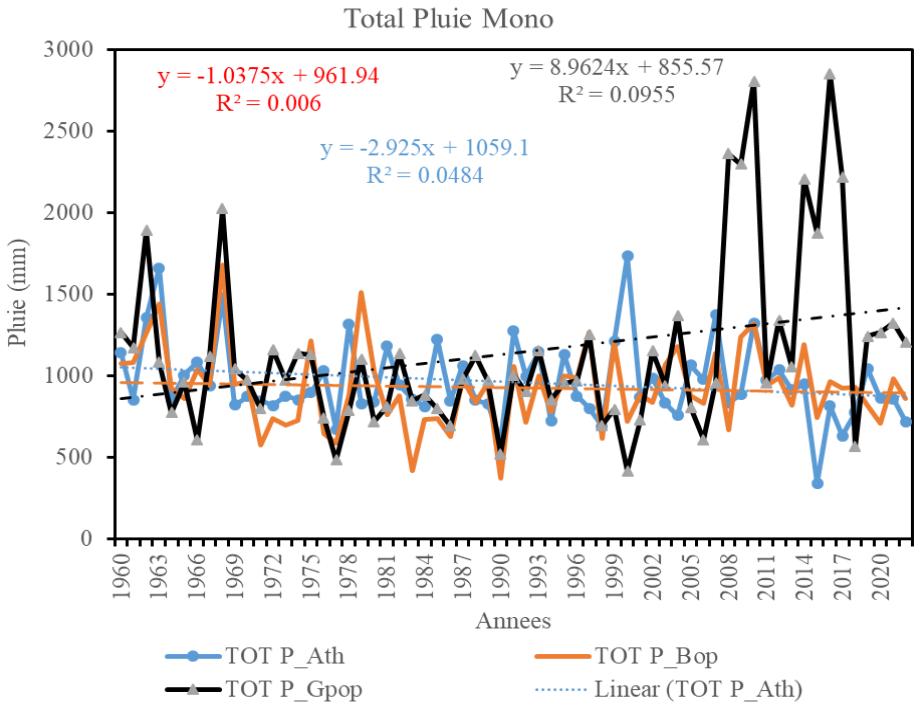


Fig. 3. Evolution de la pluie totale dans les trois stations pluviométriques dans le Mono. TOT P_Ath: précipitation totale Athiémé; TOT P_Gpop: précipitation totale Grand-Popo et TOT P_Bop: précipitation totale Bopa

3.3 Tendances Des Jours De Pluie Supérieurs Ou Égaux À 10 Mm Et 20 Mm Dans Le Mono

La Figure 4 décrit les évolutions du nombre de jours à chaque station dans le Mono sur l'intervalle de temps de 1960 à 2022. Les tendances du nombre de la pluie supérieure ou égale à 10 mm et 20 mm au niveau de chacune des trois stations décroissent. Cela implique le nombre de jours ou ces quantités de pluie sont reçues a diminué sur la période d'étude. La tendance à la baisse est plus importante au niveau de la station de Grand-Popo alors qu'à Bopa, bien qu'elle décroisse également, cette tendance à la baisse reste faible. Il importe de noter que les ratios de change ne sont pas significatifs au seuil de 5% de confiance. Une analyse plus poussée permet de déduire deux périodes importantes.

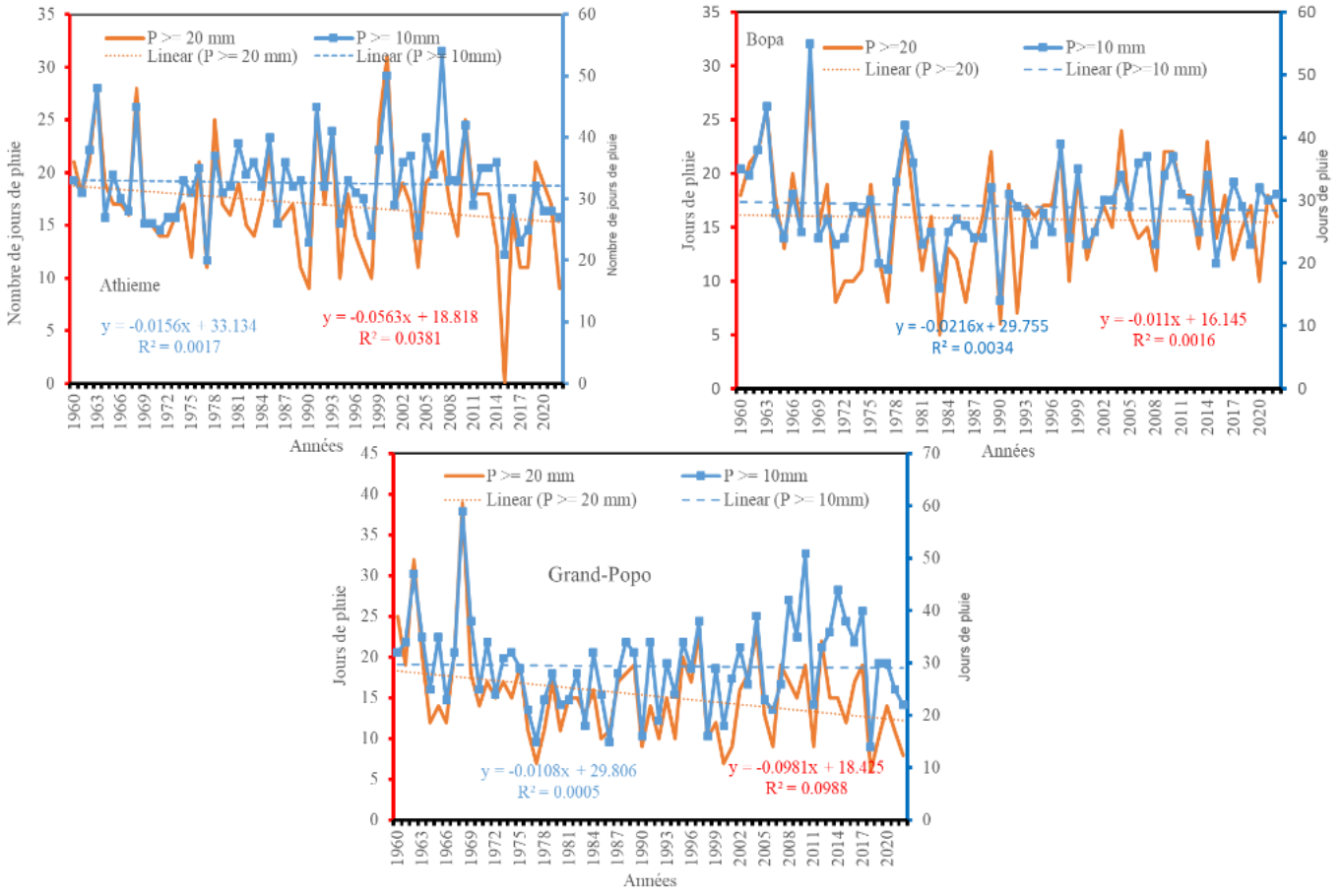


Fig. 4. Indice de Précipitation et leur tendance dans les trois communes du département du Mono entre 1960-2022

3.4 CORRESPONDANCE ENTRE DATES DES PLUIES MAXIMALES (PX1J) ET CELLES DES INONDATIONS

Dans le but voir si les dates des pluies maximales journalières de la série 1960–2022 correspondent aux dates des inondations destructives recensées sur le terrain et dans la documentation (1963, 1995, 1999, 2000, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012); les dates exactes ont été identifiés (jours, mois et années) des pluies maximales pour les trois communes et où il y a les stations étudiées sur la série. Le tableau 4.2 présente les résultats.

Tableau 2. Dates des pluies maximales journalières sur la série 1960–2022

Communes/ Stations	Hauteur de pluies (mm) maximum quotidienne entre 1960 et 2022	Dates
Bopa	192	22/09/1987
Athiémé	151	18/09/1986
Grand-Popo	240	19/06/1979

Source: Données ASECNA/Météo Bénin, 2023. Traitement Bessan, 2023

Ce tableau ne montre qu'aucune des dates de survenue des pluies maximales journalières des communes de Athiémé, Bopa et Grand-Popo de la série 1960-2022 ne correspond pas aux dates des inondations destructives recensées. Les dates d'enregistrement des pluies maximales journalières (22/09/1987; 18/09/1986; 19/06/1979) correspondent plutôt à des années classées et qualifiées de normalement sèches (1986) et normalement humides (1979 et 1987) selon la classification [24] pour l'indice normalisé (In) de précipitation. Ces résultats conduisent à l'émission de plusieurs hypothèses. Cela pourrait signifier que ces pluies maximales auraient engendrer des inondations sans impacts dommageables, donc dans des endroits où les enjeux sont négligeables (ce qui n'aurait pas attiré l'attention des populations ni des médias); soit qu'il y a véritablement eu des inondations destructives mais qui n'ont pas été recensées; soit que les données de pluies sont erronées; soit enfin que la

pluie n'est pas le facteur déterminant qui engendre des inondations dans le bassin. Les pluies maximales journalières pourraient ne pas être responsables des inondations enregistrées dans le bassin.

3.5 TENDANCE DES ÉVÈNEMENTS PLUVIOMÉTRIQUES INTENSES (P95P) SUR LA SÉRIE 1960–2022

La figure 5 présente la tendance du nombre de jours avec des pluies supérieures ou égales au 95^{e} percentile de 1960 à 2022 dans le bassin du Mono. Cette figure 5 indique que les évènements intenses c'est-à-dire le nombre de jour avec des pluies supérieures ou égales au 95ème percentile de la série 1960–2022 présentent une tendance à la hausse au niveau de la commune de Grand-Popo pendant qu'on observe une tendance à la baisse au niveau des communes de Bopa et de Athiémé. Les taux de la variation de tendances de nombre de jours ne sont pas statistiquement significatifs car, la probabilité p du test t de Student est largement supérieur à 0.05 au seuil de 95% au niveau des quatre stations.

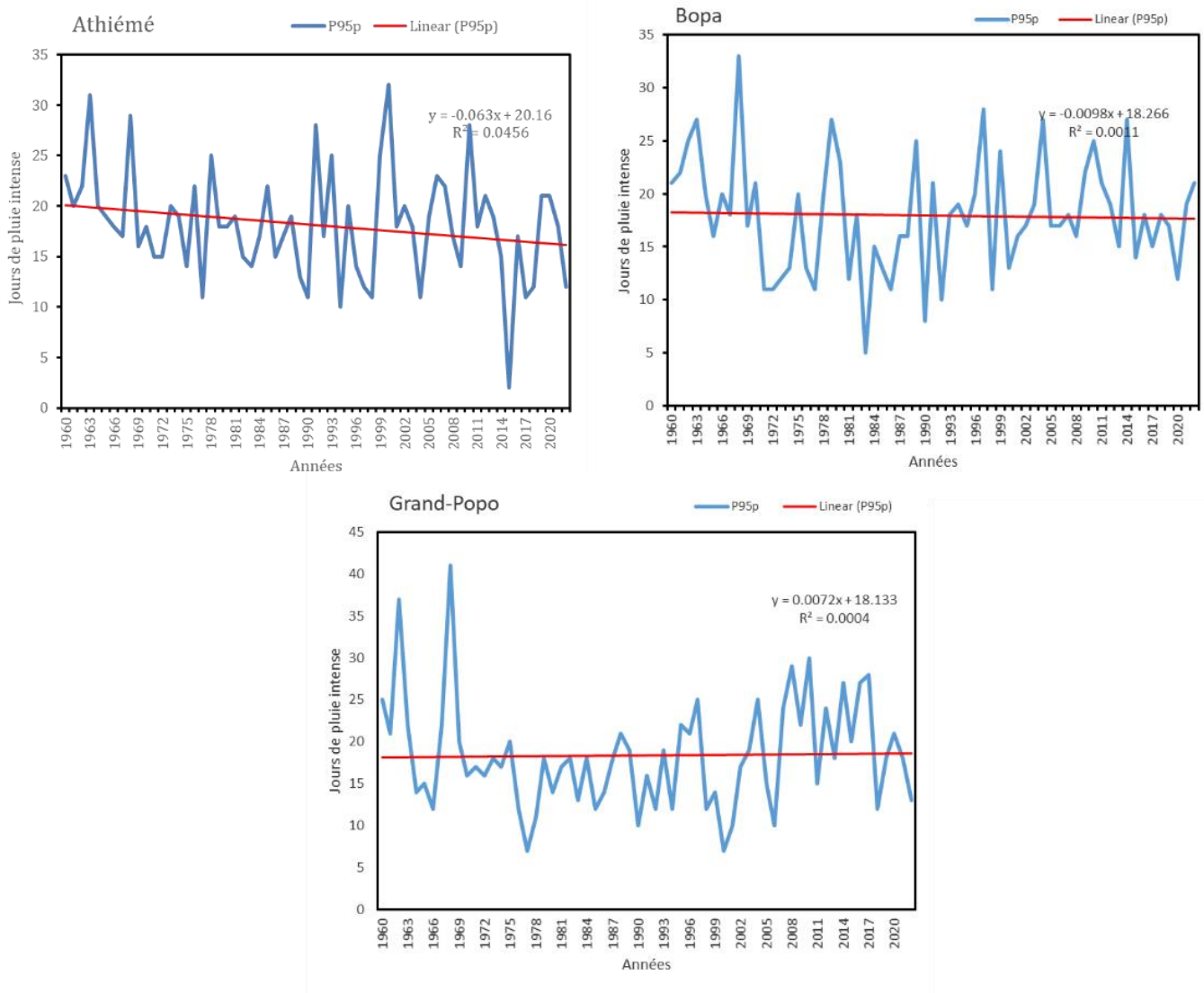


Fig. 5. Tendance du nombre de jours avec des pluies supérieures ou égales au 95e percentile (P95p) de 1960 à 2022

Le tableau 3 présente les résultats de l'analyse de la tendance linéaire dans le département du Mono.

Tableau 3. Valeurs des probabilités p et des coefficients de régression du P95p

Eléments	Pluies intenses (P95p)		
Communes/Stations	Athiémé	Bopa	Grand-Popo
Coefficients de régression	-0.018	-0.009	0,065
Probabilités p de test "t" au seuil de confiance de 95%	0,638	0,767	0,240

Ce tableau montre également que les coefficients de régression sont très faibles, d'où, à Bopa et Athiémé, les pluies intenses ont diminué de 0,9 mm et 1,8 mm sur 100 ans, respectivement. Par contre à Grand-Popo, elles ont augmenté de 6.5 mm sur 100 ans. Ces taux de variation des pluies ne sont donc pas significatifs au seuil de 5% du dégrée de confiance.

Il est également important de préciser que ces évènements pluvieux intenses ont été définis à partir de différents seuils variant d'une commune à l'autre. Le tableau 4 dresse la liste de ces seuils et du nombre de jours de pluies intenses enregistrées par commune sur la série 1960–2022.

Tableau 4. Seuils et nombre total de jours des pluies intenses de 1960–2022

Pluies intenses	Athiémé	Bopa	Grand-Popo
Seuils de définition (mm)	18,50	17,70	20,2
Nombre total de jours	1143	1131	1131

Ce tableau montre que de 1960 à 2022, c'est la commune d'Athiémé qui a connu plus de nombre de jours de pluies intenses le plus élevé à partir d'un seuil de 45.2 mm de pluie, tandis que Grand-Popo a le nombre de jour de pluie intense le plus faible à partir du seuil le plus élevé 61 mm de pluie.

3.6 TENDANCE DES ÉVÈNEMENTS PLUVIOMÉTRIQUES EXTRÊMES (P99P) DE 1960-2022

Les évènements pluviométriques extrêmes correspondent aux pluies supérieures ou égales au 99ème percentile (P99p). L'analyse de la fréquence des évènements pluvieux extrêmes consiste alors à étudier la variation du nombre de jours avec des pluies supérieures ou égales au 99ème percentile (P99p) calculée sur la période 1961-2022. La figure 6 présente la tendance des évènements pluvieux extrêmes de ce percentile. La figure 6 montre que sur la période 1960-2022, une tendance générale à la baisse des jours de pluies extrêmes au niveau des communes de Bopa et Athiémé, tandis qu'à Grand-Popo, la tendance est à la hausse. Cette variation des jours de pluies extrêmes n'est pas statistiquement significative sur la période 1960-2022 car la probabilité p du test t de Student est largement supérieur à 0,05 dans ces communes ou les nombres de jours de pluie extrême a connu une réduction.

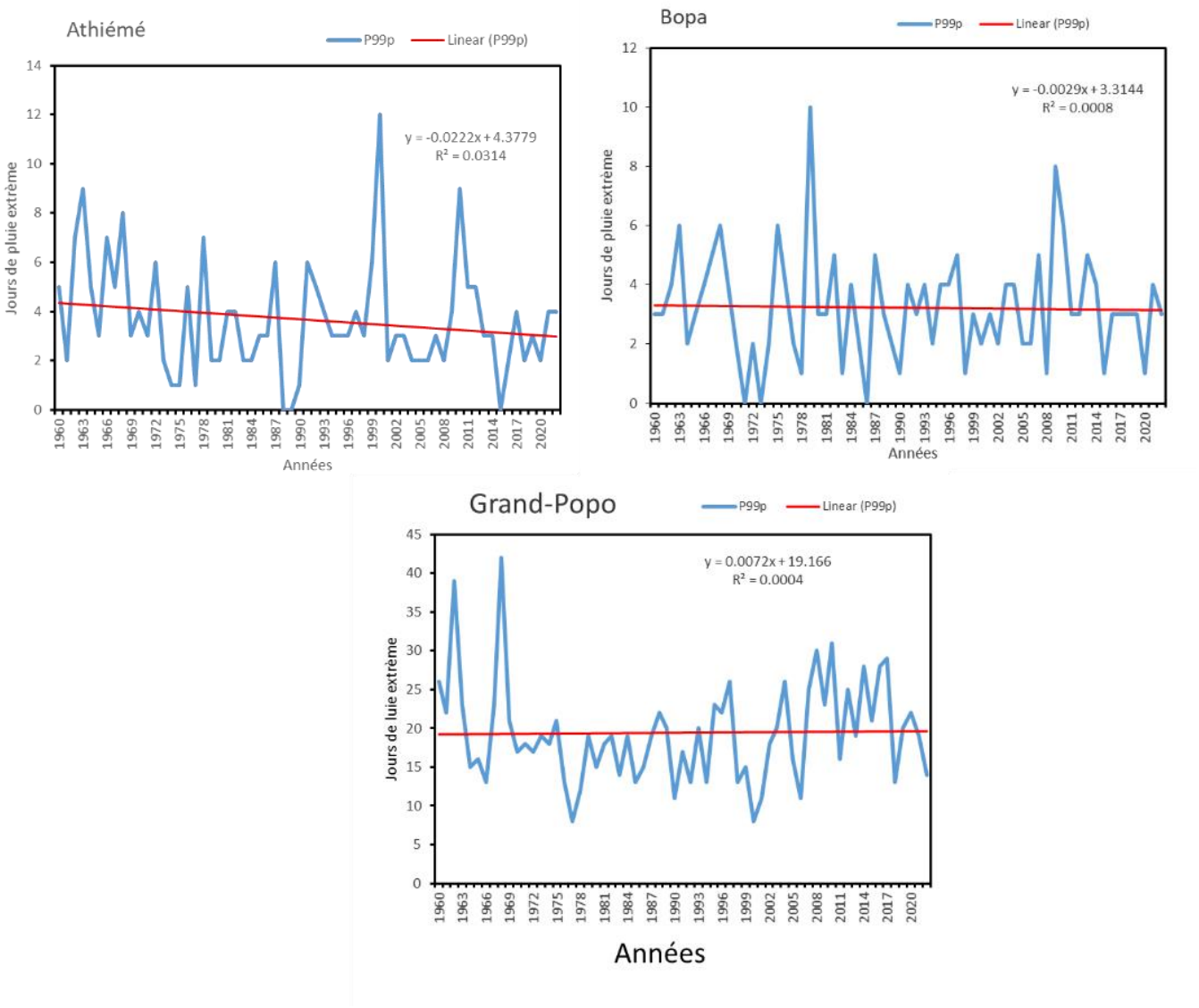


Fig. 6. Tendance du nombre de jour avec des pluies supérieures ou égales au 99ème percentile (P99p) de 1960-2022

La commune de Grand-Popo a connu plutôt une augmentation statistiquement significative de jours de pluies extrêmes. Le tableau 5 présente ces résultats.

Tableau 5. Valeurs des probabilités p et des coefficients de régression du P99p

Indice	Pluies extrêmes (P99p)		
Communes/Stations	Athiémé	Bopa	Grand-Popo
Coefficients de régression	-0,142	-0,003	1,173
Probabilités p de test "t" au seuil de confiance de 95%	0,048	0,677	0,000

Ce tableau indique également que les coefficients de régression sont très faibles et varient d'une station à l'autre. Ainsi, on constate qu'au bout de 100 ans, les pluies extrêmes ont baissé de 14,2 mm à Athiémé et 0,3 mm à Bopa; alors qu'à Grand-Popo, une augmentation de 117,3 mm est observée sur la même période. De plus, les seuils de détermination des pluies extrêmes et le nombre total de jours diffèrent d'une station à l'autre. Le tableau 6 présente ces résultats.

Tableau 6. Seuils et nombre total de jours des pluies extrêmes de 1960–2022

Pluies extrêmes (1960-2022)	Athiémé	Bopa	Grand-Popo
Seuils de définition (mm)	45,00	48,10	52,48
Nombre total de jour	231	203	322

La commune de Grand-Popo enregistre le nombre de jours d'évènements extrêmes le plus élevé (322) avec un seuil de définition plus élevé (52,48 mm de pluie). Par contre, Athiémé enregistre 231 jours de pluies extrêmes à partir 45.00 mm de pluies. Parmi ces années figurent celles classées extrêmement humides (1963), fortement humide (1962), modérément humide (2010), normalement humides (1990, 1995, 2008, 2009) et les années sèches (1986, 1972, 1982, 1992) et celles correspondant à des inondations passées jugées destructives (1963, 1995, 2008, 2009 et 2010).

3.7 Tendance Des Évènements Pluviométriques Très Extrêmes (P99,5p) De 1960-2022

L'analyse de la fréquence des évènements pluvieux quotidiens très extrêmes consiste à étudier la variation du nombre de jours avec des pluies supérieures ou égales au 99.5ème percentile (P99,5p) a été calculée. La figure 7 présente la tendance de ces évènements pluvieux quotidiens très extrêmes sur la période 1960-2022.

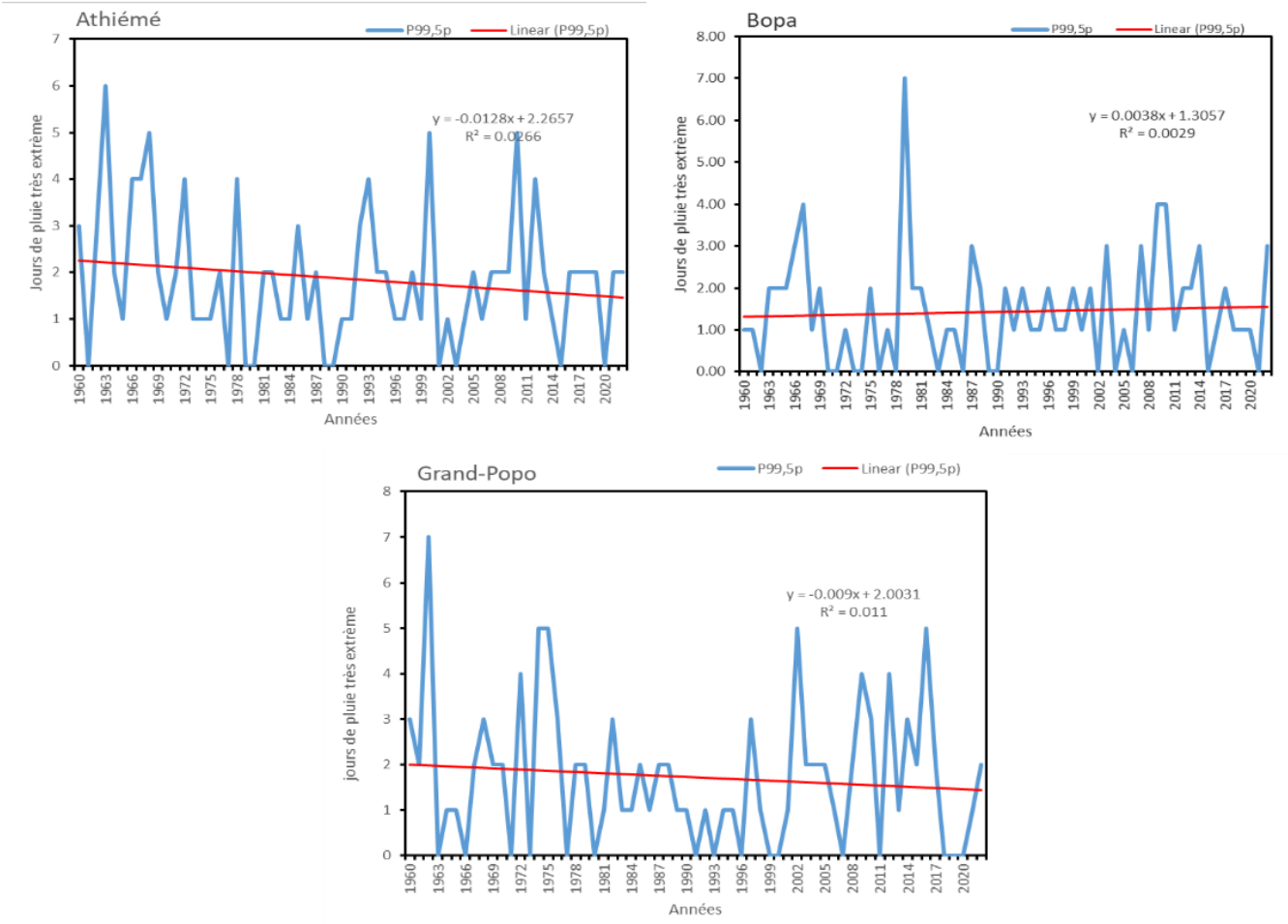


Fig. 7. Tendance du nombre de jour avec des pluies supérieures ou égales au 99,5ème percentile (P99,5p) de 1960-2022

La figure 7 montre une tendance à la baisse des jours de pluies très extrêmes au niveau des stations d'Athiémé et de Grand-Popo et une tendance à la hausse au niveau de Bopa. Ces tendances ne sont pas statistiquement significatives car la probabilité p du test de Student est largement supérieure à 5% de dégrée de confiance. De plus, les valeurs des coefficients de régression sont extrêmement faibles (voir tableau 7), ce qui témoigne de la très faible insignifiance des tendances observées sur la période d'étude.

Tableau 7. Valeurs des probabilités p et des coefficients de régression du P99,5p. Le seuil de confiance est de 95%

Eléments	Pluies très extrêmes (P99.5p)		
Communes/Stations	Athiémé	Bopa	Grand-Popo
Coefficients de régression	-0,013	0,004	2,123
Probabilités p de test "t"	0,358	0,677	0,000

Dans le tableau 7, les coefficients de régression indiquent par exemple que la tendance de la baisse des pluies très extrêmes est de 1.3 mm à Athiémé respectivement, tandis que la hausse est de 0.04 mm et 212 mm à Bopa et Grand-Popo au bout de 100 ans. Les différents seuils de détermination des évènements très extrêmes et le nombre total de jour d'évènements identifiés par station est résumé dans le tableau 8.

Tableau 8. Seuils et nombre total de jours des pluies très extrêmes de 1960–2022

Pluies très extrêmes (1960-2022)	Athiémé	Bopa	Grand-Popo
Seuils de définition (mm)	59,00	61,30	67,50
Nombre total de jour	117	90	108

Ce tableau montre que pour parler d'évènements très extrêmes dans le bassin du Mono, les seuils pluviométriques diffèrent d'une commune/station à l'autres. Ainsi, par exemple à Grand-Popo, il faut au moins 67,50 mm de pluie, alors qu'à Athiémé, il faut 59 mm, et 61,3 mm pour Bopa. Dans le même temps, Athiémé enregistre le nombre de jours de pluies très extrêmes le plus élevé contrairement à Grand-Popo. Ceci pourrait être lié aux facteurs morpho-pédologique et orographique. Quant aux années ayant connu les jours d'évènements pluvieux très extrêmes les plus élevées (≥ 2), on note 1969 pour Bopa, 1963 pour Athiémé et 2008 et 2009 pour Grand-Popo. Parmi, ces années 1963, 2008 et 2009 correspondants aux années d'inondations à grands dommages enregistrés dans le bassin selon les enquêtes de terrain. Par contre, 1969 et 1982 sont classées années sèches sur le bassin pendant la période 1960–2022.

3.8 Estimation De La Récurrence Des Évènements Pluvieux Extrêmes De 1960-2022 Et Leur Classification

La détermination de la période de retour ou récurrence des évènements pluvieux extrêmes dans le bassin du Mono a été réalisée grâce à la distribution de Gumbel appliquée aux données quotidiennes de pluies des différentes stations du bassin. Selon la classification internationale des événements extrêmes proposée par l'Institut Royal de la Météorologie de Belgique [25], les valeurs caractérisant les pluies selon les périodes de retour sont: normales (0-6 ans), anormales (6-10 ans), très anormales (10-30 ans), exceptionnelles (30-100 ans) et très exceptionnelles (>100 ans). Le tableau 9 suivant synthétise les résultats chiffrés et la figure 26 présente les résultats graphiques des stations de Grand-Popo, Athiémé et Bopa communes les plus affectées du bassin par les inondations de 2010.

Tableau 9. Périodes de retour et qualification des évènements par stations/communes

Périodes de retour	Catégorie d'évènements	Hauteurs de pluies maxi journalières (mm)		
		Bopa	Athiémé	Grand-Popo
0-6 ans	Normales	112	94	128
6-10 ans	Anormales	126	104	143
10-30 ans	Très anormales	150	124	179
30-100 ans	Exceptionnels	175	135	209
> 100 ans	Très exceptionnels	210	152	255

La figure suivante permet de déterminer les périodes de retour des précipitations en utilisant les probabilités de dépassement.

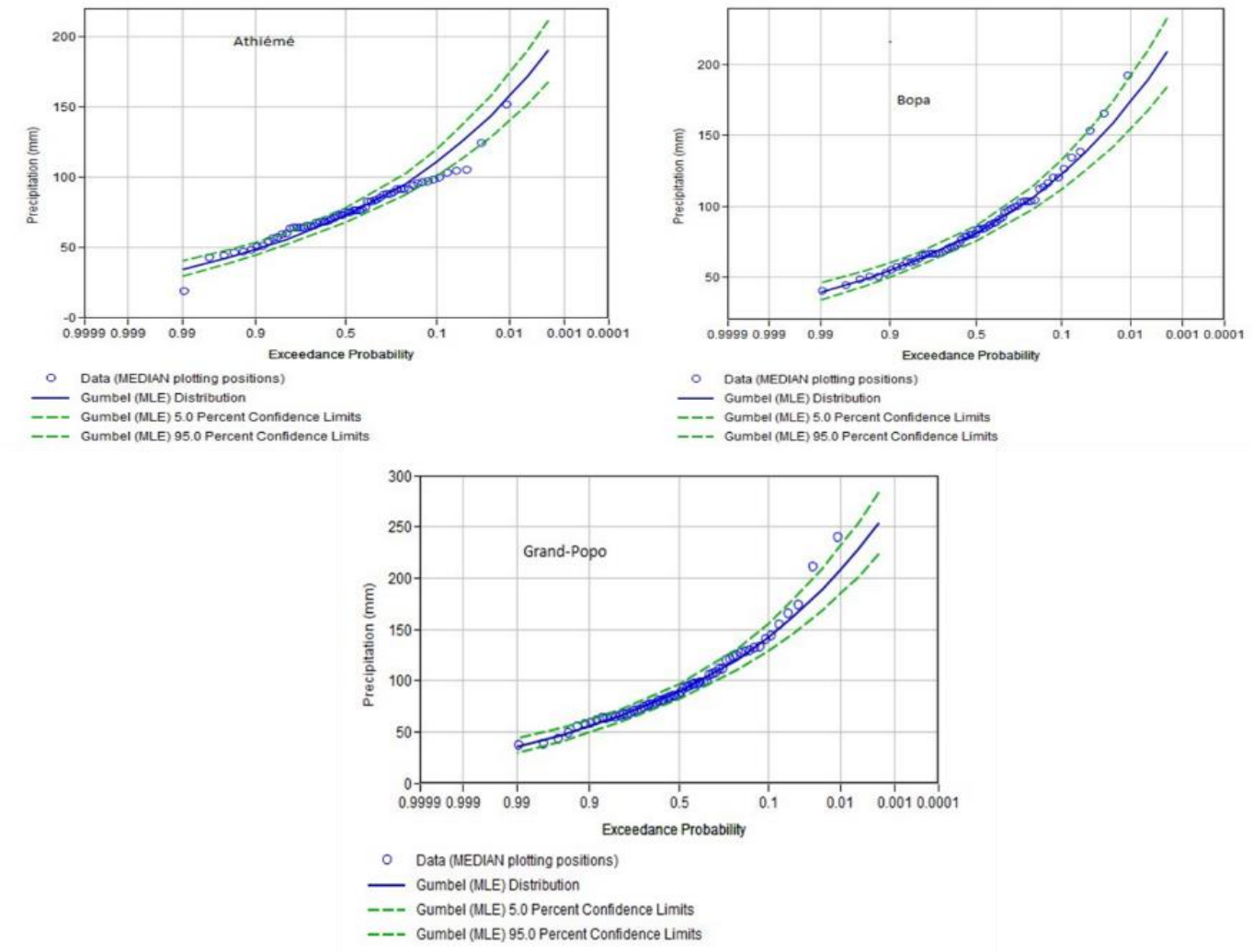


Fig. 8. Périodes de retour des pluies maximales journalières (Px1J) de 1960 à 2022. Notes: Data: données; Median plotting positions: positions médianes d'affichage; Gumbel distribution: Distribution de Gumbel; percent Confidence Limits: limites en pourcentage de confiance (limite inférieure: 5% et supérieure: 95%)

De l'analyse de cette figure et du tableau, il ressort que les périodes de retour varient d'une commune à l'autre en fonction de la hauteur maximale de pluie journalière. Par exemple, dans la commune de Bopa, les pluies de 112 mm ont une période de retour de 6 ans et sont qualifiées de pluies normales alors que la même hauteur de pluie possède une récurrence de plus de 10 ans au niveau des autres stations et est qualifié de pluies anormales. Dans le même temps, une pluie de 151 mm a une période de retour largement supérieure à 100 ans alors qu'une hauteur de pluie analogue (155 mm) revient chaque 30 ans à Bopa. Ceci signifie que la hauteur de pluie pouvant engendrer des inondations diffère d'une commune à l'autre. Ceci est lié aux facteurs morpho-pédologiques et topographiques qui varie en fonction des communes.

3.8.1 Période De Retour Des Pluies Maximales Quotidiennes Par Commune De 1960 À 2022

Les pluies maximales quotidiennes de la série 1960-2022 des trois stations (Bopa, Athiémé et Grand-Popo) du Mono ont été identifié et leurs périodes de retour étudiées. Le tableau 10 présente les résultats.

Tableau 10. Récurrence des pluies maximales quotidiennes de la série 1960–2022

Communes/ Stations	Pluie max. /j (mm)	Période de retour (Q)	Qualification	Dates	Catégorie d'années
Bopa	192	Q > 100ans	Très exceptionnel	22/09/1987	Normalement humides 0≤In≤0,99
Athiémé	151	Q >100 ans	Très exceptionnel	18/09/1986	Normalement sèche 0≤In≤-0,99
Grand-Popo	240	Q≈ 80 ans	Exceptionnel	22/07/2016	Normalement humides 0≤In≤0,99

Ce tableau montre que de 1960 à 2022, il y a eu deux évènements très exceptionnels (192 mm de pluie survenue le 22/09/1987 à Bopa et 151 mm survenue le 18/09 le /1986 à Athiémé) et deux évènements exceptionnels et 240 mm 19/06/1979). Ces deux évènements ont eu lieu en années normalement humides 0 ≤ In ≤ 0,99 (1979 et 1987) et en années normalement sèche 0 ≤ In ≤ -0,99 (1973 et 1986). De plus, aucune de ces années n'a été cité parmi les années d'inondations destructrices recensées dans la documentation (1963; 1995; 1999; 2000; 2004; 2005; 2006; 2007; 2008; 2009; 2010; 2011; 2012). Ceci signifie théoriquement que ces évènements n'ont pas été responsables d'inondations dévastatrices, où qu'elles l'ont été et que peut être les données n'ont pas été collectée, où encore que les données aient été mal collectées. Ce qui est certain, si ces évènements exceptionnels et très exceptionnels avaient été sources de destruction massive, ils seraient au moins dans la mémoire humaine ou dans les archives.

3.8.2 ETUDE DE LA PÉRIODE DE RETOUR DES PLUIES MAXIMALES QUOTIDIENNES DE L'ANNÉE 2010

L'objectif de cette partie est d'analyser si les pluies maximales quotidiennes de 2010 étaient susceptibles d'engendrer des inondations. Ainsi, les hauteurs de pluies ont été recensées de même que les dates et leur période de retour étudiées. Le tableau 11 présente les résultats.

Tableau 11. Récurrence des pluies maximales quotidiennes de 2010

Communes/ Stations	Pluie max/ jour (mm)	Période de retour (Q)	Qualification de l'évènement	Dates	Catégorie d'année
Bopa	134 mm	Q ≈ 13 ans	Très anormale	18/09/2010	Extrêmement humides : In ≥ 2
Athiémé	89 mm	Q ≈ 4 ans	Normale	07/08/2010	
Grand-Popo	133 mm	Q ≈ 8 ans	Anormale	10/03/2010	

Il ressort de ce tableau que 2010 a été une année normalement humide (1 ≤ In ≤ 1,49), et n'a connu aucun évènement exceptionnel ni très exceptionnel. Seul un évènement très anormal (pluie de 134 mm) a été enregistrée à Bopa. On peut conclure que les inondations très catastrophiques enregistrées dans le bassin du Mono plus précisément dans ces trois communes ne présentaient pas de caractère exceptionnel ou très exceptionnel. Les causes de ces inondations ne sont donc pas la pluviométrie journalière. Par ailleurs, l'accumulation de plus sur une durée plus longue pourrait être à l'origine et associe probablement à d'autres facteurs favorisants.

3.8.3 PÉRIODE DE RETOUR DES PLUIES MAXIMALES AU COURS DES ANNÉES EXTRÊMEMENT HUMIDES

Les années 1963 et 1968 sont les deux années extrêmement humides (In > 2) de la série 1960-2022. La période de récurrence des pluies maximales journalières de ces deux années a été étudiée. Le tableau 12 présente les résultats.

Tableau 12. Périodes de retour des pluies maximums des années extrêmement humides

Communes/ Stations	Années extrêmes humides	Pluies max/jour (mm)	Q	Qualification de l'évènement	Dates
Bopa	1963	71	Q ≈ 1 an	Normale	10/05/1963
	1968	119.7	Q ≈ 4 ans	Normale	04/09/1968
	1979	120,2	Q ≈ 4 ans	Normale	22/07/1979
Athiémé	1969	76,2	Q ≈ 2 ans	Normale	06/06/1969
	2011	99,20	Q ≈ 11 ans	Normale	19/07/1968
	2017	68,5	Q ≈ 2 ans	Normale	23/07/2017
Grand-Popo	2008	154	Q ≈ 13 ans	Très anormale	23/12/2008
	2009	139,5	Q ≈ 9 ans	Anormale	11/06/2009
	2010	133	Q ≈ 8 ans	Anormale	10/03/2010
	2013	96	Q ≈ 3 ans	Normale	10/05/2013
	2015	111,40	Q ≈ 4 ans	Normale	30/05/2015

Ce tableau révèle que les années extrêmement humides de la série 1960–2022 n'ont pas connu d'évènements exceptionnels ni très exceptionnels. Les hauteurs de pluies maximales journalières enregistrées au niveau des quatre communes varient de la normale au très anormales. Malgré cela, l'année 1963 est citée comme une année ayant connu une inondation dévastatrice. De l'analyse des tableaux 11 et 12, il ressort que les inondations destructives ne sont pas directement liées aux caractères exceptionnels des pluies, ni à l'humidité extrême des années. Après l'analyse des extrêmes pluviométriques excédentaires, une brève description de la tendance des extrêmes hydrologiques excédentaires a été réalisée. Le tableau 13 présente les projections futures des évènements extrêmes.

Tableau 13. Période de retour de la série chronologique par station dans le Mono

Période de retour / Stations	1 an	2 ans	5 ans	10 ans	50 ans	100 ans
Athiémé (mm)	38,5	83,6	106	122	159	174
Bopa (mm)	35,9	80	106	123	159	174
Grand-Popo (mm)	36	86	125	143	122	209

Le Tableau ci-dessus présente les périodes de retour au niveau chaque station sur 1, 2, 5, 10, 50 et 100 ans. La quantité de hauteurs de pluie espérée varie pour les trois stations d'environ 36 à 39 mm pour un retour de 1 an, entre 80 et 86 mm pour le retour de 2 ans. Donc, la précipitation varie entre 36 à 125 mm correspondante à la période normale, entre 122 et 143 mm à la période très anormale tandis que la catégorie exceptionnelle se marquera par une variation entre 122 et 209 mm de pluie.

4 DISCUSSIONS

Ce travail a consisté à examiner les variations tendancielles des pluies extrêmes dans le département du Mono sur l'intervalle 1960 à 2022. Aussi les périodes de retour se basant sur le test de Gumbel ont été déterminées ainsi que la détection du cas de l'inondation de 2010 a été vérifié à partir de ces données en utilisant l'indice standardise de précipitation. Plusieurs auteurs ont travaillé dans la zone plus particulièrement dans le bassin du Mono pour comprendre les extrêmes de pluies [7,10,11,26].

En général, une légère augmentation de pluies a été évidente. Par contre, on note de contrariété au sein des stations du département et sur la période d'étude. L'augmentation de la pluviométrie extrême est supportée par une étude antérieure [26], qui a aussi trouvé une tendance à l'augmentation de la pluie dans la vallée du Mono sur la période de 1967 à 2017. L'étude basée sur les données de projection de climat et krigées analysées par [7] a montré que la zone est sujette à une augmentation significative des pluies extrêmes donc vulnérable aux inondations. Dans le département du Mono, cette étude a révélé que l'année 2010 a été une année normalement humide, ce qui signifie implicitement qu'il y a des facteurs amplificateurs de l'inondation de 2010. Les résultats de l'analyse de la période de retour des précipitations extrêmes ont montré pour les stations de Athieme et de Bopa qu'elles augmenteront au fil du temps pendant ces périodes de retour montrent une quantité variable

au niveau de la station du Grand-Popo. Ces résultats sont en accord avec les résultats de retour des extrêmes de pluies d'un chercheur dans le bassin du Mono [7]. Le Bassin du Mono couvrant une superficie plus largement que la considération par station expliquerait la différence observée entre ces deux résultats. Dans ce même ordre d'idée, les valeurs de projections sont proches que celle de cette plus récente étude. Lorsqu'on considère les années humides, seule la station de Grand-Popo permet de détecter l'année 2010 mais pour une période de retour de 8 ans. Pendant que 2010 fut crié par plusieurs organisations par exemple, [27], les mécanismes conduisant à cette situation reste peu étudiées. Notons que une étude dans le Couffo a trouvé pour une période de retour comprise entre 2 et 5 ans, des quantités de pluies variant de 36 à 141 mm [28]. Bien que les zones d'études soient différentes, les quantités de pluies selon les périodes sont comprises entre 80 et 125 mm, ce qui est dans la fourchette de 36 à 141 mm de hauteur de pluie. Les limites de cette présente est l'explication de l'occurrence de ce phénomène d'inondations par d'autres méthodes (les facteurs amplificateurs de l'inondation et les conditions météorologiques associées) qui feront l'objet des recherches à venir.

5 CONCLUSION

La plupart des communes du département du Mono deviennent de plus en plus vulnérables aux inondations. Ainsi ce travail considère ce département pour une compréhension plus claire sur le comportement de variation de pluies extrêmes dans cette localité. Les données de stations obtenues de Météo-Benin et de l'ASECNA ont été utilisées à cette fin sur la période de 1960 à 2022. La régression simple, le retour des évènements extrêmes ont été examinés. Les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Pendant que les communes d'Athiémé et Bopa subissent de réduction de précipitation totale annuelle, celle de grand-Popo connait une légère situation d'amélioration. La moyenne de la pluie sur le département a connu une faible augmentation.
- Les pluies maximales en un jour sont en diminution au niveau des communes de Athiémé et de Bopa tandis qu'à Grand-Popo, elles ont augmenté.
- Les pluies ≥ 10 mm et 20 mm ont une tendance décroissante sur la période d'étude dans les communes ayant des stations
- Les 95 et 99 percentiles ont montre également qu'il y a diminution de pluie extrêmes sur Athieme et Bopa tandis qu'elles ont connu une légère augmentation au niveau du Grand-Popo. Pendant ce temps, le 99,5e percentile a été caractérisée par une tendance décroissante a Athieme mais croissante à Bopa et Grand-Popo.
- Les quantités de pluies pour les périodes de retour 2 à 5 ans sont visiblement dans la fourchette de quantités normales dont les valeurs sont comprises entre 94 et 128 mm mais les quantités anormales a exceptionnellement anormales varient entre 104 à 255 mm pour de périodes de retour de pluies estimées entre 10 et 100 ans.
- En considérant toute la série, la hauteur de pluies estimées entre 80 et 125 mm pour les périodes de retour entre 2 à 5 ans.

Les résultats de cette étude sont utilisables pour gestion des ressources en eau, des catastrophes naturelles surtout dues aux inondations. Ils renforcent les compréhensions des décideurs pour une durable des activités socio-économiques de la région. Également, ils serviront à l'adaptation et résilience aux changements climatiques.

REFERENCES

[1] Q. Sun, X. Zhang, F. Zwiers, S. Westra, L. V. Alexander, A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation, J. Clim. 34 (2021) 243–258. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0892.1.

[2] H. Kadomura, Climate anomalies and extreme events in Africa in 2003, Afr. Study Monogr. 26 (2005) 165–181.

[3] T. Vischel, G. Panthou, P. Peyrillé, R. Roehrig, G. Quantin, T. Lebel, C. Wilcox, F. Beucher, M. Budiarti, Precipitation Extremes in the West African Sahel: Recent evolution and physical mechanisms, in: Trop. Extrem. Nat. Var. Trends, Elsevier Inc., 2018: pp. 95–138. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809248-4.00004-2.

[4] I. Yabi, F. Afouda, Extreme rainfall years in Benin (West Africa), Quat. Int. 262 (2012) 39–43. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.12.010.

[5] S.F. Hounvou, K.F. Guedje, H. Kougbeagbede, J. Adechinan, E. Houngninou, A. Houeto, Spatiotemporal Variability of Extreme Rainfall in Southern Benin in the Context of Global Warming, 2023 (2023).

[6] E. OGOUWALE, Incidences des extremes pluviometriques au Benin Impact of extreme rainfall in Benin, J. La Rech. Sci. l'Université Lomé 17 (2015) 193–210.

[7] E. Amoussou, P. Camberlin, T.V.S. H, Y. Tramblay, C. Houndenou, G. Mahé, J. Paturel, M. Boko, ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES DANS LE BASSIN VERSANT DU MONO (BÉNIN-TOGO) EN CONTEXTE DE VARIABILITÉ / CHANGEMENT CLIMATIQUE socioéconomique. La question de l ' évolution future de la fréquence ou de l ' intensité de ces particulièrement concer, (2014) 343–349.

[8] F.K. Ogou, B. Kpaikpai, B.A. Ogwang, Z.M.M. Sein, V. Ongoma, J.P. Ngarukiyimana, Investigation of the influence of atlantic ocean on rainfall Variability over benin republic, west africa, Ethiop. J. Environ. Stud. Manag. 9 (2016) 70 – 79. https://doi.org/doi: http://dx.doi.org/10.4314/ejesm.v9i1.7.

[9] F. Djigbo, Statistical Analysis of Recent and Future Rainfall and Temperature Variability in the Mono River Watershed, (2019). https://doi.org/10.3390/cli7010008.

[10] A.E. Lawin, N.R. Hounguè, C.A. Biaou, D.F. Badou, Statistical analysis of recent and future rainfall and temperature variability in the Mono River watershed (Benin, Togo), Climate 7 (2019). https://doi.org/10.3390/cli7010008.

[11] E. Amoussou, H. Awoye, H.S.T. Vodounon, S. Obahoundje, P. Camberlin, A. Diedhiou, K. Kouadio, G. Mahé, C. Houndénou, M. Boko, Climate and extreme rainfall events in the mono river basin (West Africa): Investigating future changes with regional climate models, Water (Switzerland) 12 (2020). https://doi.org/10.3390/w12030833.

[12] ABV-OMM-GWP Initiative Volta GIC, Initiative Préparation de Projets de Mise en Pays, OEuvre de la Gestion Intégrée des Crues –GIC- » dans le bassin de la Volta et ses six, 2016.

[13] E. Amoussou, Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'ouest), Université de Bourgogne, 2010.

[14] H. T.H. Alexandersson, T. Schmith, K. Iden, Trends of storms in NW Europe derived from an updated pressure data set., Clim. Res. 14 (2000) 71–73.

[15] P.Y. Groisman, R.W. Knight, D.R... Easterling, T.R... Karl, G.C. Hegerl, V.N. Razuvaev, Trends in intense precipitation in the climate record. Journal of Climate, J. Clim. 18 (2005) 1326–1350.

[16] P. Naveau, M. Nogaj, C. Ammann, P. Yiou, D. Cooley, V. Jomelli, Statistical Methods for the Analysis of Climate Extremes, Geoscience 337 (2005) 1013–1022.

[17] S. Coles, An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values., Springer S, Springer-Verlag, London., 2001.

[18] A.F. Jenkinson, The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements, Q. J. R. Meteorol. Soc. 87 (1955) 145–158.

[19] J. Pickands, Statistical inference using extreme order statistics., Ann. Stat. 3 (1975) 119–131.

[20] E.J. Gumbel, Statistics of Extremes., Columbia U, New York, 1958. https://doi.org/https://doi.org/10.7312/gumb92958.

[21] B. Mohymont, G.R. Demaree, D.N. Faka, Establishment of IDF-curves for precipitation in the tropical area of Central Africa – comparison of techniques and results, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 4 (2004) 375–387. sref-id: 1684-9981/nhess/2004-4-375.

[22] M. Desbordes, La période de retour du risque de défaillance d'un aménagement hydrologique : une variable à risque?, 2011.

[23] M. Vandiepenbeeck, Bilan climatologique saisonnier. Hiver 1997: Unepériode de froid remarquable., Ciel Terre 113 (1997) 65–66.

[24] T.B. McKee, N.J. Doesken, J. Kleist, Drought monitoring with multiple time scales, in: 9th Conf. Appl. Climatol., AmericanMeteorological Society, Dallas, Texas, 1995: pp. 233–236.

[25] S. Sene, P. Ozer, Evolution pluviométrique et relation inondations – événements pluvieux au Sénégal., Bull. La Société Géographique Liège 42 (2002) 27–33.

[26] R.T. Nakou, F.D.P. Codo, N.C. Worou, Caractérisation des événements pluviométriques extrêmes dans la basse vallée du fleuve Mono au Bénin Résumé Abstract, 21 (2022) 177–192.

[27] Unies Nations, UN and partners launch $47 million appeal for flood-ravaged Benin, UN News Stories, Glob. Perspect. Hum. (2010). https://news.un.org/en/story/2010/11/357902 (accessed August 14, 2024).

[28] K.D. Hervé, Caractérisations hydro-pluviométriques des inondations dans le bassin versant de Couffo a Lanta Hydro-pluviometric characterizations of flooding from Couffo watershed to Lanta Abstract, (2020) 20–27.