

Analyse fréquentielle des évènements hydro-pluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin

Dègla Herve KOUMASSI^{1*}, A. Eric TCHIBOZO², Expedit VISSIN² et Christophe HOUSSOU³

*Laboratoire Pierre Pagny "Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement" (LACEEDE/UAC),
BP 922 Abomey Calavi, Cotonou, Bénin*

* Correspondance, courriel : kherd5@yahoo.fr

Résumé

L'Afrique de l'Ouest est l'une des régions du monde les plus vulnérables à la variabilité climatique. Selon les prévisions du Groupe Intergouvernemental d'Expert sur l'évolution du Climat GIEC (2001), certains phénomènes extrêmes augmenteront de fréquence et/ou d'intensité au XXI^e siècle en raison de l'évolution des moyennes climatiques et/ou de la variabilité du climat, et l'on peut donc s'attendre à ce que leurs incidences gagnent en ampleur avec le réchauffement de la planète. L'objectif de cette étude est de faire une analyse fréquentielle des phénomènes hydro pluviométriques dans le bassin de la Sota. L'approche méthodologique utilisée à consister à la collecte des données pluviométriques et hydrométriques. Les tests statistiques de base ont été effectués. Les différents modèles ou lois ont été testés afin de choisir le modèle le plus approprié. Les paramètres du modèle estimés ont permis de calculer les quantiles et les périodes de retour des évènements hydro pluviométriques extrêmes dans le bassin. Les résultats obtenus montrent que les crues récurrentes dans le bassin de la Sota varient entre 254 m³/s dans le sous bassin de Gbassè et de 285 m³/s dans le sous bassin de Coubéri. Les hauteurs de pluie les plus récurrents ont une valeur de 39 à 52m³/s suivant les stations.

Mots-clés : *analyse fréquentielle, hydro pluviométrique, climat, bassin de la Sota.*

Abstract

Frequentiel analyse of extreme hydropluviometric events iin the Sota basin of Benin

West Africa is one of the most vulnerable regions of the world to the climatic variability. According to the forecasts of the GIEC, some extreme phenomena will increase frequency and/or intensity in the XXI^e century because of the evolution of the climatic averages and/or the variability of the climate, and one can expect therefore that their impacts win in size with the global warming. The objective of this survey is to make a to analyze frequentielle of the phenomena hydro pluviométriques in the basin of the Sota. The methodological approach used to consist to the collection of the data pluviométriques and hydrométriques. The statistical tests of basis have been done. The different model or laws have been tested in order to choose the most suitable model. The parameters of the model estimated permitted to calculate the quantiles and the periods back from the évènements hydro extreme pluviométriques in the basin.

The gotten results show that the recurrent rises in the water level vary between 254 m³/s in the under basin of Gbassè and 285 m³/s the under basin of Couberi. The most recurrent heights of rain have a value of 39 to 52m³/s according to the station.

Keywords : *frequential, analysis, hydro, pluviometric, climate, basin of the Sota.*

1. Introduction

Les changements climatiques constituent l'un des plus grands défis auxquels l'humanité doit faire face au cours du XXI^e siècle. Ils constituent aujourd'hui une menace potentiellement majeure pour l'environnement et le développement durable. Les changements climatiques entraînent l'augmentation de la fréquence des événements hydro-climatiques. Le GIEC estime très vraisemblable (de 90 à 95 % de probabilité) que les chaleurs extrêmes et les événements de fortes précipitations continueront à devenir plus fréquents, plus intenses et surtout de plus en plus variables d'une année sur l'autre [1]. L'augmentation de la fréquence des événements extrêmes tels que les sécheresses, les inondations et les pluies très intenses avait été évoqués par plusieurs auteurs [2]. Ces phénomènes météorologiques et climatiques, extrêmes vont conditionner la vulnérabilité à l'égard des phénomènes extrêmes futurs en modifiant les écosystèmes déjà fragile [3]. Le nombre de catastrophes hydrométéorologiques (sécheresses, inondations, etc.) s'est considérablement amplifié au cours des dernières décennies [4].

De plus Selon le rapport du GIEC publié en février 2012, le réchauffement global va augmenter la fréquence et l'intensité des événements extrêmes avec notamment une multiplication des périodes de canicule et une extension des zones d'inondation et de sécheresse. Les communautés pauvres seront les plus vulnérables du fait de leurs capacités d'adaptation limitées et leur grande dépendance de ressources à forte sensibilité climatique telles que les ressources en eau et les systèmes de production agricole. L'Afrique de l'ouest, la région la plus pauvre du continent subira plus les des événements extrêmes. Le bassin de la Sota à l'instar des autres bassins du Bénin a connu plusieurs événements extrêmes liés aux variabilités climatiques actuelles. Ces perturbations deviennent de plus en plus fréquentes, intenses et génèrent des impacts importants sur les modes et moyens d'existences des populations. Ces impacts mettent les populations et leurs activités de développement en situation de vulnérabilité répétitive et croissante. L'objectif de la présente recherche est de faire une analyse fréquentielle des événements hydro-climatiques extrêmes dans le bassin de la Sota.

2. Présentation du milieu d'étude

Le bassin de Sota est situé au Nord-Est du Bénin. Il est localisé entre 9°54' et 11°55' de latitudes nord et entre 3°33' et 3°46' de longitudes est [5]. Il couvre une superficie de 13410 km², soit 11 % de la superficie du Bénin et regroupe les sous bassins de Sota à Gbassè (8300 km²) et de Sota à Coubéri (13410 Km²). Il est limité au nord par la vallée du Niger, au sud par les bassins de l'Ouémé et de l'Okpara, au Sud- est par le bassin de Mano à l'est par le bassin de Niger et à l'Ouest par le bassin de l'Alibori (*Figure 1*)

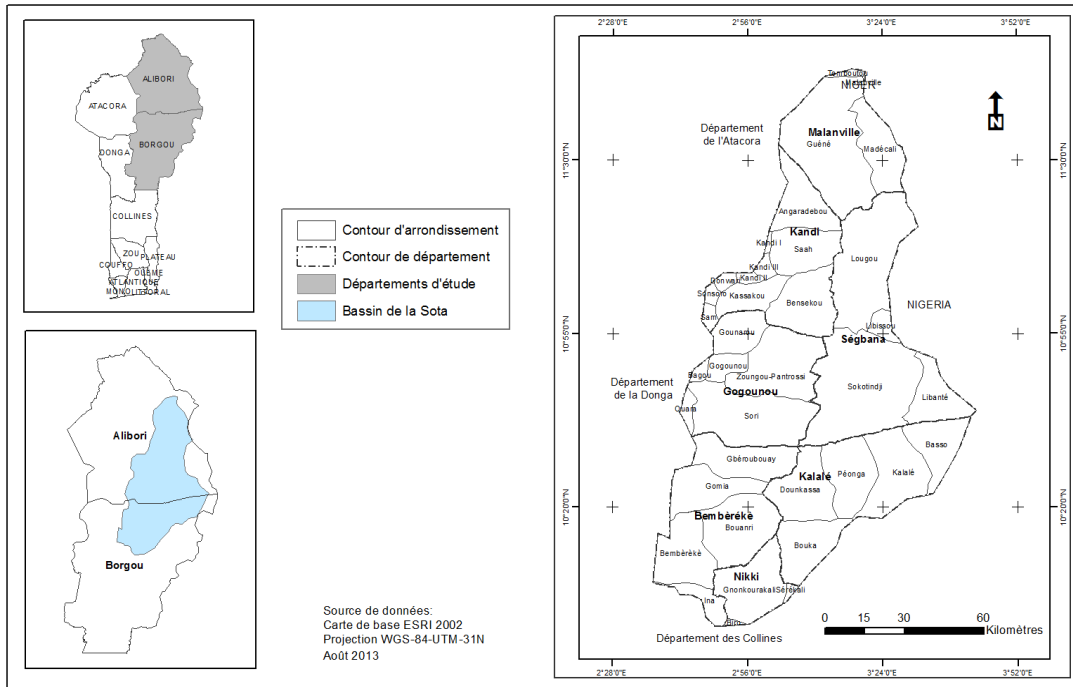


Figure 1 : Situation du bassin de la Sota

Le bassin de la Sota s'étend sur deux formations géologiques à savoir : les formations du socle et du grès sédimentaire de Kandi [6]. Sur ces formations géologiques coulent la Sota longue de 254 km ; la principale rivière du réseau hydrographique. Cette rivière reçoit successivement le Souamon sur sa rive gauche, le Tassiné (long de 102 Km avec une superficie de 3031 Km²), le Bouli (145 Km de long et 2380 Km² de superficie), l'Irané (55 Km de long et 1832 Km² de superficie), le Gouroukpa et la cascade de Sosso sur sa rive droite (Figure 2).

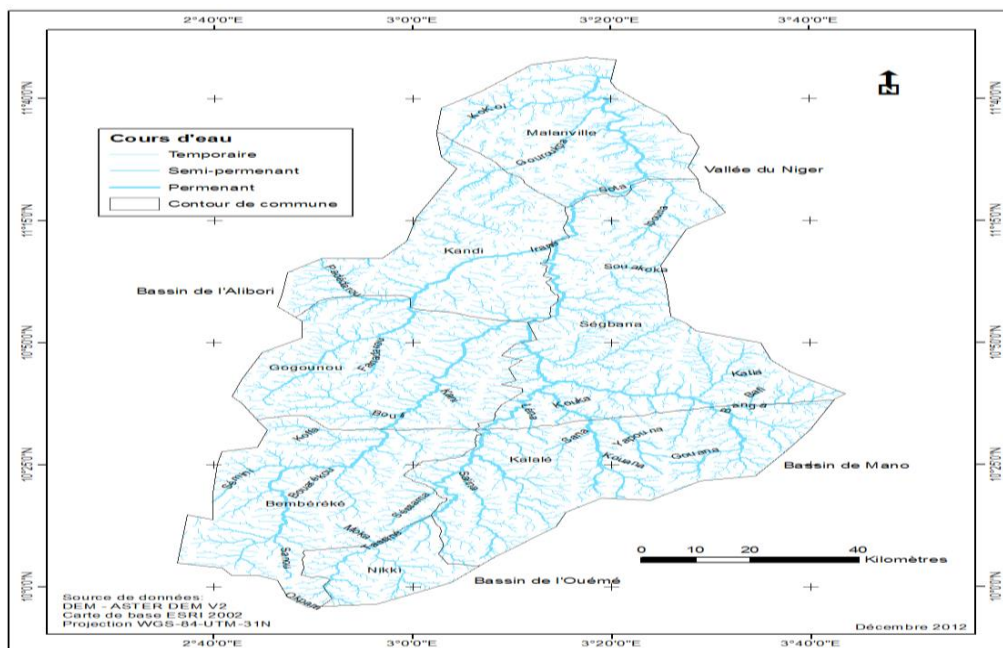


Figure 2 : Réseau hydrographique du bassin de la Sota

Le climat dans le bassin de la Sota est régi par les mécanismes de circulation de la mousson Ouest Africaine. Les phénomènes pluviogènes liés à la circulation atmosphérique au-dessus de l'Afrique de l'Ouest ont créé le climat tropical de type soudanien [7]. Ce climat est caractérisé par une saison sèche d'octobre à avril et une saison pluvieuse de mai à septembre. La moyenne interannuelle des précipitations de 1965 à 2008 dans le bassin est de 1036 mm à Coubéri et 1083 mm à Gbassè.

3. Méthodologie

L'étude des phénomènes climatiques et hydrologiques est une tâche assez délicate du fait des fluctuations saisonnières et interannuelles qu'elles peuvent revêtir. Ils sont complexes et dépendent d'un certain nombre de paramètres considérés comme aléatoires. Parmi ceux-ci, les précipitations et les débits sont les paramètres qui déterminent le plus l'évolution hydrologique. Etablir donc la fiabilité de ces données pour leur utilisation a souvent nécessité le recours à plusieurs méthodes.

3-1. Données utilisées

Les données utilisées dans la présente étude sont entre :

- des hauteurs de pluie journalières extraites de l'ensemble des stations qui sont situées sur et au voisinage du bassin. Elles sont obtenues à l'ASECNA et au LACEEDE de la période 1965-2008
- des débits journaliers des stations de Coubéri et de Gbassè obtenus à la DG Eau sur la période 1965-2008.

3-2. Technique de traitement des données

La technique de traitement des données utilisée dans la présente étude s'articule autour de la méthode d'analyse fréquentielle. C'est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future. L'analyse fréquentielle est utilisée, en particulier, pour estimer l'ampleur de l'événement temporel T_x auquel est associé un période de retour T (quantile de période de retour T ou de probabilité au dépassement $p = 1/T$). L'estimation T_x de la valeur du quantile s'obtient en ajustant une loi de probabilité $F(x; \Theta)$ à un échantillon de n observations $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, où Θ représente le vecteur de paramètres associé à la distribution de probabilité F . Pour estimer la probabilité d'apparition d'un évènement hydrométéorologique, on dispose d'une série de débits ou de série pluviométrique sur une période d'observation P_{obs} . Ensuite la série observée doit être échantillonnée pour sélectionner les valeurs maximales. Pour ce faire, les valeurs maximales des séries pluviométriques et des débits de pointe ont été extraites des stations pluviométriques et hydrométriques du bassin de la Sota. Pour que les résultats de l'analyse fréquentielle soient valides, les données utilisées doivent satisfaire certaines hypothèses de base. En effet, les données doivent être indépendantes homogènes et stationnaires. Ainsi les valeurs maximales des séries pluviométriques et des débits de pointe ainsi extraites sont soumises au test d'homogénéité de Wilcoxon [8], de stationnarité de Kendall [9] et d'indépendance de Wald-Wolfowitz [10].

3-2-1. Choix d'une loi statistique

L'ajustement d'une loi statistique à la série de débits échantillonnée ($q_1; q_2; \dots; q_N$) permet de prévoir la probabilité d'apparition d'une crue ou d'une précipitation à partir de la fonction de répartition de débits

ou des précipitations $FQ(.)$ ou de la densité de probabilité $f Q(.)$. Cet ajustement est fait sur la base d'un échantillon ordonné pour lequel une probabilité au dépassement p ou une probabilité au non dépassement q ($q = 1-p$) est calculée. Plusieurs formules empiriques existent pour calculer la probabilité au non dépassement des pluies ordonnées. Celle utilisée dans cette étude est la formule de Cunnane :

$$q = \frac{k - a}{n - 2a + 1} \quad (1)$$

où k est le rang des observations (classées de la plus faible à la plus élevée),

n est la taille de l'échantillon et

$a = 0,4$ (constante de la formule de Cunnane).

• à l'aide du modèle théorique fourni par la loi statistique ajustée, on procède à l'extrapolation qui permet d'obtenir les valeurs des quantiles (valeur de X_r pour une période de retour T). La relation entre la probabilité au non dépassement et la période de retour est:

$$T = \frac{1}{1 - q} \quad (2)$$

3-2-2. Choix du modèle fréquentiel

La validité des résultats d'une analyse fréquentielle dépend du choix du modèle fréquentiel et plus particulièrement de son type. Ce choix dépend de la vitesse à laquelle la probabilité des grandes valeurs évolue. Plusieurs lois statistiques sont utilisées en analyse fréquentielle. Parmi ceux-ci seulement deux répondent le mieux aux données dans le bassin de la Sota.

3-2-3. Loi de Gumbel

Un modèle fréquentiel très souvent utilisé pour décrire le comportement statistique des valeurs extrêmes est la distribution statistique de Gumbel (loi double exponentielle ou loi de Gumbel) [11]. La fonction de répartition de la loi de Gumbel $F(x)$ s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp\left(-\left(1 - c \frac{x - a}{b}\right)\right)^{1/c} \quad (3)$$

Où a est le paramètre de position, b le paramètre d'échelle et c le paramètre de forme et x la variable, ici les hauteurs de pluie et les débits. Le temps de retour T d'un événement est défini comme étant l'inverse de la fréquence d'apparition de l'événement, soit :

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

3-2-4. Loi de Pearson

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. En retenant toujours Q comme variable débit, et $u = a.Q$ comme variable réduite, avec $a = 1/s$, s'étant le paramètre d'échelle.

Dans ces conditions, la fonction de répartition s'écrit:

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

Avec la limite supérieure est de Q et celle inférieure 0 .

Avec λ est calculé à partir d'une fonction complexe:

$$g(\lambda) = \log Q_m - \sum \log \frac{Q_i}{N} \quad (6)$$

3-2-5. Ajustement du modèle fréquentiel

La technique d'ajustement utilisée est la méthode graphique. Cette méthode repose sur le fait que l'expression d'un quantile correspond à l'équation d'une droite. En conséquence, les points de la série à ajuster sont reportés dans un système d'axes $(x ; y)$. A partir de ce système d'axes, il a été alors possible de tracer la droite qui passe le mieux par ces points et d'en déduire les deux paramètres a et b définissant la loi. Les diverses étapes de l'analyse fréquentielle sont présentées sur la **Figure 3**.

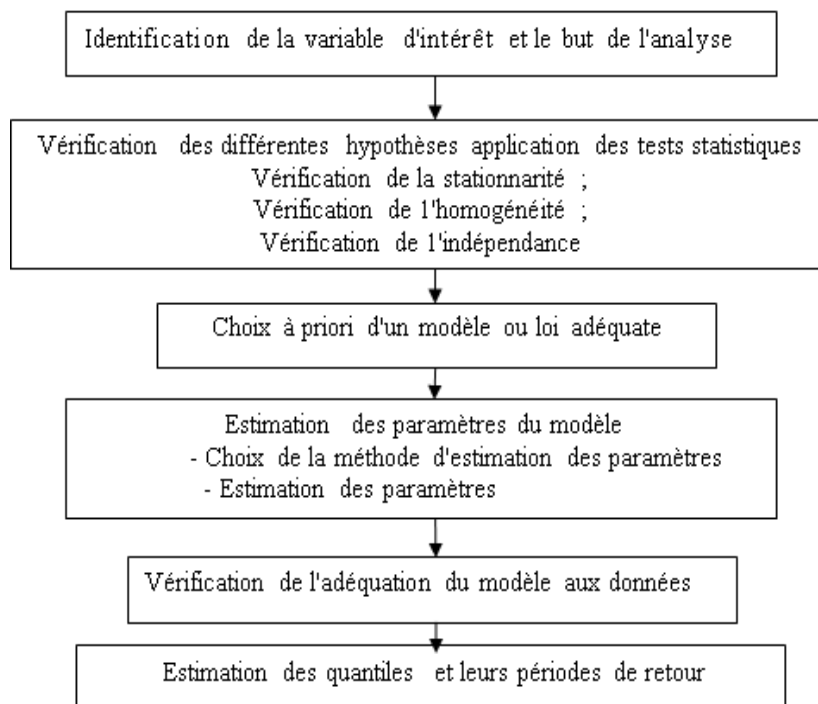


Figure 3 : Principales étapes de l'analyse fréquentielle

Source : Benyahy *et al*(2004)

4. Résultats

4-1. Analyse fréquentielle des débits maximaux dans les sous bassins de Sota

4-1-1. Vérification des hypothèses de base dans les débits maximaux

Le **Tableau 1**, montre les résultats des tests statistiques appliqués aux débits maximaux. L'analyse des données du **Tableau 1**, permet de constater qu'à un niveau de signification de 5 %, l'ensemble des débits de pointe sur les deux sous bassins obéit aux exigences, ceci nous permet de poursuivre la démarche de construction du modèle par l'analyse fréquentielle.

Tableau 1 : Résultats des tests statistiques appliqués aux débits maximaux à Sota

Stations	Test d'indépendance		Test stationnarité		Test homogénéité	
	U	P	K	P	W	P
Coubéri	2,51	0,012	0,173	0,862	1,36	0,172
Gbassè	1,35	0,178	1,39	0,163	1,50	0,133

Source: traitement des données

4-1-2. Ajustement aux lois des débits maximaux

La Figure 4 traduit un ajustement des séries hydrologiques par la loi de distribution de gumbel sur la période 1965-2008.

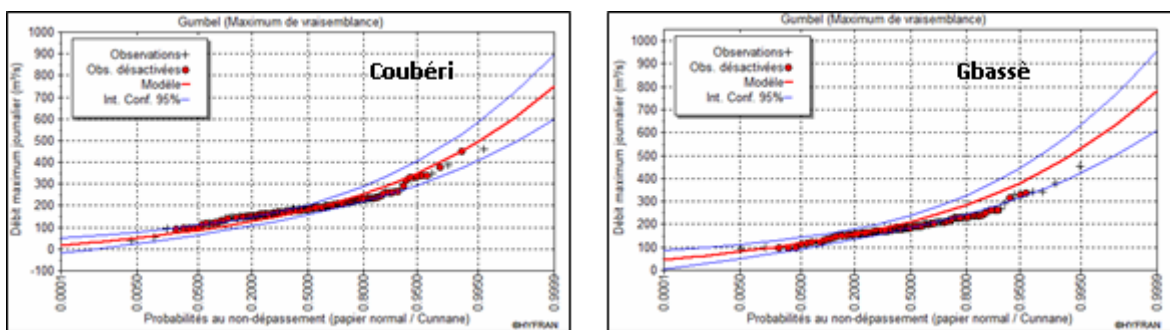


Figure 4 : Ajustement de la loi de gumbel au débit maximal à Coubéri et à Gbassè

De l'analyse des figures, il ressort que les débits de pointe s'ajustent bien aux lois de gumbel et de Log - Person III avec une marge d'erreur de 1 à 5 %. L'ajustement est dans son ensemble satisfaisant car la droite d'équation passe par les points expérimentaux. La loi de Gumbel peut éventuellement être utilisée pour estimer les probabilités d'occurrence des crues et leurs périodes de retour. A partir de l'équation de la droite de Gumbel, les quantiles des débits maximaux ont été calculés pour différentes périodes de retour et leurs intervalles de confiance (Tableau 2).

Tableau 2 : Estimation des débits caractéristiques et les intervalles de confiance par la loi de Gumbel

Stations	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	200 ans
Coubéri	212 [186-238]	285 [244-325]	333 [281-385]	380 [316- 444]	440 [360-519]	485 [393- 633]	529 [425-633]
Gbassè	181 [159-204]	254 [219-289]	302 [257-347]	348 [293- 404]	408 [339- 477]	453 [373-532]	497 [407- 587]

Source : traitement des données

L'analyse fréquentielle des débits journaliers maximums annuels estimé montre que la crue ayant une chance sur deux de subvenir en amont du bassin (Gbassè) à 186 et 238 m³/s et entre 159 et 204 m³/s en aval du bassin (Coubéri). Le débit moyen annuel dans les deux sous bassins de 30 m³/s dans la Sota à Coubéri et de 87 m³/s dans la Sota à Gbassè. Par analogie, les crues qui une chance sur cinq, pourrait

atteindre 254 m³/s dans le sous bassin de Coubéri et de 285 m³/s le sous bassin de Gbassè. Les débits de crues médianes et décennales sont à l'origine des inondations de plus en plus fréquentes observées dans le bassin.

4-2. Analyse fréquentielle des pluies maximales journalières bassins de Sota

4-2-1. Vérification des hypothèses de base dans les hauteurs de pluie maximales

Conformément à la méthodologie de l'analyse fréquentielle, il faut assurer l'indépendance, l'homogénéité et la stationnarité de la série [11]. Ainsi, les hypothèses d'indépendance, homogénéité et stationnarité ont été vérifiées. L'hypothèse d'indépendance a été validée à l'aide du test de Wald-Wolfowitz [8]. Les tests d'homogénéité et de stationnarité utilisés sont respectivement ceux de Wilcoxon [10] et de Kendal [11] (*Tableau 3*).

Tableau 3 : Résultats des tests statistiques appliqués aux débits maximaux à Sota

Stations	Test d'indépendance		Test stationnarité		Test homogénéité	
	U	P	K	P	W	P
	Stations pluviométriques					
Alfakoara	2,16	0,030	0,02	0,983	0,09	0,922
Bembéréké	2,41	0,015	0,41	0,678	1,07	0,280
Ina	0,122	0,903	2,57	0,010	3,12	0,001
Kalalé	3,68	0,001	3,06	0,002	3,83	0,00
Kandi	0,90	0,368	0,11	0,911	0,151	0,88
Malanville	0,53	0,531	0,769	0,442	0,44	0,659
Nikki	0,29	0,771	0,607	0,54	0,479	0,632
Ségbana	0,392	0,695	0,162	0,871	0,404	0,687

Source : traitement des données

Il résulte de l'analyse au niveau de signification de 1 à 5 % la majorité des stations obéit aux exigences de l'analyse fréquentielle. Toutefois, sur la station de Kalalé, les séries pluviométriques sont non indépendantes et non homogènes. Mieux, elles sont non stationnaires et non homogènes. Cet état de chose s'expliquerait par le taux de lacune élevé contenue dans les séries de pluies journalières sur cette station.

4-2-2. Ajustement aux lois des séries pluviométriques maximales

Après l'application des lois sur les séries pluviométriques maximales, deux lois s'adaptent le mieux. Il s'agit de la loi de Gumbel et de la loi log-Pearson Type III. Plusieurs méthodes existent pour ajuster les distributions statistiques aux échantillons. La méthode maximum de vraisemblance a été utilisée dans la présente étude pour ajuster les séries aux lois retenues. La *Figure 5*, illustre un ajustement des séries pluviométriques par la loi de gumbel et la loi log-Pearson Type III et sur la période 1965-2008.

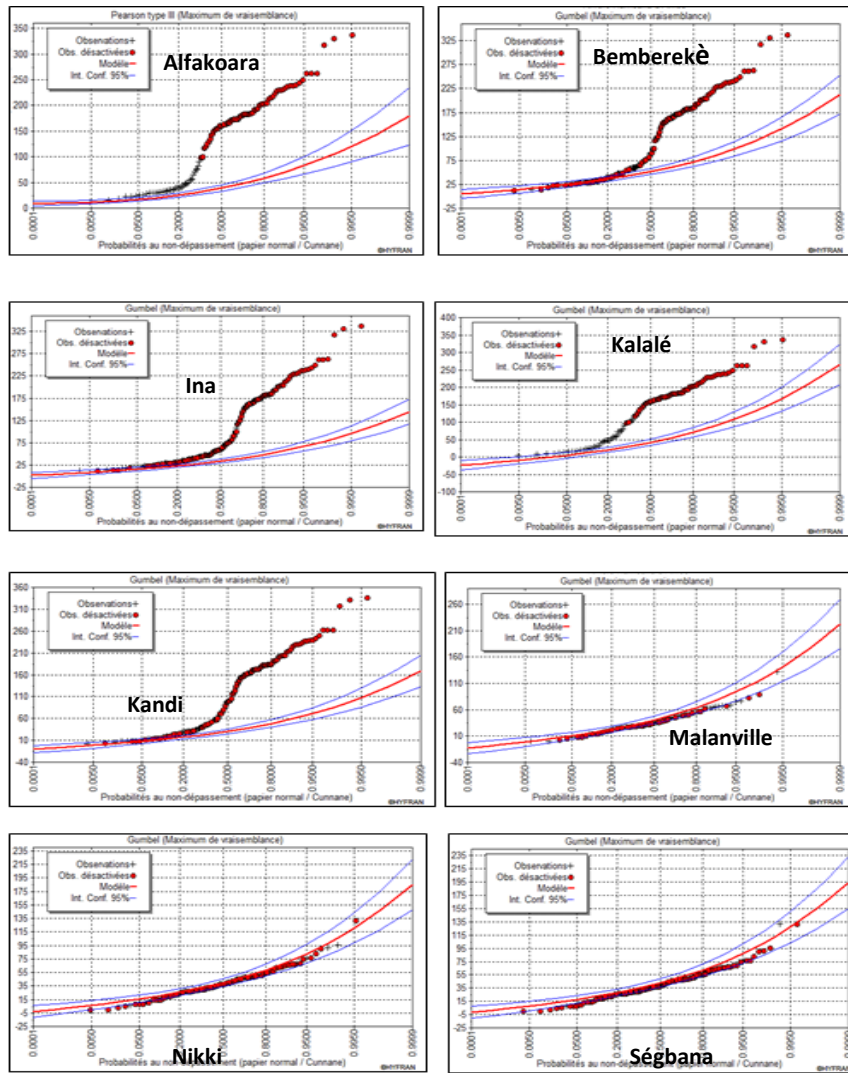


Figure 3 : Ajustement de la loi loi de Gumbel et la loi log-Pearson Type III sur les stations de la Sota

De l'analyse des figures, il ressort que toutes les séries pluviométriques s'ajustent bien aux lois de gumbel et de Log - Person III avec une marge d'erreur de 1 à 5 %. Néanmoins, il faut noter qu'au niveau des stations de Alfakoara, Bemberekè, Ina, Kalalé et de Kandi, l'incertitude devient élevé à partir des probabilités de non dépassement de 0,2 ou 0,5 selon les stations. Ces incertitudes liées à l'estimation de la probabilité d'apparition des pluies maximales sont dues à plusieurs facteurs qu'on peut regrouper en trois parties [12]:

- incertitudes liées à l'écart sur les mesures de la série pluviométriques ;
- incertitudes liées aux hypothèses c'est-à-dire les effets saisonniers trop marqués, non homogénéité des échantillons (Kalalé et Ina) ;
- incertitudes liées aux modèles statistiques d'échantillonnage ou la forme inadéquate des lois statistiques.

L'ajustement des pluies journalières aux tests statistiques a permis d'obtenir les quantiles estimés pour différentes périodes de retour (2, 5, 10, 20, 50, 100 et 200 ans). Les intervalles de confiance qui permettent d'évaluer l'incertitude associée aux estimations sont aussi fournis (*Tableau 4*).

Tableau 4 : Quantiles estimés sur les stations de la Sota

Stations	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	200 ans
Alfakoara	39 [33- 45]	58 [49- 69]	71 [58- 84]	83 [66- 100]	98 [76- 120]	109 [83- 136]	120 [90- 151]
Bemberebè	52 [45- 58]	72 [63- 82]	86 [73- 98]	99 [84- 114]	116 [97- 135]	128 [106- 150]	141 [116- 166]
Ina	34 [30- 38]	48 [41- 55]	57 [49- 66]	67 [56- 77]	78 [65- 91]	87 [72- 102]	96 [79- 113]
kalalé	41 [33- 50]	70 [57- 84]	89 [72- 107]	108 [86- 129]	131 [104- 158]	149 [118- 179]	166 [132- 201]
Kandi	30 [100 - 166]	4 [83- 183]	60 [75- 191]	71 [68 - 198]	86 [60 - 207]	97 [55 - 212]	108 [51 - 217]
Malanville	40 [33- 48]	64 [53- 75]	79 [65- 93]	94 [77- 111]	113 [92- 135]	128 [103- 152]	142 [114- 170]
Nikki	40 [33- 48]	64 [53- 75]	79 [65- 93]	94 [77- 111]	113 [92- 135]	128 [103- 152]	142 [114- 170]
Ségbana	43 [37- 49]	62 [53- 71]	75 [63- 88]	87 [73- 102]	103 [85- 121]	115 [94- 136]	127 [104- 150]

Source : traitement des données

De l'analyse de ce tableau, il ressort que les hauteurs de pluie journalière de 30 à 52 mm ont une chance sur deux de se produire tous les deux ans sur le bassin. De même, celles qui ont une chance sur dix de se produire varie entre 57 mm à Ina contre 89 mm à Kalalé. Les précipitations exceptionnelles dans le bassin sont celles dont les valeurs sont supérieures à 57 mm c'est-à-dire celles dont les périodes de retour sont supérieures à 10 ans. C'est ainsi qu'on peut considérer la pluie de 26 juin 1983 et 27 juin 1992 comme des événements exceptionnels qui avaient engendré des crues à Malanville.

5. Discussion

L'analyse des phénomènes hydro-pluviométriques extrêmes permet de connaître les quantiles de pluie et de débits afin de prévenir les risques hydrométéorologiques. Elle revêt un intérêt capital puisque des changements dans l'intensité et la fréquence des extrêmes climatiques ont des conséquences environnementales et socio-économiques [13]. Les résultats de la présente étude montre que les débits maximaux rares (≥ 50 ans ou = 100 ans) varient de 440 à 529 m³/s dans le sous bassin de Sota de Coubéri contre 408 à 497 m³/s à Gbassé. De même les débits ayant une faibles récurrence varient de 212 à 333 m³/s à Couberi et 181 à 302 m³/s à Gbassé Dans la même zone, d'autres auteurs [14] avaient estimé les débits rares en période humide à 557 à 623 m³/s dans le bassin de la Porga et 13 à 14 m³/s à Tiélé.

Cette différence de débit maximal entre la Sota et le Porga peut s'expliquer par la forte anthropisation du bassin de la Sota contre une faible emprise humaine de la Porga qui est d'ailleurs une zone protégée. De même, le substratum géologique et la couverture végétale contribuent également à la mobilisation de l'écoulement. Les crues les plus dévastatrices ayant une chance sur deux de se produire dans le bassin de la Sota ne dépasseraient pas 302 m³/s pendant que les rares par n'atteindront que 529 m³/s. Aussi les pluies journalières maximales intenses rares responsables de l'inondation ne seront que 142 mm.

La connaissance de ces paramètres est nécessaire pour pouvoir faire face aux risques que peuvent engendrer les inondations dans le bassin de la Sota et d'élaborer les outils permettant aux décideurs de mieux gérer ces situations [15]

6. Conclusion

L'analyse fréquentielle des données de précipitation maximales et des débits de pointe de la station de la Sota a été réalisée à partir de données journalières couvrant la période 1965-2008. Les hauteurs de pluie maximale journalière et des débits de pointe de chaque année ont été extraits sur chaque station. Les tests d'hypothèses de stationnarité et d'indépendance ont été concluants sur l'ensemble des séries pluviométriques maximales et les débits de pointe. Des quantiles estimés, on remarque que la période de retour de la hauteur de pluie journalière maximale et des débits de pointe varie de 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 200 ans. Les crues récurrentes varient entre 254 m³/s dans le sous bassin de Coubéri et de 285 m³/s le sous bassin de Gbassè. Les crues exceptionnelles c'est-à-dire rares ont un débit variant 440 et 529 m³/s à Gbassè et entre 408 et 497 m³/s à Coubéri. De même, les hauteurs de pluie les plus récurrentes ont une valeur de 39 à 52m³/s suivant les stations. Les hauteurs de pluie exceptionnelles varient entre 120 mm et 166 mm dans le bassin. Ces variables estimées constituent un important outil d'aide à la décision dans les processus de recherche des stratégies de lutte contre les risques hydro-climatiques en générale et les inondations en particulier.

Références

- [1] - J. POMERLEAU, "*Changements climatiques et sécurité en Afrique*"; centre universitaire de formation en environnement université de Sherbrooke, (2009), 99p
- [2] - M .BENISTON, J. RIAL, R.A. PIELKE, M. CLAUSSEN, J. CANADELL, P.COX, H. HELD, "*Nonlinearities, feedbacks and critical thresholds within the Earth's climate system*", Climatic Change, 65(1–2), (2007), pp.11–38.
- [3] - R. KATZ and B. BROWN, "*Extreme events in a changing climate: variability is more important than averages*", Climatic change 21 (3), (1992), 289–302
- [4] - C. DIOP, "*Rapport spécial IPCC sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique*", (2010), 18 p
- [5] - D MARTEAU, "*Gestion du risque climatique*", (2004) ,208p
- [6] - A .J. VODOUNNON, "*Impacts des systèmes cultureux sur la biodiversité, les états de surface et les écoulements dans le bassin-versant de la sota*", Mémoire de master 2, CIFRED/ UAC, (2009),94 pages
- [7] - E. W. VISSIN, "*Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger*", Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, Centre de Recherche de Climatologie CNRS-UMR 5210, (2007) ,286 pages
- [8] - K. S. ADAM and M. BOKO, "*Le Bénin*" EDICEF, Paris, (1993), 96 pages
- [9] - L. Le BARBE, G.ALE, B.MILLET, H.TEXIER, Y.BOREL, R.GUALDE, "*Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin*", Paris, ORSTOM, (1993),540 pages
- [10] - M. BOKO, "*Climats et communautés rurales du Bénin. Rythmes climatiques et rythmes de développement*", Thèse d'Etat, CRC/UB-Dijon, 2 volumes, (1988) ,608 pages
- [11] - F.WILCOXON, "*Individual comparisons by ranking methods*", Biometrics, 1, (1945), 80-83

- [12] - M.G.KENDALL, «*Rank Correlation Methods*» Charles Griffin, London, (1975)
- [13] - A.WALD, J. WOLFOWITZ, "An exact test for randomness in the nonparametric case based on serial correlation", *Annals of Mathematical Statistics*, (1943), 14, 378-388.
- [14] - P .MEYLAN and A.MUSY: "Hydrologie générale : Analyse fréquentielle", *annale revue hydrologie*, (1999), 19p
- [15] - N. D. VALENCIA, " *Risques naturels, aléa et vulnérabilité mécanique : cas de constructions en maçonnerie vis `à vis des s`séismes et inondations*". Thèse de Doctorat, université Marne la Vallée, (2006) 189 p
- [16] - A. KHALDI, (2005) : " *Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien " Monts de Tlemcen - Saida*". These de Doctorat Université d'Oran ;239 p
- [17] - V.S.H. TOTIN, W.E. VISSIN, A. AFOUDA, J. TUMBULTO et M. BOKO, " *Evénements hydroclimatiques extrêmes et disponibilité en eau de surface dans le bassin béninois de la Volta*"(2011) ,21E, 4p
- [18] - L Benyahya, D Anik, C Daniel, B Dan, H André St. " *Caractérisation du régime naturel du débit des bassins versants de l'Est du Canada*". Rapport de recherche . (2009): 67p