

Numéro Spécial Janvier 2025

Colloque International Pluridisciplinaire AWACLIM 2024

GÉOPORO

ISSN : 3005-2165

MELANGES

**Revue de Géographie
du PORO**



Département de Géographie
Université Péléforo Gon Coulibaly

www.geoporo.net

Indexations



TOGETHER WE REACH THE GOAL

<https://sifactor.com/passport.php?id=23980>



<https://reseau-mirabel.info/revue/21571/Geoporo>



<https://aurehal.archives-ouvertes.fr/journal/read/id/947477>



<https://portal.issn.org/resource/ISSN/3005-2165>

IMPACT DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE SUR LES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES ET INCIDENCE SUR LA CONCEPTION DES INFRASTRUCTURES HYDROAGRIQUES DANS LE BASSIN BENINOIS DU MONO-COUFFO (AFRIQUE DE L'OUEST)

ALOFA Midakpo Voltaire^{1*}, HOUNSOU B. Mathieu¹, HOUEFFA Grâce-Désirée¹
and AHOTON Houéwanou David¹

¹Laboratoire d'Hydraulique et de Maîtrise de l'Eau (LHME), Institut National de l'Eau, Université d'Abomey-Calavi, 01 BP 526 Cotonou (Bénin).

*Auteur correspondant : vomido10@gmail.com

Résumé

Avec la variabilité climatique observée ces dernières années, les ouvrages conçus pour répondre à la probabilité d'occurrence des précipitations extrêmes pendant leur durée de vie ne sont plus efficaces. Cette étude examine comment ces changements affectent les méthodes de conception des aménagements hydro-agricoles. Pour cela, l'étude a analysé les séries de pluies de quatre postes pluviométriques entre 1981 et 2021, ainsi que les quantiles entre 1921 et 2001. Une sélection de la meilleure loi d'ajustement a été effectuée en utilisant le critère d'information d'Akaike (AIC) et le critère d'information de Bayésien (BIC). Une comparaison des quantiles a été réalisée à partir des matrices d'écart relatifs absolus. Les principaux résultats ont montré que les lois des précipitations extrêmes ont évolué au fil du temps. Ces changements ont induit des variations allant de 0,67 à 33,33% des quantiles pour une durée de retour donnée induisant une non-stationnarité. Pour la sécurité des ouvrages, il serait plus judicieux d'utiliser les valeurs du gradex pluviométrique local de la période 1981 à 2021 compte tenu des écarts (24,48% en moyenne) observés des deux périodes par rapport à celles régionales proposées par ORSTOM et CIEH. Cette étude constitue une contribution vers l'actualisation des normes hydrologiques indispensables pour assurer une sécurité des ouvrages hydrauliques et de leurs usagers.

Mots clés : Pluies extrêmes, non-stationnarité, gradex-pluviométrique, quantiles, normes hydrologiques.

Abstract

Climate variability in recent years has meant that structures designed to cope with the probability of extreme rainfall events during their lifetime are no longer effective. This study examines how these changes are affecting design methods for hydro-agricultural schemes. To this end, the study analyzed rainfall series from four rainfall stations between 1981 and 2021, as well as quantiles between 1921 and 2001. The best fitting law was selected using the Akaike Information Criterion (AIC) and the Bayesian Information Criterion (BIC). A comparison of quantiles was made using absolute relative deviation matrices. The main results showed that extreme precipitation laws have evolved over time. These changes led to variations ranging from 0.67 to 33.33% in quantiles for a given return period, inducing non-stationarity. For the safety of our

structures, it would be wiser to use the local rainfall gradex values for the period 1981 to 2021, given the differences (24.48% on average) observed in the two periods compared with the regional values proposed by ORSTOM and CIEH. This study is a contribution to the updating of hydrological standards, which are essential to ensure the safety of hydraulic structures and their users.

Keys Words: Extreme rainfall, non-stationarity, rainfall gradex, quantiles, hydrological norms.

Introduction

La maîtrise des précipitations extrêmes constitue un défi majeur de notre siècle (Bossa *et al.*, 2023). Pour ces auteurs, ces extrêmes causent des dégâts dans le monde en général et en Afrique de l'Ouest en particulier chaque année. Les dommages que créent ces extrêmes sur les ouvrages hydrauliques sont importants nécessitant leurs études surtout pour la gestion de l'eau car ils sont conçus pour répondre à la probabilité d'occurrence de ces extrêmes durant leur cycle (Yuan *et al.*, 2018). Selon Agué & Afouda, (2015) au Bénin, l'étude réalisée par le CIEH (1985), souvent utilisée pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques, concerne des périodes largement dépassées de nos jours. En effet, l'objectif visé par les méthodes développées par ORSTOM et CIEH était de maîtriser des régimes hydrologiques de la zone afin de contribuer à la mise en valeur des potentiels agricoles et hydro-électriques pour favoriser le développement des pays concernés (Nka Nnomo, 2016).

Mais, l'Afrique de l'Ouest, connaît depuis les années 1970 des phénomènes de changements climatiques et se place comme l'une des régions du monde les plus vulnérables à la variabilité climatique. Ces effets ont été mis en évidence dans de nombreuses études qui se sont penchées sur la question de la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest (Kouassi *et al.*, 2017). De ces travaux, il ressort que l'Afrique de l'Ouest connaît une succession d'épisodes climatiques secs et pluvieux ponctués de périodes de sécheresses dont l'intensité et l'extension spatiale sont devenues exceptionnelles depuis 1970. Face à cela, ces méthodes d'estimation des crues de projets développées nécessitent une actualisation. Dans cette démarche d'actualisation, la première étape consiste à sélectionner un modèle statistique approprié qui pourrait bien décrire la distribution des données annuelles de précipitations maximales. Cette tâche n'est cependant pas facile et reste l'un des défis majeurs de la pratique de l'ingénierie en raison de la variabilité spatiale et temporelle importante des maxima de précipitations (Nguyen *et al.*, 2017). Il existe plusieurs lois statistiques pour décrire les distributions des extrêmes hydrologiques annuels mais il n'y a pas souvent de consensus sur le modèle à utiliser pour un site ou une zone donnée comme le

signalent Kouassi *et al.*, (2018). Ceci amène donc à tester plusieurs lois aux données des stations locales afin de sélectionner la plus appropriée pour déterminer les paramètres nécessaires au dimensionnement des structures hydrauliques, plutôt que d'opter systématiquement pour une seule loi. Kouassi *et al.*, (2019) signalent donc que la prise en compte de stationnarité des quantiles dans les études hydrologiques est tout aussi importante que le choix de la loi elle-même. Mais très peu d'études se sont axées sur cette stationnarité. Ainsi, la présente étude s'intéresse à l'impact de la variabilité climatique sur les distributions de probabilité et leur incidence sur la conception des infrastructures hydroagricoles dans le bassin béninois du Mono-Couffo. Elle sera consacrée dans un premier temps à la recherche du modèle de probabilité le mieux adapté en appliquant un système d'aide à la décision et ensuite à l'analyse de stationnarité des quantiles et leurs effets sur les ouvrages à travers l'utilisation de la matrice des écarts relatifs.

1 Outils et Méthodes

1.1 Milieu d'étude

Le Bénin est un pays de l'Afrique de Ouest situé au bord du Golfe de Guinée. Il comprend quatre grands ensembles hydrographiques que sont : le bassin du Niger, le bassin de la Volta, le bassin côtier qui comprend du côté Est l'ensemble Ouémé-Yéwa et du côté Ouest l'ensemble Mono-Couffo concerné par la présente étude. En effet, l'ensemble Mono-Couffo est un bassin versant transfrontalier partagé par le Bénin et le Togo. La présente étude porte sur la partie béninoise de ce bassin indiquée par la Figure 20. Il s'étend entre 06°16' et 09°20' de latitude Nord et entre 0°42' et 2°25' de longitude Est et couvre une superficie de 5 554 km² soit 20% de la superficie totale. Il est composé des sous bassins du Mono et du Couffo d'où l'expression « ensemble ou Complexe » et est traversé par deux principaux fleuves à écoulement permanent orientés nord-sud et jouissant d'un climat subéquatorial. Dans ce bassin, la pluie moyenne annuelle sur la période 1981 à 2021 est de 1026 mm. Pour la DGCS-ODD (2019), les branches d'activités dans les Communes du bassin sont d'abord l'agriculture, l'élevage et la pêche ensuite le commerce, la restauration et l'hébergement et enfin les industries manufacturières dominées par les transformations des produits locaux par de petites unités.

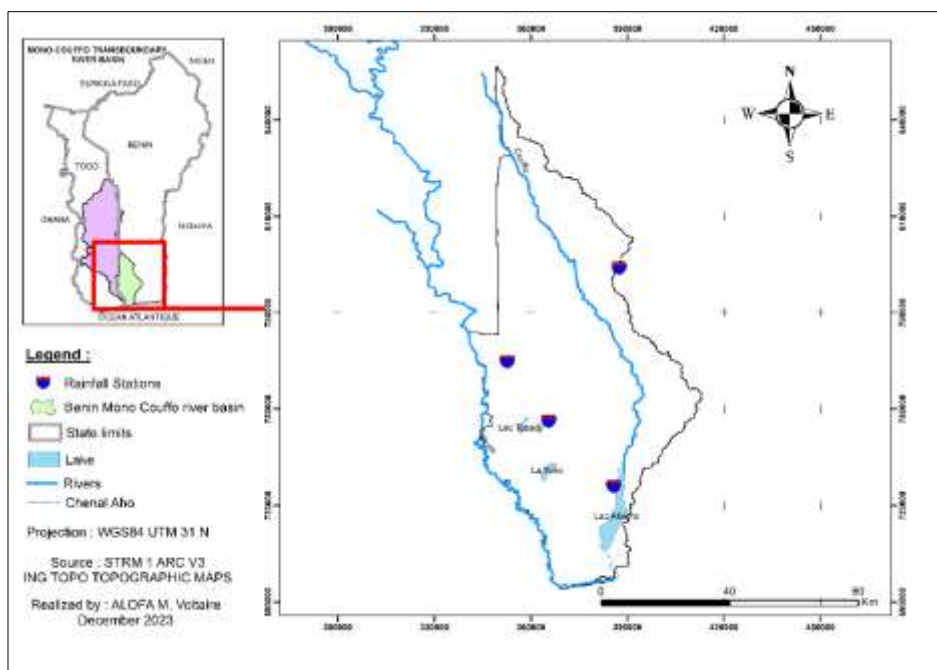


Figure 20 : Bassin versant béninois du Mono-Couffo

1.2 Données

La présente étude a nécessité l'utilisation de données climatiques. Elles concernent essentiellement les pluies journalières sur la période 1981 à 2021 soit quarante et une (41) années consécutives et couvre la normale de 1981 à 2010. Ces données sont issues de quatre (04) stations pluviométriques et ont été recueillies auprès de l'Agence Nationale de la Météorologie du Bénin (ANM). Les informations sur ces stations sont consignées dans le Tableau 17.

Tableau 17 : Informations sur les stations pluviométriques de la zone d'étude

N° Stations	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Sous-bassin
1 Grand-Popo	6,283°	1,817°	5	Mono
2 Bopa	6,567°	1,967°	7	Couffo
3 Aplahoué	6,917°	1,667°	153	Mono
4 Abomey	7,183°	1,983°	260	Couffo

Source : AMN (2023)

Le Logiciel HyfranPlus (Hydrological Frequency Analysis) développé par El Adlouni *et al.*, (2008) a été utilisé pour la réalisation de l'analyse fréquentielle complète des différentes données. Il intègre un Système d'Aide à la Décision (SAD) développé pour permettre le choix de la classe de distributions la plus

adéquate à l'estimation des quantiles (Pluies journalières maximales d'une période de retour donnée).

L'identification du modèle approprié aux valeurs extrêmes a pour objectif de choisir les fonctions de distributions qui caractérisent au mieux ces extrêmes pluviométriques. Cette identification a été faite en trois étapes : la vérification des tests d'hypothèses, l'application du Système d'Aide à la décision (SAD) et une évaluation de la validité des modèles présélectionnés par le SAD.

1.3 Méthodologie

1.3.1 Caractérisation des extrêmes journalières dans le bassin versant du Mono-Couffo

Tests d'hypothèses de l'analyse fréquentielle

Selon Kouton (2022), il est primordial de vérifier si les données sont indépendantes, stationnaires et homogènes avant de procéder à tout ajustement par les lois de distribution statistique à partir des tests.

Ces tests fonctionnent tous sur le même principe qui consiste à énoncer une hypothèse sur la population mère et à vérifier sur les observations constatées si celles-ci sont vraisemblables dans le cadre de cette hypothèse (Habibi *et al.* 2013 ; Kouassi *et al.* 2018).

Choix des classes de distribution

En général, la détermination de la loi de meilleur ajustement a toujours été délicate et le choix du modèle peut être crucial pour estimer les précipitations pour différentes périodes de retour des valeurs extrêmes (Nassa *et al.* 2021). Ainsi avant de passer à l'ajustement d'une distribution statistique à une série de données, il est souhaitable de déterminer en premier lieu à quelle classe cette distribution appartient (El Adlouni *et al.* 2008). La détermination de ces classes de distribution est faite à travers le Système d'Aide à la Décision (SAD) du logiciel Hyfran 1.1 (Hydrological Frequency Analysis).

Détermination des meilleures lois d'ajustement

La détermination de la meilleure loi consiste à sélectionner parmi les lois statistiques issues de l'application du SAD. Elle a été faite en deux étapes à savoir : l'analyse graphique et l'analyse numérique confirmatoire.

Comparaison graphique

La méthode graphique consiste à faire l'ajustement des maxima journaliers à l'aide des différentes lois contenues dans les différentes classes choisies. Ces lois fonctionnent sur la base de plusieurs paramètres dont l'estimation se fait à

travers plusieurs méthodes. La méthode du maximum de vraisemblance a été utilisé car considérée comme plus efficaces pour fournir des estimations de moindre variance comme l'ont montré des travaux de Haddad & Rahman, (2011); Beskow *et al.* (2015); Gado & Nguyen, (2016) et Tao *et al.*, (2002).

Comparaison numérique

La comparaison numérique a été faite sur la base du critère d'information Bayésien et du critère d'information Akaike. En effet, le critère d'information Bayésien (BIC) se place dans un contexte bayésien de sélection du modèle probabiliste (Lebartier & Mary-Huard, 2004, in Agué & Afouda, 2015). L'expression de ce critère Bayésien est la suivante :

$$BIC = -2 \times \log(L) + 2 \times K \times \log(N) \quad (1)$$

Quant au critère d'Information d'Akaike (Akaike, 1974) il est fondé sur une pseudo-distance entre une distribution inconnue et une distribution arbitraire. Le critère de comparaison d'Akaike (AIC) sélectionne le modèle réalisant le meilleur compromis biais-variance pour le nombre de données N dont on dispose. Un tel compromis permet de respecter le principe de parcimonie des lois théoriques de répartition des fréquences (Nassa *et al.*, 2021). L'expression du critère AIC est définie comme suit :

$$AIC = -2 \times \log(L) + 2K \quad (2)$$

Avec

L : la vraisemblance ;

K : nombre de paramètres ;

N : la taille de l'échantillon.

Le meilleur modèle statistique est celui dont les valeurs des critères AIC et BIC sont les plus faibles (Kouton, 2022 ; Nassa *et al.*, 2021).

1.3.2 Analyse de l'évolution des normes hydrologiques et leurs impacts sur les ouvrages hydrauliques

Une analyse de l'évolution des quantiles comme normes à travers la stationnarité sera effectuée par l'établissement des matrices des écarts relatifs et l'estimation du gradex pluviométrique utilisé pour le dimensionnement des ouvrages.

Détermination des matrices des écarts relatifs

L'analyse comparative des quantiles a été basée sur le principe selon lequel le concept de normes hydrologiques fait référence à une stabilité du climat (Paturel *et al.*, 2003).

Ainsi, les écarts relatifs absolus entre les quantiles des pluies journalières maximales annuelles, en considérant à chaque fois un quantile comme valeur de référence, ont été évalués (Kouassi *et al.*, 2019). Pour ces auteurs, l'expression permettant d'estimer cet écart est donnée par l'équation (3) :

$$\Delta X_{i/réf} = 100 \times \left| \frac{X_i - X_{réf}}{X_{réf}} \right| \quad (3)$$

Avec :

$\Delta X_{i/réf}$: écart relatif absolu ;

X_i : norme de la période i ;

$X_{réf}$: norme de référence ;

i : période (année).

Un seuil d'acceptabilité de 5% a été retenu, c'est-à-dire que si l'écart relatif absolu est inférieur ou égal à 5%, la différence entre la norme considérée et la norme de référence n'est pas considérée comme étant statistiquement significative.

Pour mieux observer l'évolution des quantiles dans le bassin, les écarts relatifs absolus ont été calculés sur la base des quantiles obtenus par Agué & Afouda (2015), sur la période 1921-2001 et ceux obtenus dans cette étude pour la période 1981-2021. Le Tableau 18 présente les quantiles obtenus sur la période 1921-2001 sur quatre stations du bassin béninois du Mono-Couffo.

Tableau 18 : Quantiles des pluies extrêmes de la période 1921-2001

Stations	T=5	T=10	T=50	T=100
Grand-Popo	120	142	189	210
Aplahoué	98,9	113	144	157
Bopa	104	121	157	173
Abomey	94,2	111	150	166
Minimum	94,2	111	144	157
Maximum	120	142	189	210
Moyenne	104,275	121,75	160	176,5

Source : Agué & Afouda (2015)

Estimation du gradex pluviométrique pour le dimensionnement des ouvrages

Pour protéger les populations et assurer la sécurité des ouvrages des événements extrêmes, la fréquence du débit utilisé pour le dimensionnement des ouvrages des projets d'aménagement est généralement de 100 ans (Triboulet *et al.*, 1996). Le débit de projet est donné par la formule :

$$Q_{100} = C \times Q_{10} \quad (4)$$

Avec :

C : Coefficient majorateur supérieur à 1 ;

Q_{10} : Débit de crue décennale.

L'expression du coefficient majorateur est donnée par la formule :

$$C = 1 + \frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}} \times \frac{\left(\frac{T_b}{24}\right)^{0,12}}{Kr_{10}} \quad (5)$$

Avec :

P_{10} : Précipitation journalière correspondant à une période de retour de dix ans ;

P_{100} : Précipitation journalière correspondant à une période de retour de 100 ans ;

T_b : Temps de base en heures ;

Kr_{10} : Coefficient de ruissellement de la crue décennale (exprimé en fraction).

Les paramètres T_b et Kr_{10} étant constants pour un bassin donné, la valeur du coefficient C varie essentiellement en fonction de P_{100} et P_{10} respectivement pour les périodes de retour de 100 ans et 10 ans.

Soit α le gradex pluviométrique dont l'expression est la suivante :

$$\alpha = \frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}} \quad (6)$$

La valeur de α a été déterminée pour les périodes (1921-2001 ; 1981-2021) afin d'observer sa variation dans le temps et donc son impact sur le débit.

2 Résultats

2.1 Analyse des tests d'hypothèse appliqués sur les pluies maximales journalières annuelles

Les résultats des tests d'hypothèses préalable à l'analyse fréquentielle effectuée sur les séries de pluies maximales journalières annuelles sont présentés dans le Tableau 19.

Tableau 19 : Résultats des tests d'analyse fréquentielle de la période 1981-2021

Stations	Test d'indépendance		Test de stationnarité		Test d'homogénéité	
	U	P	K	P	W	P
Dogbo	1,46	0,143	1,22	0,221	1,29	0,197
Grand-Popo	2,28	0,0227	1,2	0,229	0,378	0,705
Aplahoué	0,598	0,55	0,101	0,919	1,13	0,256
Bopa	0,651	0,515	1,33	0,185	1,32	0,188
Toffo	1,23	0,218	1,68	0,0920	0,978	0,328
Abomey	0,107	0,915	1,62	0,106	1,03	0,303

Il ressort de l'analyse du tableau que toutes les stations vérifient l'hypothèse d'indépendance au risque de 5% sauf la station de Grand-Popo qui vérifie au seuil de 1%. Le test de Kendall a montré qu'il n'y a aucune tendance dans les observations au seuil de 5% sur toutes les stations. L'application du test de Wilcoxon-Mann Whitney indique que les moyennes des deux sous échantillons sont égales, au seuil de 5% sur l'ensemble des stations. Il s'en suit donc que les séries des pluies journalières maximales des stations de Dogbo, Grand-Popo, Aplahoué, Bopa, Toffo et Abomey sont indépendantes, homogènes et stationnaires. L'approche de vérification de test d'hypothèse étant une étape indispensable à la réalisation de l'analyse fréquentielle, la vérification faite sur l'ensemble des données montre qu'elles vérifient ces critères ce qui permet de poursuivre les analyses.

2.2 Identification des meilleures classes de lois

Le Tableau 20 présente les résultats du SAD sur la période 1981-2021.

Tableau 20 : Résultat du SAD de la période 1981-2021

Taille de la série	% par Classe	Stations				
		Grand-Popo	Aplahoué	Bopa	Abomey	Moy.
41 ans	C	100	33	100	67	75
	D	0	0	0	0	0
	E	0	67	0	33	25

De l'analyse de ce tableau, il ressort que les classes C et E sont plus adéquates. En effet, sur cette période, la classe C domine à 75% suivi de la classe E (25%) car seule la station d'Aplahoué enregistre une bonne adéquation (67%) dans cette dernière. Ainsi, la classe C offre une bonne adéquation sur la période 1981-2021 dans le bassin. L'ajustement statistique des extrêmes journalières annuelles a été faite sur la base des modèles issus de ces classes et les résultats sont présentés dans la section suivante.

2.3 Identification de la meilleure loi

Le choix de la meilleure loi repose sur l'examen visuel des graphes d'ajustement et l'analyse numérique. Les résultats de l'ajustement des pluies journalières maximales pour la période de 1981-2021 sont présentés par la Figure 21.

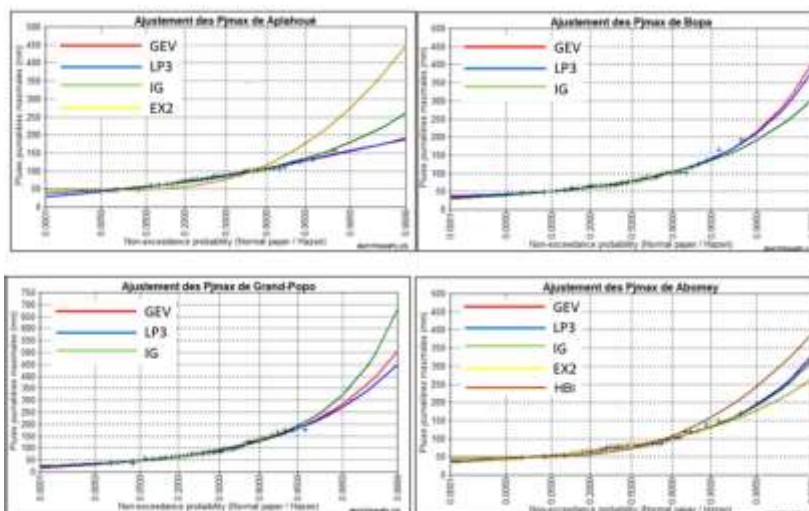


Figure 21 : Ajustement des pluies extrêmes aux stations du Mono-Couffo de 1981 à 2021

L'analyse visuelle des graphes montre que sur la période, les lois qui ajustent au mieux les données sont les lois Gamma Inverse, Log Pearson type 3 et GEV sur l'ensemble des stations. Après l'ajustement des pluies journalières par la loi GEV, le paramètre de forme k est inférieur à zéro (0) pour l'ensemble des stations (Grand-Popo, -0,08 ; Bopa, -0,13 et Abomey, -0,09) sauf à Aplahoué (0,13) où k est supérieur à zéro pour la série de 1981-2021. De ce fait, les valeurs extrêmes des précipitations journalières des stations de Grand-Popo, Bopa et Abomey suivent la distribution de Fréchet. Quant à Aplahoué elles suivent la distribution de Weibull.

À la suite de l'analyse graphique, les critères AIC et BIC ont été appliqués pour le choix de la meilleure loi d'ajustement. Les résultats sont consignés dans le Tableau 21.

Tableau 21 : Résultat des critères BIC et AIC de la période 1981-2021

Stations	GEV		Log-Pearson type 3		Inverse Gamma (IG)		Halphen type B Inverse (HIB)		Exponentielle	
	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC
Grand-Popo	425,7	420,6	425,7	420,5	422,7	419,2	-	-	-	-
Aplahoué	379,9	374,8	379,9	374,8	378,1	374,7	-	-	398,5	395,1
Bopa	388,5	383,4	388,8	383,5	385,4	382,0	-	-	-	-
Abomey	381,3	376,2	381,32	376,2	378,10	374,7	381,3	376,2	385,2	381,8

Il est constaté que les différentes valeurs sont assez rapprochées pour les lois Log Pearson Type 3 et GEV (Fréchet) quel que soit le critère et sur la majorité des stations. Cependant à la station d'Abomey ce sont les lois Log Pearson Type 3, Halphen of type B inverse et GEV qui ont des valeurs rapprochées quel que soit le critère. La meilleure loi étant celle qui a simultanément les plus faibles valeurs au niveau des deux critères, seule la loi Gamma Inverse respecte cette condition quel que soit la station. Ainsi la loi Gamma inverse représente au mieux le comportement des pluies extrêmes dans le bassin versant béninois Mono Couffo au Bénin. Cette loi est suivie par les lois Log Pearson Type 3 et GEV (Fréchet) sur l'ensemble des stations. Bien que les valeurs des critères soient très proches, les écarts par rapport à ceux de la loi Inverse Gamma montrent que cette dernière est suivie par la loi Log Pearson Type 3. Les quantiles issus de la loi inverse Gamma sont présentés dans le Tableau 22. Ces quantiles ont été évalués pour les périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans.

Tableau 22 : Quantiles des pluies extrêmes de 1981-2021

Stations	T=2 ans	T=5 ans	T=10 ans	T=20 ans	T=50 ans	T=100 ans
Grand-Popo	89,4	129	160	193	240	280
Aplahoué	85,6	107	121	135	153	166
Bopa	79,1	103	120	136	158	175
Abomey	80,6	102	117	131	149	163
Minimum	72,8	94,9	109	123	141	154
Maximum	89,4	129	160	193	240	280
Moyenne	80,3	105,4	123,3	141,2	165,5	184,5

L'analyse du tableau montre que ces quantiles croissent d'une période de retour à une autre quel que soit la station considérée et les valeurs les plus élevées sont observées au niveau de la station de Grand-Popo, située sur la frange du littorale.

2.4 Analyse des matrices des écarts des quantiles des pluies extrêmes

Les matrices des écarts absolus relatifs sont présentées dans le Tableau 23 pour les périodes de retour de 5, 10, 50 et 100 ans.

Tableau 23 : Matrice des écarts absolus relatifs de quantiles de période de retour de 5,10, 50 et 100 ans.

Stations	Année	T=5		T=10		T=50		T=100	
		1921- 2001	1981- 2021	1921- 2001	1981- 2021	1921- 2001	1981- 2021	1921- 2001	1981- 2021
Grand-Popo	1921-2001	0,00	6,98	0,00	11,25	0,00	21,25	0,00	25,00
	1981-2021	7,50	0,00	12,68	0,00	26,98	0,00	33,33	0,00
Aplahoué	1921-2001	0,00	7,57	0,00	6,61	0,00	5,88	0,00	5,42
	1981-2021	8,19	0,00	7,08	0,00	6,25	0,00	5,73	0,00
Bopa	1921-2001	0,00	0,97*	0,00	0,83*	0,00	0,63*	0,00	1,14*
	1981-2021	0,96*	0,00	0,83*	0,00	0,64*	0,00	1,16*	0,00

Abomey	1921-2001	0,00	7,65	0,00	5,13	0,00	0,67*	0,00	1,84*
	1981-2021	8,28	0,00	5,41	0,00	0,67*	0,00	1,81*	0,00

***Pourcentage des écarts des quantiles inférieurs à 5%**

L'analyse de ces écarts présentés dans le tableau ci-dessus, met en évidence une évolution des quantiles avec les périodes de retour. À cet effet, deux constats sont faits. Le premier est relatif aux quantiles de 5 et 10 ans pour lesquels les deux (02) valeurs sur huit (08) sont inférieures à 5% dans chacun des cas. Ainsi, 25% des écarts étant inférieures à 5%, l'écart entre les quantiles est significatif. Le second mode observé est l'égalité entre les écarts pour les périodes de retour de 50 et 100 ans entre la période historique et actuelle. Dans cette tendance les différences entre les deux périodes sont les plus importantes. Le nombre de valeurs supérieurs à 5% étant très important alors l'écart entre les quantiles est significatif. Ces analyses montrent que dans l'évolution actuelle des quantiles, ils diffèrent plus pour les périodes de retour 5 et 10 ans de la période historique de [1921-2001] à la période actuelle de [1981-2021]. Par opposition, les valeurs les plus extrêmes de grandes périodes de retour (50 et 100 ans) sont moins fréquentes mais peuvent avoir un impact significatif. Il y a donc une non-stationnarité entre les quantiles de la période historique et celle actuelle.

2.5 Analyse du gradex pluviométrique des méthodes de ORSTOM et CIEH

Le Tableau 24 présente les différentes valeurs du gradex pluviométrique locale intervenant dans l'estimation du coefficient de majoration C de la Q10 à la Q100.

Tableau 24 : Différentes valeurs du gradex de pluies par station

Stations	1921-2001	1981-2021	Écart relatif absolu (%)
	$(P_{100}-P_{10})/P_{10}$	$(P_{100}-P_{10})/P_{10}$	
Bopa	0,43	0,46	6,24
Aplahoué	0,39	0,37	4,70
Abomey	0,50	0,39	26,03
Grand Popo	0,48	0,75	56,62
Moyenne	0,45	0,49	23,82

L'analyse des résultats montre que le gradex varie de 0,39 à 0,5 sur la période de 1921-2001 avec une moyenne de 0,45 et un écart-type 0,05. En revanche sur la période actuelle, il varie de 0,37 à 0,75 avec une moyenne de 0,49 et un écart-type de 0,18. Cela montre que ce dernier est inférieur dans la période historique

par rapport à la période actuelle. De plus son écart-type montre qu'il est faiblement dispersé autour de la moyenne par rapport à la période actuelle. L'application du test T-Student (p-value : 0,63) et de Wilcoxon (p-value : 0,87) ont montré que la différence entre les moyennes n'est pas statistiquement significative au seuil de 5%. Toutefois les écarts relatifs estimés montrent une différence significative au seuil de 5% sur l'ensemble des stations sauf à Aplahoué où la baisse enregistrée n'est pas significative. A la station de Grand-Popo, la différence est plus importante (augmentation de près de 50%). À Abomey l'écart à la baisse est statistiquement significatif de la période historique par rapport à la période actuelle. Le Bénin étant situé dans la zone tropicale, une comparaison entre les valeurs du gradex estimées et celles proposées par ORSTOM et CIEH est nécessaire. Les résultats sont consignés dans le Tableau 25.

Tableau 25 : Écarts relatifs absolus entre les gradex locaux et le gradex sous régional de l'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer).

Stations	Années	α_r	α_l	Écart (%)
Grand-Popo	1921-2001	0,38	0,48	26,32
	1981-2021		0,75	97,37
Aplahoué	1921-2001	0,38	0,39	2,47
	1981-2021		0,37	2,13
Bopa	1921-2001	0,38	0,43	13,09
	1981-2021		0,46	20,61
Abomey	1921-2001	0,38	0,50	30,39
	1981-2021		0,39	3,46

α_r : gradex sous régional α_l : gradex locaux

L'analyse du tableau montre que dans la période 1921-2001 les écarts observés au niveau du gradex sont dans l'ensemble supérieur (13,09-30,29%) au seuil de 5% sauf à la station d'Aplahoué (2,47%) ce qui traduit une différence entre les gradex de référence en zone tropicale et ceux obtenus localement sur cette période. Cette différence se manifeste par une importante augmentation des gradex dans la période 1921-2001. Cependant, dans la période actuelle 1981-2021, seules les stations de Grand-Popo et Bopa enregistrent respectivement des écarts (97,37% et 20,61%) supérieurs au seuil de 5% soit 50% des stations. Ces écarts traduisent une importante augmentation du gradex pluviométrique local à Grand-Popo et Bopa, une légère augmentation à Abomey et une baisse non

significative (seuil de 5%) à Aplahoué. Dans le même temps, l'écart à Abomey était significatif dans la période de 1921-2001 avec une augmentation du gradex.

Ainsi, une différence s'observe au niveau de l'évolution du gradex de la période historique de [1921-2001] à la période actuelle de [1981-2021].

3 Discussion

Les séries pluviométriques journalières maximales annuelles sont toutes stationnaires, homogènes et indépendantes. L'application de l'outil SAD montre que les lois de la classe C (75%) sont mieux adaptés à ces extrêmes pour l'ensemble des postes pluviométriques. Ces résultats sont en adéquation avec celles de Nassa *et al.*, (2021), qui ont montré que la classe C apparaît à un taux de 57,47% et 46,84% respectivement sur les séries des 30 ans et 40 ans en Côte d'Ivoire.

Par ailleurs, à l'issue de l'analyse fréquentielle, la loi Inverse Gamma ressort comme étant la mieux adéquate suivie de la loi GEV (Fréchet et Weibull) et Log-Pearson type 3. Cependant, Agué & Afouda (2015), ont montré sur la période 1921 à 2001 que les meilleures lois sont respectivement les lois Gumbel, Lognormale et Pearson-Type 3. Ces différences de lois pourraient s'expliquer dans un premier temps par, le fait que plusieurs auteurs tels que (Allé, 2014; Amoussou *et al.*, 2016) ont mis en évidence une baisse des précipitations à partir des années 1970 qui s'est amplifiée au début de la décennie 1980 avec une légère reprise vers la fin des années 90. Or les travaux de Seydou (2020) et Nakou *et al.*, (2022), ont montré respectivement sur les périodes 1981-2017 et 1970-2020 une tendance à la hausse marquée par une forte variabilité pluviométrique qui se présente sous forme d'une alternance d'années déficitaires et excédentaires prédisposant le bassin à des risques hydro-climatiques. Cela dénote donc de l'installation d'un nouveau mode de variabilité après les années 80. Le second facteur est le critère de choix des lois utilisées pour l'analyse fréquentielle qui se fonde sur les lois prédominantes issues des études antérieures utilisées également par plusieurs dont (Habibi *et al.*, 2013 en Algérie; Kouassi *et al.*, 2019 en Côte d'Ivoire ; Avossè *et al.*, 2022 au Bénin et Amadou Abdou *et al.*, 2023 au Niger). Cependant le SAD a été développé pour permettre de choisir la classe de distributions la plus adéquate pour estimer le quantile (El Adlouni *et al.*, 2012). Il est important également de noter que les lois issus des travaux de Agué & Afouda, (2015) sont différentes de celles obtenues. Il y a donc un changement des lois d'ajustement passant de la période 1921-2001 à la période 1981-2021 dû à la variabilité enregistrée.

Les quantiles des pluies extrêmes obtenus croissent d'une période de retour à une autre quelle que soit la station considérée sur les périodes 1921-2001 et 1981-2021. De plus l'ampleur de cette évolution dépend de la période de référence utilisée pour effectuer les estimations (Kouassi *et al.*, 2019), ce qui pourrait donc avoir une incidence en terme de coûts et de sécurités pour les projets d'aménagement selon la période choisie. Il faut noter également que les fortes valeurs sont enregistrées sur la station de Grand-Popo, une station côtière. Cette même remarque est faite par (Hounvou *et al.*, 2019) qui précisent que ces fortes valeurs pourraient expliquer le risque élevé des inondations dans la zone côtière du sud Bénin. L'analyse comparative des quantiles obtenus de 1921-2001 et 1981-2021 ressort une non-stationnarité à l'instar des travaux de (Nassa *et al.*, 2022) en Côte d'Ivoire sur la période 1931-2010. En effet, pour ces auteurs, les écarts les plus faibles sont obtenus avec des périodes de retour inférieures ou égales à 10 ans et se situent entre 0,92% et 46,67%. En revanche, pour des périodes de retour supérieures à 10 ans, les écarts varient entre 0,61% et 88,71%. Les écarts observés dans cette étude (0,83-11,25%) et (0,67-25%) respectivement pour les périodes de retour 5/10 ans et 50/100 ans sont moins importants que ceux obtenus par ces auteurs. Toutefois cela indique une augmentation de la variabilité climatique récente, avec des événements extrêmes devenant plus fréquents et plus intenses. Cependant, les écarts significativement plus élevés observés pour les périodes de retour de 100 ans, pourraient indiquer une tendance à des événements plus extrêmes qu'auparavant même si elles demeurent rares. Ainsi l'intensification de précipitations rares est susceptible d'augmenter les futures inondations (Kundzewicz *et al.*, 2014), entraînant des risques accrus de dommages ou de défaillance des infrastructures (Martel *et al.*, 2021; Wright *et al.*, 2019) et des pertes socio-économiques importantes (Wasko *et al.*, 2021).

Dans le même temps, les écarts entre les gradex pluviométriques estimés localement sur les deux périodes et la valeur de référence sous régionale de gradex dans l'application de la méthode de l'ORSTOM et du CIEH montrent des différences significatives au seuil de 5%. Ceci étant, l'interchangeabilité du gradex de référence sous régional avec les gradex locaux présente un risque considérable (Kouassi *et al.*, 2019). Un mauvais choix induira soit un surdimensionnement soit un sous-dimensionnement avec un impact sur le coefficient majorateur et le débit de projet avec pour conséquence des inondations et des dégâts sur les ouvrages ou encore des coûts élevés des projets. Dans ce sens, Yira *et al.*, (2019) ont montré que la partie aval de l'aménagement de Bankandi (Burkina Faso), construit en diguettes en courbe de niveau (DCN), avait été quasi abandonnée de longue date suite à des

inondations récurrentes même en année normale comme 2017. Parlant des conséquences des inondations sur les cultures, (Serpantié *et al.*, 2020) ressortent que lorsque ces crues parviennent à submerger le riz en période végétative, elles sont particulièrement néfastes car elles bloquent le tallage et détruisent les cultures. Face à ces conséquences qui semblent davantage s'aggraver, pour ces auteurs, l'un des enjeux pour une recherche d'accompagnement est d'adapter les aménagements et pratiques aux nouveaux aléas. Il devient donc urgent et indispensable de conduire des recherches pour la mise à jour des guides hydrologiques de l'ORSTOM et du CIEH (Amani & Paturel, 2017). En attendant, il s'avère pertinent de tenir compte du contexte climatique actuel pour l'estimation du gradex qui, selon Kouassi *et al.*, (2019) reste un outil d'aide pour les concepteurs et ingénieurs quant à la détermination des débits de projet pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

Conclusion

L'objectif de cette étude était d'analyser l'effet des variations observées dans le climat sur les extrêmes pluviométriques et les ouvrages hydrauliques. Pour ce faire, le choix de la meilleure loi d'ajustement a été fait à l'aide des critères AIC et BIC sur les données de pluies de quatre (04) postes pluviométriques de la période 1981 à 2021. Les écarts relatifs absolus ont été estimés entre les quantiles des périodes 1921-2001 et 1981-2021 d'une part, et entre le gradex pluviométrique local et régional d'autre part. Il apparaît que les pluies extrêmes de la période 1981-2021 s'ajustent au mieux à la loi Gamma Inverse sur l'ensemble des stations. De plus, des écarts importants (0,67-33,33%) ont été observés entre les quantiles des deux périodes (1921-2001 et 1981-2021), impliquant une non-stationnarité entre les quantiles de la période historique et de la période actuelle. Il en est de même pour les écarts (24,48% en moyenne) entre les gradex pluviométriques locaux sur les deux périodes et la valeur de référence sous-régionale du gradex. Ainsi, un mauvais choix soit de la période d'estimation des quantiles, soit de la valeur du gradex pluviométrique aura un impact sur le débit de projet et donc une incidence sur les ouvrages et les coûts des projets. Par conséquent, l'utilisation de la période actuelle et du gradex local sera plus appropriée.

Références bibliographiques

- Agué, A. I., & Afouda, A. (2015). Analyse fréquentielle et nouvelle cartographie des maxima annuels de pluies journalières au Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v9i1.12>
- Allé, U. (2014). *Analyse de la gestion des changements climatiques par les producteurs de maïs sur le plateau d'Allada au Sud-Bénin* [These de doctorat]. Université d'Abomey-Calavi.
- Amani, A., & Paturel, J.-E. (2017). Le projet de révision des normes hydrologiques en Afrique de l'Ouest et Afrique Centrale. *La Météorologie*, 96, 6. <https://doi.org/10.4267/2042/61964>
- Amoussou, E., Totin Vodounon, S. H., Clédjo, F. P., Allagbé, Y. B. S., Akognongbé, J. S. A., Houndenou, C., Mahe, G., Camberlin, P., Boko, M., & Pérard, J. (2016). *Évolution climatique du Bénin de 1950 à 2010 et son influence sur les eaux de surface*. 231-236.
- Avossè, A. D., Sintondji, L. O., Bessou, J., Bossa, A., Bodjrènou, R., & Gbaguidi, B. (2022). *Characterization of the frequency of hydroclimatic extremes in the lower Ouémé valley*. 12(6).
- Beskow, S., Caldeira, T. L., de Mello, C. R., Faria, L. C., & Guedes, H. A. S. (2015). Multiparameter probability distributions for heavy rainfall modeling in extreme southern Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 123-133. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.06.007>
- Bossa, A. Y., Akpaca, J. de D., Houunkpè, J., Yira, Y., & Badou, D. F. (2023). Non-Stationary Flood Discharge Frequency Analysis in West Africa. *GeoHazards*, 4(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/geohazards4030018>
- El Adlouni, S., Bobée, B., & Samoud, O. (2012). *Guide pour les méthodes du Système d'Aide à la Décision (SAD) de Hyfran-Plus* (p. 12).
- Gado, T. A., & Nguyen, V.-T.-V. (2016). An at-site flood estimation method in the context of nonstationarity II. Statistical analysis of floods in Quebec. *Journal of Hydrology*, 535, 722-736. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.064>
- Habibi, B., Meddi, M., & Boucefiane, A. (2013). Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales Cas du Bassin Chott-Chergui. *Nature & Technologie*, 8, 41 à 48.
- Kouassi, A. M., Nassa, R. A.-K., Kouakou, K. E., Kouame, K. F., & Biemi, J. (2019). Analyse des impacts des changements climatiques sur les normes hydrologiques en Afrique de l'Ouest : Cas du district d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire). *Revue des Sciences de l'Eau*, 32(3), 207-220. <https://doi.org/10.7202/1067305ar>
- Kouton, G. A. (2022). *Répartition spatio-temporelle des pluies extrêmes dans le département de l'Atacora au Bénin : Trajectoire et vulnérabilité des établissements humains* [Phdthesis, Université d'Abomey-Calavi]. <https://theses.hal.science/tel-03854304>

- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L. M., Arnell, N., Mach, K., Muir-Wood, R., Brakenridge, G. R., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K., & Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: Global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1-28. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>
- Martel, J.-L., Brissette, F. P., Lucas-Picher, P., Troin, M., & Arsenault, R. (2021). Climate Change and Rainfall Intensity–Duration–Frequency Curves : Overview of Science and Guidelines for Adaptation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(10), 03121001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002122](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002122)
- Nakou, R. T., Worou, N. C., Bacharou, T., Codo, F. de P., Sintondji, L. O., Alassane, A., & Yalo, N. (2022). Analyse spatio-temporelle des sècheresses et humidités dans la portion béninoise du bassin du fleuve mono, basse vallée. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 40, 248-264.
- Nassa, R. A.-K., Kouassi, A. M., Kouame, K. A., & Bossa, S. J. (2022). Impacts of climate change on hydrological standards in West Africa : Case of Ivory Coast. *International Journal Water Sciences and Environment Technologies*, 7(3), 6-23.
- Nguyen, T.-H., El Outayek, S., Lim, S. H., & Nguyen, V.-T.-V. (2017). A systematic approach to selecting the best probability models for annual maximum rainfalls – A case study using data in Ontario (Canada). *Journal of Hydrology*, 553, 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.052>
- Nka Nnomo, B. (2016). *Contribution à l'Actualisation des Normes Hydrologiques en relation avec les Changements Climatiques et Environnementaux en Afrique de l'Ouest* [Phdthesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI ; Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement]. <https://theses.hal.science/tel-01398353>
- Serpantié, G., Dorée, A., Douanio, M., Somé, F., Hien, S., Bossa, A. Y., Fusillier, J.-L., Lidon, B., Sawadogo, A., & Dabiré, N. (2020). Chapitre 6. Diagnostic rizicole des bas-fonds face aux risques climatiques: Les effets des aléas d'inondation (Lofing-Bankandi, Dano, Burkina Faso). In B. Sultan, A. Y. Bossa, S. Salack, & M. Sanon (Éds.), *Risques climatiques et agriculture en Afrique de l'Ouest* (p. 85-97). IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.36199>
- Triboulet, J. P., Gonni, D. C., Nouvelot, J. F., Lamachere, J. M., Puech, C., & Faures, J. M. (1996). *Crues et apports. Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche* (p. 244). FAO. <https://hal.inrae.fr/hal-02577332>
- Wasko, C., Sharma, A., & Pui, A. (2021). Linking temperature to catastrophe damages from hydrologic and meteorological extremes. *Journal of Hydrology*, 602, 126731. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126731>
- Yira, Y., Bossa, A. Y., Keita, A., Fusillier, L. J., Serpantié, Yaméogo, ThomasB., Idrissou, M., & Lidon, B. (2019). Failure of inland valleys development: A hydrological

diagnosis of the Bankandi valley in Burkina Faso. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(4), 1733-1741. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00628-5>

Yuan, J., Emura, K., Farnham, C., & Alam, M. A. (2018). Frequency analysis of annual maximum hourly precipitation and determination of best fit probability distribution for regions in Japan. *Urban Climate*, 24, 276-286. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.07.008>