

ANALYSE FRÉQUENTIELLE DES MAXIMA HYDRO-PLUVIOMÉTRIQUES, FACTEURS DE CRUES ET RISQUE D'INONDATION FLUVIALE DANS LE BASSIN AMÉNAGÉ DU FLEUVE SASSANDRA, SOUBRÉ, CÔTE D'IVOIRE

Kouakou Fidèle Constant KOUAME

*Institut de Géographie Tropicale (IGT), Groupe de Recherche
« Gestion des Risques Naturels dans les Territoires et les Sociétés » (GRTS),
Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, BP V34, Abidjan 01,
Côte d'Ivoire*

(reçu le 15 Août 2023; accepté le 30 Novembre 2023)

* Correspondance, e-mail : kouakou07@gmail.com

RÉSUMÉ

L'exploitation du bassin fluvial du Sassandra à Soubré cumulé aux fortes précipitations occasionne chaque année des risques d'inondation dues aux crues saisonnières. L'objectif de cette étude est de faire une analyse fréquentielle des maxima hydro-pluviométriques, facteurs de risque de crue et inondation fluviale dans le bassin aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré. L'approche méthodologique à consister à l'exploitation des données de précipitations et de débits sur la période 1980-2019 à travers l'application des tests et lois statistiques hydrologiques. Il ressort des résultats que les quantiles de débits de crue exceptionnelle ayant une probabilité de survenir varient entre 819 m³/s et 2600 m³/s à l'exutoire du bassin à Soubré. Concernant les précipitations, les quantiles estimés varient de 283 mm à 404 mm à la station de Soubré pendant qu'elles oscillent de 330 mm à 1340 au niveau de Buyo. Ces quantiles hydro-pluviométriques ont été estimés sur une période de retour de 2 à 100 ans à un intervalle de confiance de 95 %. L'approche méthodologique employée a la capacité de servir de recommandation aux autorités administratives de la protection civile pour la prévision des risques d'inondation fluviale dues aux extrêmes hydro-pluviométriques en Côte d'Ivoire.

Mots-clés : *analyse fréquentielle, risque d'inondation, bassin de Soubré, Côte d'Ivoire.*

Kouakou Fidèle Constant KOUAME

ABSTRACT

Frequential analysis of hydro-pluviometric maxima, flood factors and risk of river flooding in the managed basin of the Sassandra river, Soubré, Ivory Coast

The exploitation of the Sassandra river basin in Soubré, combined with heavy rainfall, poses risks of flooding due to seasonal floods every year. The objective of this study is to make a frequent analysis of the maximum rainfall, risk factors of flood and river flooding in the basin of the Sassandra river at the Soubré outlet. The methodological approach should be to use precipitation and flow data for the period 1980-2019 through the application of hydrological tests and statistical laws. The results show that the quantum of exceptional flood flows with a probability of occurring vary between 819 m³/s and 2600 m³/s at the Soubré basin outfall. For precipitation, the estimated quantiles range from 283 mm to 404 mm at the Soubré station while they range from 330 mm to 1340 at Buyo. These hydro-rainfall quantiles were estimated over a return period of 2 to 100 years at a 95 % confidence interval. The methodological approach used has the capacity to serve as a recommendation to the civil protection administrative authorities for the prediction of multiple flood risks due to hydro-rainfall extremes in Côte d'Ivoire.

Keywords : *frequency analysis, flood risk, Soubré watershed, Côte d'Ivoire.*

I - INTRODUCTION

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques et climatiques extrêmes entraîne des impacts irréversibles sur les systèmes naturels et humains au-delà de leurs limites d'adaptation, dans toutes les régions du monde [1]. Dans ce contexte, 29 % de la population mondiale sont exposées à une crue centennale à risque, soit une probabilité de survenance de 1 % sur 10 ans ou de 50 % sur une vie de 68 ans [2]. L'occurrence des phénomènes extrêmes tels que les fortes précipitations couplées aux actions anthropiques a fait de l'Afrique de l'Ouest l'une des zones les plus vulnérables au changement climatique [3]. Malheureusement, la Côte d'Ivoire, avec son réseau dense de cours d'eau et de bassins versants hydrographiques n'est pas épargnée par les impacts des risques liés aux extrêmes pluviométriques. Elle subit par conséquent de façon imprévisible les conséquences induites par les effets de la variabilité du climat [4, 5]. Ainsi, 45 000 personnes sont touchées par les inondations chaque année pendant les saisons de pluie [6]. Pourtant, ces cours d'eau offrent également des potentialités de développement d'infrastructures liées à l'eau. C'est l'exemple du bassin versant du Sassandra à l'exutoire de Soubré dans le Sud-ouest de la

Côte d'Ivoire. Cette partie du bassin versant est au cœur d'importants aménagements, avec les barrages de Buyo et de Soubré respectivement mis en service en 1980 et 2018 et le barrage de Gribo-Popoli en construction depuis 2018 [7]. De sorte que la zone est fréquemment touchée par des crues imprévues dues aux fortes précipitations. Ces crues combinées aux effets des aménagements hydroélectriques entraînent des inondations fluviales dans la zone aménagée du bassin du Sassandra. Ces situations causent de nombreuses perturbations notamment, des dégâts de cultures et environnementaux énormes. C'est pourquoi, cette présente étude se donne pour objectif de faire une analyse fréquentielle des maxima pluviométriques et hydrométriques susceptibles de générer des risques de crues et inondations fluviales dans le bassin versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Cadre de l'étude

Le bassin versant du fleuve Sassandra s'étend du Nord au Sud dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire, entre les coordonnées 4°55' et 9°45' de latitude Nord et entre 5°45' et 8°45' de longitude Ouest (*Figure 1*). Le bassin versant du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré est limité par le bassin versant du fleuve Niger au Nord, à l'Est par les bassins du Bandama et du Niouniourou, à l'Ouest par les bassins du Cavally et du San-Pedro et au Sud par le bassin du Sassandra à Gaoulou. Les conditions climatiques spécifiques et la présence d'un relief élevé au Nord-ouest du bassin, lui confèrent un réseau hydrographique dense [8]. La zone aménagée du bassin qui fait l'objet de cette étude (*Figure 1*) est définie par un régime subéquatorial où la première saison des pluies est observée de mars à juin, suivie d'un ralentissement entre juillet et août. Ensuite, une seconde saison des pluies de septembre à octobre. Enfin, la saison sèche assez marquée part du mois de novembre au mois de février. Dans cette partie du bassin (zone de Soubré), la pluviométrie annuelle oscille selon l'année et le lieu entre 1 500 mm et 1 600 mm avec une moyenne annuelle de 1 600 mm à la station météorologique de Soubré [8].

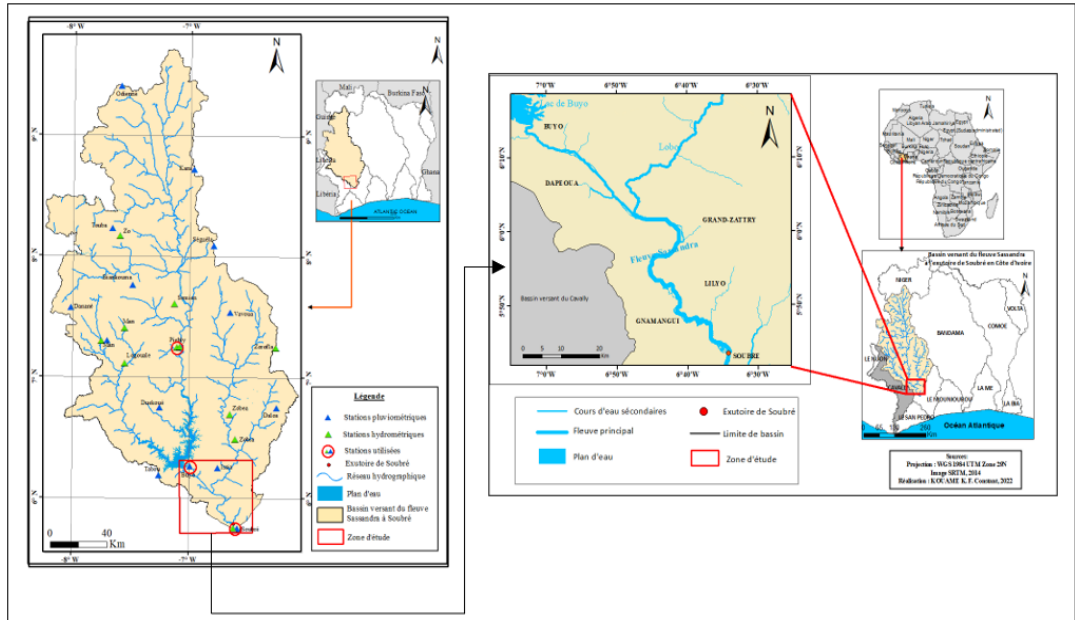


Figure 1 : Localisation du bassin versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré

II-2. Matériel d'étude

L'analyse fréquentielle aboutit à la prédétermination des débits et précipitations susceptibles d'engendrer des crues et inondations, ainsi que leur période prévisionnelle de retour. Dans le cadre de cette étude, elle s'est faite sur la base des données suivantes :

- Les maxima mensuels pluviométriques de la période 1989-2019 émanant des services de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire Aéronautique et Météorologique (SODEXAM). Elles ont été relevées aux stations de Buyo et Soubré.
- Les débits journaliers du fleuve Sassandra enregistrés à l'exutoire du bassin versant à la station de Soubré. Ces données ont été fournies par la Direction de l'Hydraulique Humaine et de l'Hydrologie et couvre la période 1980-2019.

Le traitement des données s'est fait à l'aide du logiciel HYFRAN PLUS version 1.2

II-3. Méthode de l'analyse fréquentielle

La technique utilisée pour le traitement des données dans la présente étude s'articule essentiellement autour de la méthode d'analyse fréquentielle. L'analyse fréquentielle est une méthode de prédiction qui permet d'étudier des événements passés, caractéristiques d'un processus donné et d'en déterminer

la probabilité de réapparition future, afin de s'en protéger [9]. Cette méthode permet en d'autres termes d'estimer l'ampleur de l'événement temporel x_T auquel est associé un période de retour T (quantile de période de retour T ou de probabilité au dépassement $p = 1/T$). L'estimation x_T de la valeur du quantile s'obtient en ajustant une loi de probabilité $F(x; \theta)$ à un échantillon de n observations $x = \{x_1, \dots, x_n\}$, où θ représente le vecteur de paramètres associé à la distribution de probabilité F . Pour estimer la probabilité d'apparition d'un évènement hydropluviométrique, on dispose d'une série de débits ou de pluie sur une période d'observation donnée. Ensuite, les valeurs maximales de la série observée sont sélectionnées. Pour la présente étude, il s'agit des hauteurs pluviométriques maximales au pas de temps mensuel (à défaut des précipitations journalières) et des débits maximums journaliers relevés aux stations de Buyo et Soubré. Par ailleurs, diverses autres étapes clés sont à suivre après le choix des valeurs maximales pour l'application de la méthode fréquentielle.

II-4. Choix d'une loi statistique d'ajustement

Le choix d'une loi d'ajustement peut se faire de telle façon que la loi retenue soit cohérente avec les observations et que le raisonnement soit sur la famille de distribution adaptée à la variable étudiée [10]. Lorsque la série de données de débits par exemple est échantillonnée et ordonnée, elle est soumise à un ajustement d'une loi statistique qui permet de prévoir la fréquence d'apparition du phénomène hydrologique étudié à partir de la fonction de répartition de débits $F(q)$. Plusieurs méthodes existent dont la méthode graphique. Cette dernière consiste à placer sur un graphique les points constituant un échantillon donné, calculant pour chaque valeur sa fréquence expérimentale de dépassement ou de non dépassement (P_m) dont la **Formule** de calcul est la suivante :

$$P_m = \frac{m-\alpha}{n+1-2\alpha} \quad (1)$$

où, P_m : la probabilité au dépassement au même valeur ; m : le rang qu'occupe la valeur ; n : le nombre d'années d'observations ; α : un paramètre qui varie entre 0 et 0.5.

Pour cette étude, c'est la formule empirique de Hazen (1978) qui a été choisi. En effet, la formule empirique de Hazen ($\alpha = 0.5$) a été utilisée dans plusieurs travaux à l'échelle de la région du Sud -ouest de la Côte d'Ivoire [11].

II-5. Choix du modèle fréquentiel

La validité des résultats d'une analyse fréquentielle dépend de la pertinence du type de modèle fréquentiel. Il existe de nombreuses approches basées sur les considérations théoriques, l'expérience et la coutume, ou encore l'utilisation des tests d'adéquation. Dès lors, on peut affirmer qu'il n'existe pas de méthode universelle et infaillible [9]. Cependant pour l'analyse de la distribution

statistique ajustée aux données hydro-pluviométriques (débits maximums et maxima pluviométriques), nos choix sont orientés vers les lois de Gumbel et Log-normale ainsi que la loi de Pearson type III pour une comparaison des résultats. La simplicité de mise en œuvre de ces lois a contribué à leur prédominance en matière de quantification du risque associé aux extrêmes hydrologiques.

II-6. Loi de Gumbel

Le modèle fréquentiel le plus utilisé pour décrire le comportement statistique des valeurs extrêmes à travers la distribution statistique de Gumbel (loi double exponentielle ou loi de Gumbel) [9]. Cette loi permet de décrire les séries de maxima annuels. La fonction de répartition de la loi de Gumbel $F(x)$ s'exprime selon la **Formule** suivante :

$$F(x) = \exp\left(-\left(1 - c \frac{x-a}{b}\right)^{\frac{1}{c}}\right) \quad (2)$$

où, a est le paramètre de position ; b le paramètre d'échelle ; c le paramètre de forme et x la variable des débits.

En conséquence, le temps de retour T d'un événement est défini comme étant l'inverse de la fréquence d'apparition de l'événement, soit :

$$T = \frac{1}{1-F(x)} \quad (3)$$

Il est à remarquer que plus le nombre de paramètres d'une loi est grand, plus l'incertitude dans l'estimation est importante. Par conséquent, il est préférable d'éviter l'utilisation de lois à trois paramètres ou plus.

II-7. Loi de Log-normale

La loi Log-normale est préconisée par certains hydrologues dont V.-T. Chow qui la justifie en argumentant que l'apparition d'un événement hydrologique résulte de l'action combinée d'un grand nombre de facteurs qui se multiplient. Dès lors la variable aléatoire $X = X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_r$ suit une loi Log-normale. En effet le produit de r variables se ramène à la somme r de logarithmes de celles-ci et le théorème central-limite permet d'affirmer la log-normalité de la variable aléatoire. Cette loi se justifie par le faible nombre de paramètres nécessaires avec une méthode d'estimation relativement simple. Si X suit une loi Log-normale, alors $Y = \log(X - a)$ a une distribution normale. La **Formule** de densité de probabilité de la loi Log-normale s'exprime comme suit :

$$f(x) = \frac{1}{(x-a)\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\log(x-a)-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right\} \quad (4)$$

II-8. Loi de Pearson III

La loi de Pearson ou du Gamma incomplet est une loi statistique qui fixe, a priori, la valeur du paramètre de position x_0 à zéro (0). En retenant toujours Q comme variable débit, et $u = a.Q$ comme variable réduite avec $\alpha = 1/s$, s étant le paramètre d'échelle. Sa fonction de repartition s'écrit comme suit :

$$f(Q) = \frac{a^\lambda}{\Gamma(\lambda)} \int e^{-aQ} Q^{\lambda-1} d \quad (5)$$

II-9. Ajustement du modèle fréquentiel

L'ajustement permet de déterminer les paramètres qui s'ajustent au mieux à l'échantillon des valeurs de la série. C'est-à-dire chercher à déterminer une loi issue d'une famille paramétrique $(f; \theta)$, où θ est l'ensemble des paramètres de la loi. Il existe de nombreuses méthodes statistiques et graphiques pour l'estimation des paramètres de lois de distributions. Cette étude s'est penchée sur l'ajustement graphique avec la méthode de maximum de vraisemblance. Elle fournit une représentation visuelle des données et de l'ajustement. Elle repose sur le fait que l'expression d'un quantile correspond à l'équation d'une droite [9]. A partir du tracé d'une droite d'équation dans le système d'axes $(x; y)$, on déduit les paramètres a et b qui définissent mieux la loi de probabilité. Les différentes étapes essentielles de l'analyse fréquentielle sont résumées à travers la **Figure 2** suivante :

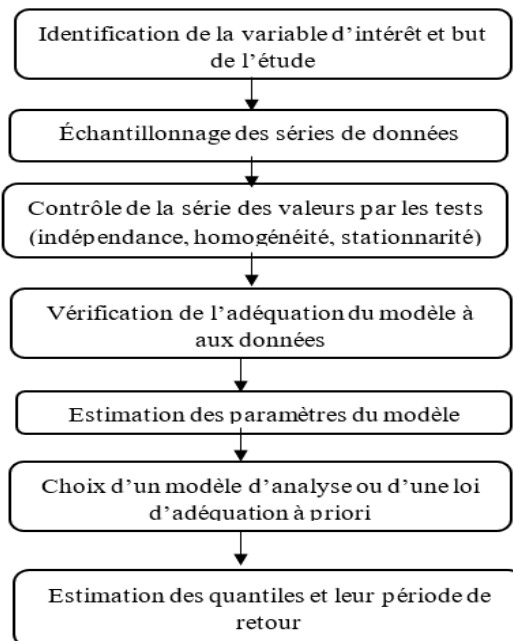


Figure 2 : Les différentes étapes de l'analyse fréquentielle ([12], modifié)

III - RÉSULTATS

III-1. Vérification des hypothèses de base appliquée aux maxima pluviométriques

Les différents tests d'indépendance (Wald-Wolfowitz) et stationnarité (Kendall) appliqués sont acceptés à l'Hypothèse H_0 à un niveau de signification de 5 % et les données maximales annuelles sont homogènes sur la période 1989-2017. Les différents résultats des tests réalisés au niveau de Soubré sont résumés dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : Tests statistiques appliqués aux hauteurs maximales pluviométriques annuelles à Soubré

Station	Test d'indépendance		Test de stationnarité		Test d'homogénéité (annuel 1989-2017)	
	U	P-value	K	P-value	W	P-value
Soubré	0.352	0.725	0.125	0.900	1.22	0.223
Hypothèse H_0	Acceptée		Acceptée		Acceptée	

En ce qui concerne les maximales pluviométriques de Buyo, les différents tests d'indépendance (Wald-Wolfowitz) et stationnarité (Kendall) appliqués sont également acceptés à l'hypothèse H_0 à un niveau de signification de 5 %. Quant au test d'homogénéité, l'hypothèse H_0 est acceptée avec un niveau de signification de 5 % sur la période 1989-2017. Les différents résultats des tests réalisés au niveau de Buyo sont résumés dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : Tests statistiques appliqués aux hauteurs maximales pluviométriques annuelles à Buyo

Station	Test d'indépendance		Test de stationnarité		Test d'homogénéité (annuel 1989-2017)	
	U	P-value	K	P-value	W	P-value
Buyo	0.457	0.648	0.625	0.532	0.578	0.563
Hypothèse H_0	Acceptée		Acceptée		Acceptée	

Les différents tests de base liés à l'indépendance, à la stationnarité et à l'homogénéité des données étant vérifiés, l'applicabilité de la méthode des valeurs extrêmes aux précipitations maximales annuelles est possible dans le bassin aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré.

III-2. Ajustement graphique des maximales de pluie mensuelle

Plusieurs lois et méthodes existent pour l’ajustement des distributions statistiques aux échantillons de données. La méthode de maximum vraisemblance a été employée pour toutes les lois d’ajustement. Pour déterminer celle qui s’ajuste aux mieux à la série chronologique des hauteurs pluviométriques, trois (3) lois d’ajustements ont été utilisées. Il s’agit des lois de Gumbel, de Pearson Type III, et Lognormale. Le résultat graphique du test de comparaison des différents ajustements est illustré à travers la **Figure 3**.

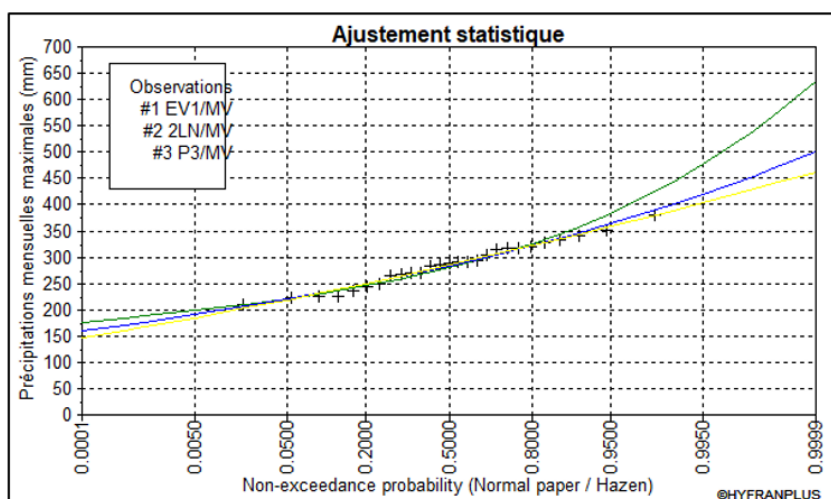


Figure 3 : Comparaison graphique des maximales pluviométriques avec les lois de Gumbel, Pearson Type 3, et Lognormale (Soubré)

De l’analyse du graphique (**Figure 3**), il est difficile de choisir la loi d’ajustement la plus adéquate. Par conséquent, en accord avec les résultats des critères d’information AIC et BIC (**Tableau 3**), il apparaît que la loi Lognormale de maximum vraisemblance (**Figure 4**) est la mieux adaptée pour représenter la série des hauteurs pluviométriques maximales dans le bassin aménagé au niveau de Soubré.

Tableau 3 : Comparaison des lois d’ajustement à l’aide des critères d’information (Soubré)

Modèles (Maximum de vraisemblance)	Nombre de paramètres	Quantile de retour	P(Mi)	P(Mi x)	BIC	AIC
Lognormale	2	404.212	33.33	61.32	285.713	283.121
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	448.953	33.33	25.39	287.476	284.885
Pearson type 3 (Maximum de vraisemblance)	3	391.158	33.33	13.29	288.771	284.883

Il ressort de l'analyse de cette **Figure 4**, que les hauteurs maximales pluviométriques à Soubré suivent le modèle dans un intervalle de confiance avec une probabilité de non-dépassement de 95 %, c'est à-dire une marge d'erreur de 5 % au plus. En ce qui concerne les précipitations extrêmes au niveau de Buyo, les résultats de la comparaison graphique (**Figure 5**) couplés aux résultats des critères d'information AIC et BIC (**Tableau 4**) ont permis de choisir la loi Lognormale de maximum vraisemblance (**Figure 6**) comme la mieux adaptée pour représenter la série des hauteurs pluviométriques maximales dans le bassin aménagé dans la zone de Buyo. A l'instar de Soubré, les hauteurs pluviométriques maximales suivent également le modèle dans l'intervalle de confiance avec une probabilité de non dépassement de 95 % à Buyo. De tout ce qui précède, il ressort que la loi Lognormale de maximum vraisemblance est la mieux adéquate pour représenter les séries des hauteurs pluviométriques maximales dans le bassin aménagé de Soubré.

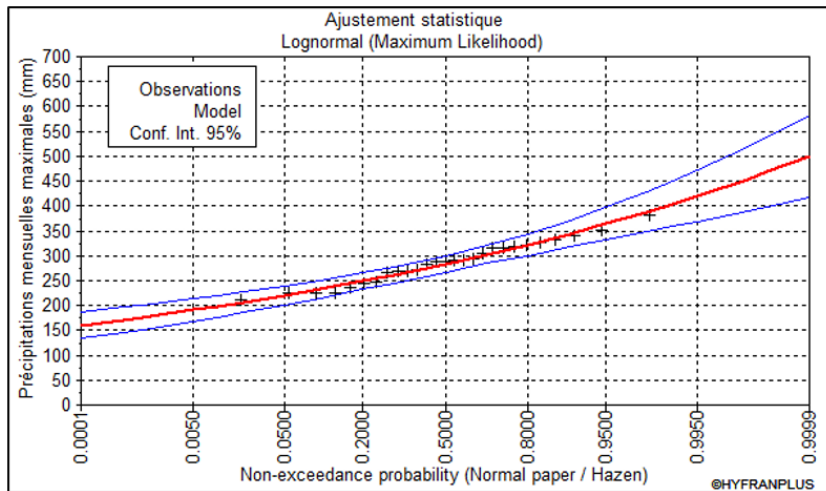


Figure 4 : Ajustement graphique des maximales pluviométriques avec la loi Lognormale (Soubré)

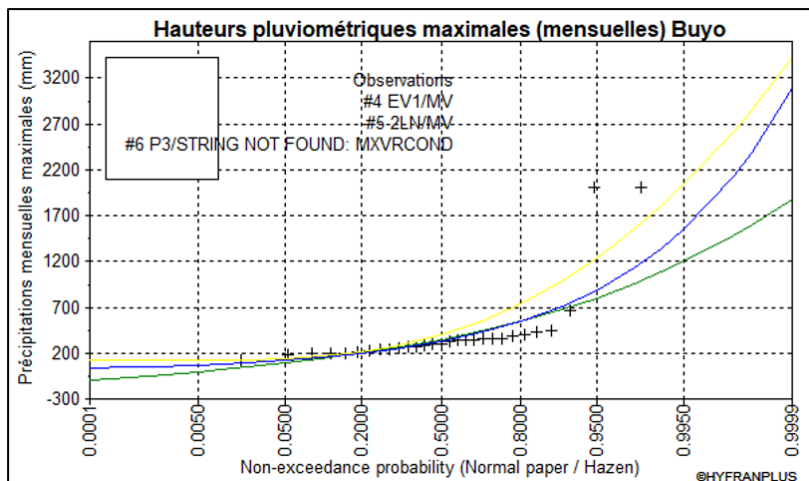


Figure 5 : Comparaison graphique des maximales pluviométriques avec les lois de Gumbel, Pearson Type 3, et Lognormale (Buyo)

Tableau 4 : Comparaison des lois d'ajustement à l'aide des critères d'information (Buyo)

Modèles (Maximum de vraisemblance)	Nombre de paramètres	Quantile de retour	P(Mi)	P(Mi x)	BIC	AIC
Lognormale	2	1337.247	33.33	99.84	394.864	392.129
Gumbel	2	1080.870	33.33	0.16	407.776	405.041
Pearson type 3	3	1801.623	33.33	N/D	N/D	N/D

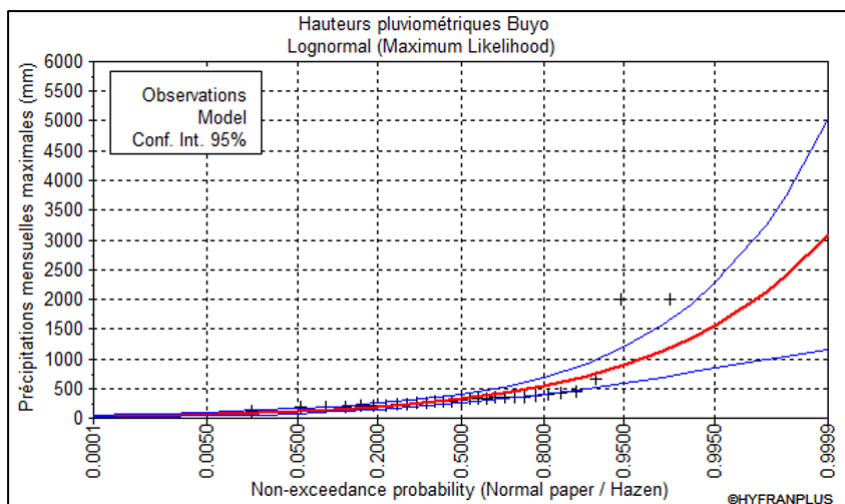


Figure 6 : Ajustement graphique des maximales pluviométriques avec la loi Lognormale (Buyo)

III-3. Estimation des périodes de retour des hauteurs pluviométriques maximales dans le bassin aménagé de Soubré

L'ajustement des hauteurs pluviométriques maximales et les tests statistiques ont permis d'estimer les quantiles pour différentes périodes de retour (**Tableau 5**). Au niveau de Buyo à l'entrée de la zone aménagée, l'analyse des données du tableau V montre que les précipitations maximales ayant une probabilité d'apparition tous les 5 ans s'élèvent à 547 mm et comprise entre 407 mm et 687 mm. Les pluies de 700 mm sont susceptibles de se produire une fois par décennie, c'est-à-dire tous les 10 ans. Ce maximum pluviométrique décennal varie de 500 mm à 925 mm. Quant à la zone exutoire à Soubré, en aval, les précipitations maximales oscillent en général autour de 300 mm. Ainsi, la probabilité d'une pluie extrême comprise entre 300 mm et 344 mm se produit chaque 5 ans. Egalement, la probabilité d'une pluie exceptionnelle de 400 mm se produit tous les 100 ans ; ce qui correspond à une pluie centenaire à l'exutoire de Soubré.

Tableau 5 : Période de récurrence des hauteurs pluviométriques maximales aux stations de Soubré et Buyo

Buyo			Soubré		
Périodes retour (ans)	Quantiles estimés (mm)	Intervalle de Confiance (95 %) en mm	Périodes retour (ans)	Quantiles estimés (mm)	Intervalle de Confiance (95 %) en mm
2 ans	330	257 – 402	2 ans	283	267 - 300
5 ans	547	407 – 687	5 ans	322	300 - 344
10 ans	713	500 – 925	10 ans	344	317 - 372
20 ans	887	586 – 1190	20 ans	364	332 - 397
50 ans	1130	691 – 1580	50 ans	388	348 - 428
100 ans	1340	766 – 1910	100 ans	404	359 - 450

III-4. Vérification des hypothèses appliquées aux débits maximums annuels

Les débits observés ont été soumis aux différents tests d'indépendance (Wald-Wolfowitz), de stationnarité (Kendall) et d'homogénéité (Wilcoxon) afin de vérifier l'hypothèse nulle (H_0) de la série chronologique (**Tableau 6**). Il ressort que l'hypothèse H_0 du test d'indépendance est acceptée à un niveau de signification de 5 %. Le test de stationnarité est rejeté à un niveau de signification de 5 % mais acceptée au seuil de 1 % avec une hypothèse nulle (H_0). Le test d'homogénéité de Wilcoxon est accepté sur la période (1981 - 2016). Par conséquent, ces données sont homogènes donc acceptables pour l'étude fréquentielle.

Tableau 6 : Résultats des tests d'hypothèses appliqués

Station	Test d'indépendance		Test de stationnarité		Test d'homogénéité	
	U	P-value	K	P-value	W	P-value
Soubré	1.81	0.0709	2.57	0.0102	1.46	0.145
Hypothèse H ₀	Acceptée		Rejetée (à 5 %)		Acceptée	

III-5. Ajustement graphique des débits maximums à l'exutoire du bassin de Soubré

La **Figure 7** présente les résultats de la comparaison graphique des ajustements des séries de débits extrêmes (maximums) avec le maximum vraisemblance de la loi Lognormale, la loi de Gumbel et Weibull à l'exutoire du bassin aménagé de Soubré. Il ressort de l'analyse de cette **Figure 7** que les débits maximums à l'exutoire de Soubré suivent correctement les différents modèles avec un intervalle de confiance de 95 % avec le maximum de vraisemblance. Cependant, le choix de la meilleure loi d'ajustement, s'est fait à travers les critères d'information d'Akaike (AIC) et d'information Bayésien (BIC) conformément à la méthode d'application (**Tableau 7**). Les résultats donnent la loi Lognormale comme la meilleure loi d'ajustement (**Figure 8**) des débits à la station de Soubré.

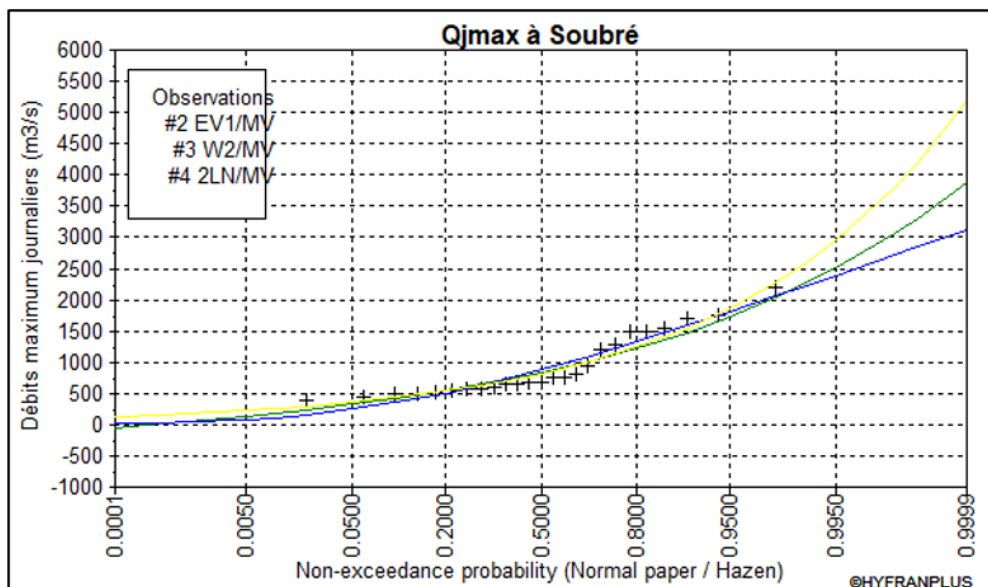


Figure 7 : Comparaison de l'ajustement graphique des débits avec les lois de Gumbel, Weibull, et Lognormale (Soubré)

Tableau 7 : Comparaison des lois d'ajustement à l'aide des critères d'information (Soubré)

Modèles (Maximum de vraisemblance)	Nombre de paramètres	Débit de retour	P(Mi)	P(Mi x)	BIC	AIC
Lognormal	2	2602.570	33.33	73.96	376.820	374.383
Gumbel	2	2283.232	33.33	20.50	379.387	376.949
Weibull	2	2227.903	33.33	5.54	382.004	379.566

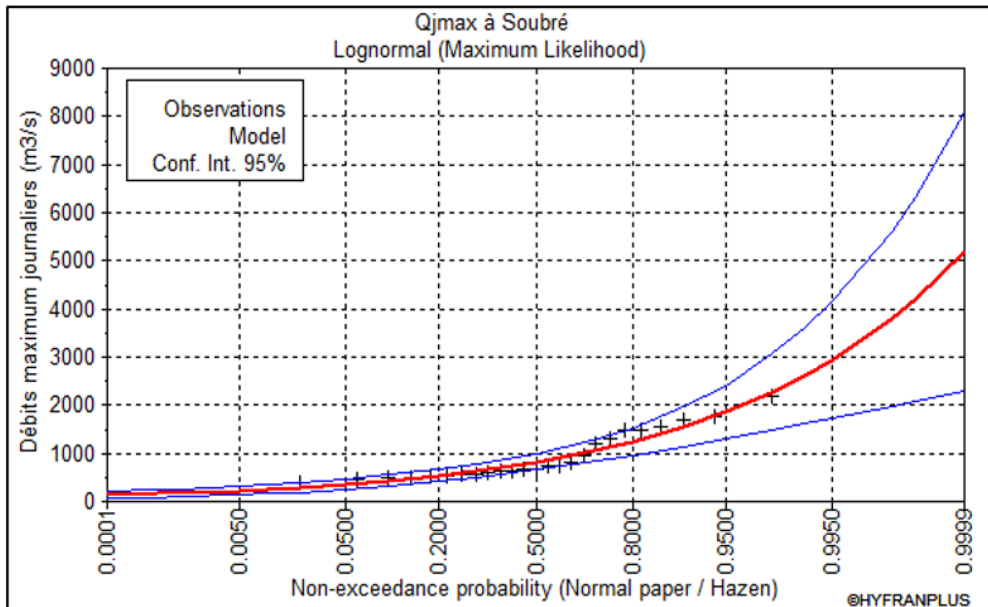


Figure 8 : Ajustement graphique des débits maximums journaliers avec les lois de Lognormale et Gumbel

Ainsi, la loi Lognormale peut être utilisée pour estimer les probabilités d'occurrence des débits de crues et leurs périodes de retour, donc estimer les quantiles de débits et leurs différentes périodes de retour dans le bassin versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.

III-6. Estimation des périodes de retour des débits journaliers maximums à l'exutoire de Soubré

Le *Tableau 8* présente les différentes périodes de retour et les intervalles de confiance qui permettent d'évaluer l'incertitude associée à ces estimations de débits de crue. Il ressort que les débits de crue (quantiles estimés) ayant une probabilité de survenir à l'exutoire du bassin aménagé du Sassandra à Soubré sont compris entre 819 m³/s et 2600 m³/s sur une période de retour allant de 2

à 100 ans. Les débits de crue ayant une chance tous les cinq (5) ans de survenir varient de 961 m³/s à 1530 m³/s. Les débits de crue ayant une probabilité d'apparition décennale varient également entre 1240 m³/s et 2150 m³/s. Pour un débit moyen annuel avoisinant 1000 m³/s (**Tableau 8**), on peut affirmer qu'à partir des débits de crue récurrentes (5 ans), les situations climatiques extrêmes telles que les inondations sont susceptibles de se manifester à l'exutoire du bassin à Soubré.

Tableau 8 : Période de récurrence des débits caractéristiques annuels à Soubré

Période retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Quantiles estimés (m ³ /s)	819	1240	1550	1850	2270	2600
Intervalle de Confiance (95 %) (m ³ /s)	659 - 979	961 - 1530	1140 - 1960	1290 - 2420	1480 - 3060	1610 - 3590

III-7. Relation entre intensités de pluie et débits estimés à l'exutoire du bassin aménagé de Soubré

Les différentes courbes d'intensité durée-fréquence des débits et des précipitations ont été réalisées afin d'analyser la relation pluie-débit relativement aux différentes périodes de retour. La **Figure 9** ci-dessous présente à cet effet, l'évolution comparée des précipitations et des débits à l'exutoire du bassin aménagé de Soubré ainsi que les périodes de retour de 2, 5, 10, 50 et 100 ans associés. Il ressort de la **Figure 9** que les débits de crue évoluent proportionnellement à la variation des maxima pluviométriques estimés à l'exutoire du bassin de Soubré. Les hauteurs de pluie de 300 mm, 350 mm et 400 mm engendrent des débits de crue respectifs de 1200 m³/s, 1700 m³/s et 2600 m³/s. Ces différentes hauteurs et débits caractéristiques à l'exutoire du bassin de Soubré correspondent aux périodes de récurrences respectives de 2 à 5 ans, 20 ans et 100 ans. Ces exceptionnels débits de crue confortés par l'effet de plusieurs paramètres du milieu engendrent des événements exceptionnels d'inondations correspondant aux précipitations. Les incidences de ces inondations sont souvent entre autres : la perte des récoltes avec ses corollaires, la perte de l'habitat, l'insécurité alimentaire, l'appauvrissement du monde rural par l'inaccessibilité aux zones d'activités, la dégradation des berges et des sols, le lessivage des terrains, etc.

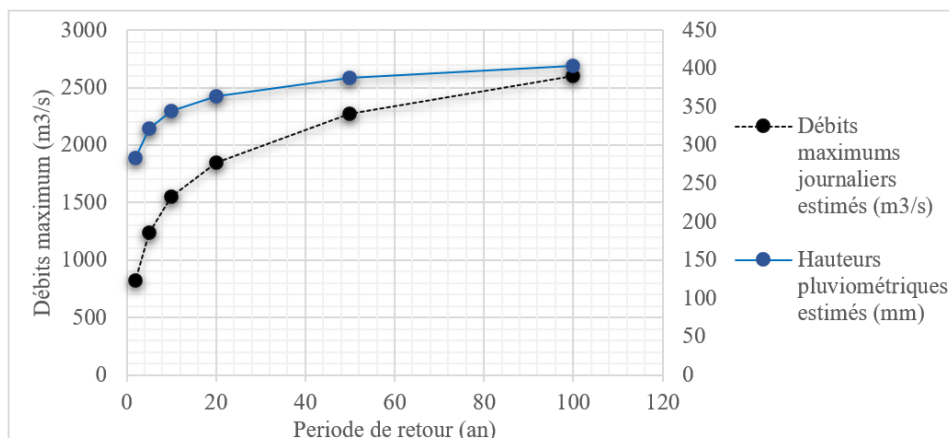


Figure 9 : Courbe d'évolution comparée pluie-débit et leur période de retour à l'exutoire du bassin de Soubré

IV-DISCUSSION

IV-1. Fréquence des débits maximums journaliers à l'exutoire du bassin de Soubré

L'analyse fréquentielle a l'avantage de prévenir la survenance des risques d'inondation fluviales dont l'intensité et la fréquence ont de graves conséquences environnementales, socio-économiques et humaines [13]. Les données de débits utilisées proviennent de la seule station météorologique de Soubré et ont respecté les exigences du nombre d'année d'observation, à savoir supérieur ou égale à 30 ans (1980-2019) comme le recommande les normes de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). En effet, l'OMM considère qu'une période de trente ans est assez longue pour éliminer les variations interannuelles [14]. Toute étude hydrologique est basée sur l'exploitation de séries de données recueillies pendant des périodes plus ou moins longues continues ou discontinues. Cette norme a été appliquée dans plusieurs travaux d'études hydro-pluviométriques similaires [15]. Les résultats de cette étude montrent que dans le bassin aménagé de Soubré, les quantiles de débits augmentent de façon proportionnelle à celle des périodes de retour retenues à savoir 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans. Lorsque ces périodes de retour augmentent, la valeur du quantile associé augmente. Il ressort des analyses que les quantiles de débits estimés ayant une probabilité de survenir varient de 819 m³/s à 2600 m³/s sur une période de retour allant de 2 à 100 ans, par exemple, les débits de crue ayant une chance tous les dix (10) ans de survenir oscillent entre 1140 m³/s et 1960 m³/s. En ce qui concerne la loi d'ajustement, les résultats montrent que la loi Log-normale s'ajuste au mieux aux séries de données avec

la méthode de maximum vraisemblance contrairement à la loi de Gumbel ou de Pearson III. Un constat identique à celui-ci a été fait dans le bassin versant du N'Zi-Bandama en Côte d'Ivoire [16]. L'auteur a porté son analyse sur les débits moyens d'étiage sur la période 1960 - 2016 par l'ajustement de la loi Log-normale avec une marge d'erreur de 1 à 5 %. Par conséquent, la loi de Gumbel couramment utilisée pour estimer les extrêmes de débits journaliers dans la région Ouest de l'Afrique n'est pas adaptée totalement à la zone Sud-ouest ivoirien.

IV-2. Fréquence des hauteurs pluviométriques maximums dans le bassin aménagé de Soubré

Tout comme les données de débits, la série de données pluviométriques a respecté les exigences du nombre d'année d'observation recommandé par les normes de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) [14]. Ces données sont issues des stations pluviométriques de Buyo en amont du bassin et Soubré à l'exutoire dudit bassin. Il ressort des analyses que les quantiles varient de 283 mm à 404 mm à la station Soubré pendant qu'elles oscillent entre 330 mm et 1340 mm au niveau de Buyo sur une période de retour de 2 à 100 ans. Egalement, les résultats de cette analyse fréquentielle des maximales pluviométrique montrent que lorsque les périodes de retour augmentent, la valeur du quantile associé augmente. Ce constat a été relevé au Bénin pour les maximales pluviométriques annuelles sur la période 1921 – 2001 à travers les données de 35 stations pluviométriques [17]. En outre, ces résultats sont proches de ceux d'une étude réalisée avec les maxima de pluies journalières à travers les stations de Soubré et San-Pédro dans le Sud-ouest de la Côte d'Ivoire [11]. Par ailleurs, les critères de comparaison d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC) ont montré que la loi Log-normale est la loi statistique la mieux appropriée pour décrire toutes les séries des maxima de pluies au niveau des différentes stations de Soubré et Buyo. Cette situation confirmerait le scepticisme de certains sur la prédominance de la loi de Gumbel pour l'estimation des quantiles hydro-pluviométriques auteurs [18, 19, 20]. Egalement, les quantiles estimés croissent proportionnellement au période de retour. Des constats homologues ont été faits par différents auteurs sur d'autres bassins versant en Afrique de l'Ouest [13, 21, 22]. Cependant, pour parvenir à ces résultats similaires, ces auteurs susmentionnés ont appliqué d'autres méthodes d'ajustement notamment la loi GEV, la loi de Gumbel ou la loi de Pearson III. Toutes ces lois d'ajustement sont différentes de celle adoptée dans cette étude. Ce qui traduit la non primauté d'une loi d'ajustement au détriment d'une autre comme déjà souligné plus haut. Enfin, la maîtrise et la connaissance de ces paramètres hydro-pluviométriques extrêmes s'avèrent plus qu'utiles pour la mise en place d'outils d'aide à la décision dans un contexte de prévision des risques climatiques [21] tels que les inondations dans le bassin anthropisé de Soubré.

V - CONCLUSION

L'analyse fréquentielle des données maximales hydro-pluviométriques (pluies et débits) à l'échelle du bassin versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré a été réalisée à partir des données des périodes 1980-2019 (débits) et 1989-2019 (pluie). Les hauteurs de pluies maximales mensuelles et les débits de crue proviennent des stations météorologiques de Soubré et Buyo. Les tests statistiques hydrologiques (stationnarité, indépendance et homogénéité) ont été effectués sur l'ensemble des séries de données de pluies et de débits avec un taux de signification de 1 à 5 %. On retient que les quantiles de débits de crue exceptionnelle ayant une probabilité de survenir varient entre 819 m³/s et 2600 m³/s sur une période de retour allant de 2 à 100 ans. En ce qui a trait aux précipitations, les quantiles estimés varient de 283 mm à 404 mm à la station de Soubré pendant qu'elles oscillent de 330 mm à 1340 au niveau de Buyo sur une période de retour de 2 à 100 ans. Cette étude a permis d'analyser les valeurs extrêmes de pluie et débit, facteurs de l'occurrence et la susceptibilité de survenance des risques d'inondations à l'exutoire de Soubré. Ces différents quantiles estimés ainsi que leurs périodes d'occurrence constituent un important moyen d'aide à la décision dans les processus de recherche des stratégies de lutte contre les risques hydro-climatiques en général et les inondations fluviales en particulier dans le bassin aménagé du fleuve Sassandra à Soubré.

RÉFÉRENCES

- [1] - GIEC, "Synthèse du sixième rapport de synthèse du GIEC-The Shifters", Mars 2023, (2023) 17 p.
- [2] - J. RENTSCHLER et M. SALHAB, "People in Harm's Way Flood exposure and poverty in 189 countries", Policy Research working paper, N° 9447 (2020) 28 p.
- [3] - A. FAYE, Q. LEJEUNE, M. B. SYLLA, O. NEYA, E. THEOKRITOFF et S. D'HAEN, "Points clés pour l'Afrique de l'Ouest du rapport spécial du GIEC sur le changement climatique et les terres", (2019) 21 p.
- [4] - V. M. SOROKOBY, "Etude hydrologique et hydrogéologique de la région de Soubré (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité climatique". Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan, (2013) 219 p.
- [5] - K. M. KOUASSI, K. L. KOUASSI, K. B. YAO, N. H. MELEDJE, J. BIEMI, T. R. LASME et R. NATHALIE, "Variabilité des extrêmes pluviométriques sur le bassin versant de la rivière Bia (Sud-Est, Côte d'Ivoire)", *European Scientific Journal January 2018* édition, Vol. 14, N°2 (2018) 134 - 147 p.

- [6] - CIMA Research Foundation, "Projet Intégrer la gestion des inondations et des sécheresses et de l'alerte précoce pour l'adaptation au changement climatique dans le bassin de la Volta, Rapport des consultations nationales en Côte d'Ivoire", (2021) 80 p.
- [7] - K. KOFFI, "Situation de l'hydroélectricité en Côte d'Ivoire". Atelier régional de la CEDEAO sur la petite hydroélectricité, Monrovia-Libéria du 16-20 Avril (2012) 28 p.
- [8] - H. CAMUS, "Hydrologie du bassin du Sassandra (Note préliminaire) ", Côte d'Ivoire : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Centre d'Adiopodoumé d'Abidjan, volume N°5/69 (1969) 79 p.
- [9] - P. MEYLAN et A. MUSY, "Hydrologie fréquentielle". Editions H.G.A Bucarest, (1999) 413 p.
- [10] - S. EL ADLOUNI et B. BOBBEE, "Analyse fréquentielle avec le logiciel HYFRAN-PLUS, Guide d'utilisateur", (2014), 71 p.
- [11] - W. N. AMAN, "Estimation des pluies maximales sur un, deux, trois, quatre et cinq jour (s) dans le sud-ouest ivoirien" Mémoire de Master des Sciences de Gestion de l'Environnement, Université Nangui-Abrogoua, (2015) 52 p.
- [12] - D. H. KOUMASSI, "Risques hydroclimatiques et vulnérabilités des écosystèmes dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri". Thèse de Doctorat Unique, Université d'Abomey-Calavi, (2014) 246 p.
- [13] - D. H. KOUMASSI, A. E. TCHIBOZO, E. VISSIN et C. HOUSSOU, "Analyse fréquentielle des évènements hydropluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin", *Afrique SCIENCE*, 10 (2) (2014) 137 - 148 p.
- [14] - ORGANISATION METEOROLOGIQUE MONDIALE, "Volume 1-Hydrologie - De la mesure à l'information hydrologique, Guide des pratiques hydrologiques" (Document OMM-N° 168, sixième édition) Genève, OMM, (2012) 322 p.
- [15] - A. M. KOUASSI, K. F. KOUAME, Y. B. KOFFI, K. B. DJE, J. E. PATUREL et S. OULARE, "Analyse de la variabilité climatique et ses influences sur les régimes saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire", *in European Journal of Geography*, (2010) <https://doi.org/10.4000/cybergeogeo.23388>, consulté le 04/10/2021
- [16] - A. M. KOUASSI, R. A. K. NASSA, K. E. KOUAKOU, K. F. KOUAME et J. BIEMI, "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/Journal of Water Science*, 32 (3) 207 - 220. (2019) <https://doi.org/10.7202/1067305ar>

- [17] - A. I. AGUE et A. AFOUDA, "Analyse fréquentielle et nouvelle cartographie des maxima annuels de pluies journalières au Bénin", *International Journal Biological and Chemical Sciences*, 9 (1) (2015) 121 - 133 p.
- [18] - D. KOUTSOYIANNIS, "On the appropriateness of the Gumbel distribution for modelling extreme rainfall. In Brath A., Montanari A. & Toth E. (Eds.): recent advances in peak.River flow modelling, prediction and real-time forecasting. Assessment of the impacts of land-use and climate changes. " Editoriale Bios, Castrolibero, Italy, (2004) 303 - 319 p.
- [19] - J. N. BACRO et A. CHAUCHE, "Incertitude d'estimation des pluies extrêmes du pourtour méditerranéen : illustration par des données de Marseille", *Journal des Sciences Hydrologiques*, 51 (3) (2006) 389 - 405 p.
- [20] - D. VENEZIANO, A. LANGOUSIS et C. LEPORE, "New asymptotic and preasymptotic resultson rainfall maxima from multifractal theory". *Water Resources Research*, 45 (11) WI (2009) 1421
- [21] - D. KOUNGBANANE, P. E. ZAHIRI, H. S. T. VODOUNON, E. AMOUSSOU, L. Y. LARE et H. D. N. KOUBODANA, "Analyse fréquentielle et détermination des seuils pluvio-hydrologiques de risques d'inondation dans le bassin-versant de l'Oti au Togo", *Afrique SCIENCE*, 17 (1) (2020) 73 - 88 p.
- [22] - D. J. KODJA "Indicateurs des évènements hydroclimatiques extrêmes dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou en Afrique de l'Ouest". Thèse de Doctorat en Géographie. Université Montpellier, Université d'Abomey-Calavi (Bénin), (2018) 288 p.
- [23] - S. BEUCHER et S. RODE, "L'aménagement des territoires face aux risques d'inondation : regards croisés sur la Loire moyenne et le Val-de-Marne", *Mappemonde*, 94 N° 2, (2009) 19 p.