ANALYSE FREQUENTIELLE DU FLEUVE BIA POUR UNE GESTION PREVENTIVE DES CRUES EN AVAL DU BARRAGE D'AYAME 1

FREQUENCY ANALYSIS OF THE BIA RIVER FOR PREVENTIVE MANAGEMENT OF FLOODS DOWN THE AYAME 1 DAM

LIONEL ARNAUD N'CHO

Doctorant, Institut de Géographie Tropicale (IGT)

Laboratoire de Géographie de l'environnement et des Risques (LAGERIS)

Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan Côte d'Ivoire Email : nokilac@outlook.com

ANDRÉ DELLA ALLA

Maître de Conférences, Institut de Géographie Tropicale (IGT)

Laboratoire de Géographie de l'environnement et des Risques (LAGERIS)

Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan Côte d'IvoireEmail : gnalladella@gmail.com

ALEXIS LOUKOU BROU

Doctorant, Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE)

Université Lorougnon Guédé, Daloa Email : brou.alexis@ujilg.edu.ci

Résumé

Le fleuve Bia, au Sud-Est de la Côte d'Ivoire, vit au rythme de deux principaux apports : les précipitations et les rivières annexes. Son bassin versant est fortement drainé et le climat subéquatorial de la région a une influence majeure sur le comportement du fleuve. Les aménagements hydrauliques qu'a connus la Bia dans la sous-préfecture d'Ayamé ont depuis perturbé à leur tour son comportement. Le lac, né de la construction du barrage d'Ayamé 1, contribue aux débordements sur les berges de la retenue en amont du barrage et aux crues en aval. Les pluies sont récurrentes dans le bassin et suivies de près à la station d'Ayamé. Pour des données d'entrée de 1980 à 2013, l'étude fréquentielle du fleuve révèle qu'une pluie extrême de 325 mm pourrait se produire tous les 2 ans avec une probabilité d'occurrence de 0,50. Des lois de probabilité utilisées, seule la loi de Gumbel s'applique mieux à notre zone d'étude.

***Mots-clés** : Côte d'Ivoire, Ayamé, fleuve Bia, pluie, analyse fréquentielle.*

Abstract

The Bia River, in the south-east of Côte d'Ivoire, stands on two main inputs: rainfall and related rivers. Its watershed is heavily drained and the subequatorial climate of the region has a significant impact on the behavior of the river. The hydraulic developments experienced by Bia in the sub-prefecture of Ayamé have disturbed its behavior. The lake, issued from the construction of the Ayamé 1 dam, leads to overflows on the banks of the reservoir upstream of the dam and flooding downstream. The rains are recurrent in the basin and closely monitored at the Ayamé station. The frequency study based on 1980-2013 data of the river revealed that

an extreme rainfall of 325 mm could occur every 2 years with a probability of occurrence of 0.50. Among probability laws applied, only Gumbel's law better fits to our study area.
***Keywords**: Ivory Coast, Ayamé, Bia River, rain, frequency analysis*

Introduction

Le département d'Aboisso fait partie des régions les plus drainées en Côte d'Ivoire. Il bénéficie de trois principaux plans d'eau (lac d'Ayamé, lac de Bakro et lagune Aby) et de plusieurs cours d'eau qui se jettent dans la Bia, le fleuve le plus important du département qui coule vers la lagune Aby au sud. C'est sur le cours de ce fleuve qu'a été construit le premier barrage hydroélectrique de la Côte d'Ivoire en 1959. Bien que des déversements soient faits chaque année pour réguler le niveau de l'eau dans le réservoir du barrage, des lâchers d'eau forcés se font, en cas de pluie exceptionnelle, pour la sécurité du barrage. Pour prévenir de tels événements extrêmes qui ne sont pas sans dommage en aval du barrage, des modèles mathématiques sont utilisés. De ces modèles découlent des lois telles que Gumbel, GEV et Weibull.

La présente étude, s'appuyant sur la loi de Gumbel, a pour objectif de prévenir une catastrophe due à une montée brutale de la Bia. En effet, la construction du barrage d'Ayamé 1 a nécessité la création d'un lac qui est alimenté par les rivières ainsi que par les précipitations qui sont souvent fortes dans la région. De ce fait, elles font monter parfois le niveau de l'eau jusqu'à atteindre une côte de 91,20 m pour un barrage dont la retenue maximale est de 90,50 m. Ainsi, une crue extrême pourrait mettre en mal la sécurité du barrage d'Ayamé 1 et provoquer des inondations en aval où l'occupation humaine est marquée.

1. Matériels et méthodes

1.1. Zone d'étude

Le département d'Aboisso fait partie de la Région du Sud-Comoé, située au sud-est de la Côte d'Ivoire. La zone d'étude est comprise entre 5°21 et 6°15 de latitude nord et 3°03 et 3°21 de longitude ouest (figure 1). Elle appartient au bassin versant de la Bia dont le réseau hydrographique draine les eaux depuis le Ghana voisin. C'est une région aux potentialités économiques énormes qui a bénéficié de grands projets de développement dont la construction de deux barrages hydroélectriques (Ayamé 1 et 2) et la création de grandes parcelles agricoles.

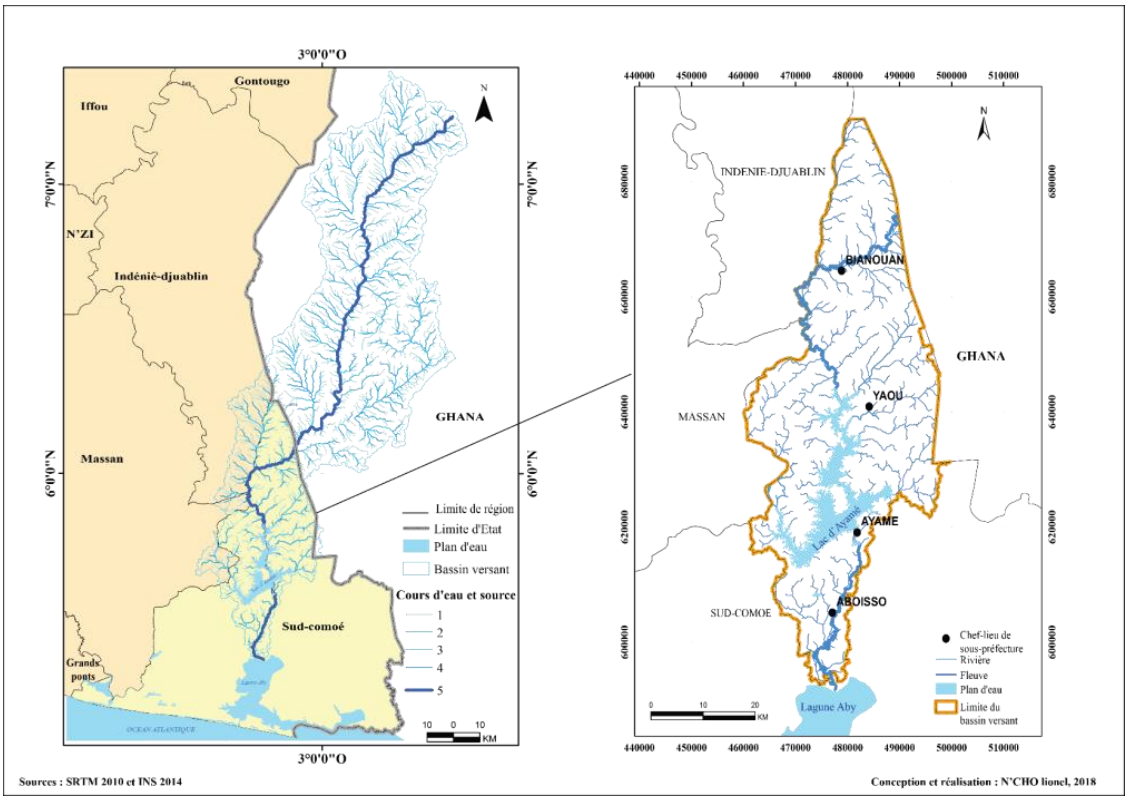


Figure 1. Présentation de la zone d'étude

1.2. Matériels et données utilisés

L'analyse fréquentielle nécessite la manipulation des données statistiques et ne peut se faire sans outils et matériels adéquats.

Le logiciel HYFRAN-PLUS, conçu pour l'analyse fréquentielle en hydrologie, en particulier pour les valeurs extrêmes, est le principal outil utilisé pour conduire cette étude. À HYFRAN-PLUS ont été associés le tableur Excel qui a permis de faire ressortir les pluies moyennes dans les trois stations du bassin versant de la Bia (Aboisso, Ayamé et Bianouan) et les pluies maximales pour l'analyse fréquentielle ainsi que le logiciel ArcGis 10.2 qui a servi à la réalisation des cartes de présentation de la zone d'étude et de répartition des pluies moyennes annuelles dans le bassin de la Bia.

Deux types de données sont nécessaires pour cette étude : les données pluviométriques et une image satellite. Cependant, pour l'analyse de la relation entre température et pluie à Ayamé où se trouve le lac du barrage, on a fait appel aux données de température locales.

Les données pluviométriques sont issues de deux sources avec deux pas de temps. La première source est la SODEXAM[1]pour l'étude des pluies moyennes annuelles dans les trois stations, entre 1997 et 2015. La seconde source est la station du barrage d'Ayamé 1, pour le calcul des périodes de retour de pluies extrêmes dans le bassin ivoirien de la Bia. Ces données couvrent un pas de temps plus long (1980-2013). Quant aux données de température utilisées, ce sont celles de 1997 à 2015 fournies par la SODEXM.

L'image satellite SRTM 30 m de résolution, téléchargée sur le site de la NASA (www.earthexplorer.usgouv.org), a permis de délimiter le bassin versant de la Bia et de hiérarchiser le réseau hydrographique.

1.3. Méthode d'analyse fréquentielle

Un des outils de base de l'analyse de l'occurrence d'événements extrêmes est l'analyse fréquentielle. Cette méthode statistique a comme objectif principal d'utiliser des mesures d'événements passés pour estimer les probabilités futures d'occurrence (N. E.H.Mélèdje, 2016, p.57). L'analyse fréquentielle est utilisée, en particulier, pour estimer l'ampleur de l'événement temporel X_T auquel est associée une période de retour T {quantile de période de retour T ou de probabilité au dépassement (p=1/T). Ainsi, les pluies maximales enregistrées à la station d'Ayamé 1, de janvier à décembre sur la période 1980-2013, ont été extraites.

En attribuant une probabilité d'occurrence à une grandeur physique telle que la pluie extrême, l'analyse fréquentielle fournit un outil remarquable d'aide à la décision aux gouvernants (P. Meylan, A-C. Favre et A. Musy, 2008, cités par G. E. Soro, 2011, p.46)

L'estimation X_T de la valeur du quantile s'obtient en ajustant une loi de probabilité F(x ; Θ) à un échantillon de n observations x = {x_1,…,xn}, où Θ représente le vecteur de paramètre associé à la distribution de probabilité F.

Pour V. T. CHOW (1953) cité par N. E. H. MELEDJE (2016, p.58), un minimum de 20 années d'observations est en principe nécessaire pour établir une extrapolation fiable.

Les principales étapes de l'analyse fréquentielle sont :

1. La vérification des hypothèses de base :
   - homogénéité (les données proviennent d'un échantillon homogène, donc il n'y a pas de différence significative dans la moyenne des sous-échantillons) ;

[1]Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique

- stationnarité (pas de tendance à la hausse ou à la baisse dans la chronique des données) ;
- indépendance (pas d'auto-corrélation dans les séries).

2. L'ajustement d'une distribution statistique à l'échantillon. 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 qui est utilisée dans cette étude est la formule de Cunnane: $\boldsymbol{q = \frac{k-q}{n-2q+1}}$ où *k* est le rang des observations (classées de la plus faible à la plus élevée), *n* est la taille de l'échantillon et *q=0,4* (constante de la formule de Cunnane).
3. 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_T pour une période de retour T).

La relation entre la probabilité au non-dépassement et la période de retour est : $\boldsymbol{T = \frac{1}{1-q}}$

M. LANG (2008, p.2) pense que le maximum d'un nombre suffisamment grand de variables aléatoires converge en probabilité vers la loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV). Les hypothèses d'indépendance, de stationnarité, d'homogénéité et de caractère aléatoire ne sont que partiellement vérifiées en hydrologie. Il propose trois lois : Weibull, Frechet et Gumbel.

1.3.1. Choix des modèles statistiques

Le choix des différents modèles statistiques retenus pour l'ajustement des maxima annuels (MAXAN) repose sur des considérations théoriques (G. E. Soro, 2011, p.94) et les recommandations des travaux antérieurs en la matière (A. Muller, 2006, p.165 ; A. Goula, B. Konan, T. Brou, I. Savané, V. Fadika et B. Srohourou, 2007, p.51; G. E. Soro, 2011, p.54).

Les modèles statistiques retenus à priori pour l'ajustement des variables des pluies journalières extrêmes sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Modèles statistiques présélectionnés pour l'ajustement des pluies extrêmes

Mode échantillonnage	Modèle statistique	Fonction de densité de probabilité	Paramètres
MAXAN	GEV-EV1 (loi de Gumbel)	$f(x)=\frac{1}{\alpha}\exp\left[-\frac{x-u}{\alpha}-\exp\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]$	α,u
	GEV-EV2 (loi de Fréchet)	$f(x)=\frac{1}{\alpha}\left(1-\frac{x-u}{\alpha}\right)\exp\left\{-\left[1-k(x-u)/\alpha\right]^{\frac{1}{k}}\right\}$	α,u,k
	GEV-EV3 (loi de Weibull)	$f(x)=\frac{1}{\alpha}\left(1-\frac{x-u}{\alpha}\right)^{\frac{1}{k}-1}\exp\left\{-\left[1-k(x-u)/\alpha\right]^{\frac{1}{k}}\right\}$	α,u,k
	LN2 (loi Lognormale 2)	$f(x)=\frac{1}{x\sigma\sqrt{2\Pi}}\exp\left\{-\frac{(\ln x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$	σ,μ
	P3 (loi Pearson type 3)	$f(x)=\frac{\alpha^{\lambda}}{\Gamma(\lambda)}(x-m)^{\lambda-1}e^{-\alpha(x-m)}$	α,λ,m

G. E. Soro (2011, p.54) a montré que plusieurs études comparatives tant empiriques que théoriques ont été menées, afin de déterminer dans quelles circonstances une méthode d'estimation des paramètres est plus efficace pour un modèle statistique donné.

Ainsi, l'estimateur du maximum de vraisemblance a été retenu dans le cadre de la présente étude. Ce choix se justifie par le fait que l'estimateur de maximum de vraisemblance a l'avantage de produire une faible variance d'échantillonnage des paramètres estimés et, par conséquent, une faible variance des quantiles (P. Meylan, A-C. Favre et A. Musy, 2008, p.123; G. E. Soro, 2011, p.54).

La méthode du maximum de vraisemblance consiste en effet à trouver l'ensemble des paramètres qui, compte tenu de la loi de probabilité retenue, maximise la probabilité d'obtenir les valeurs observées de l'échantillon.

1.3.2. Critères de comparaison

Le choix de la loi statistique qui s'ajuste le mieux dans la zone d'étude est basé sur deux types de critères de comparaison : les critères de comparaison graphique et les critères de comparaison numérique.

1.3.2.1. Critères de comparaison graphique

Les critères de comparaison graphique sont un ensemble de méthodes graphiques mises en œuvre pour déterminer la classe de distribution la plus adéquate pour estimer les quantiles de période de retour élevée. Ils consistent à comparer les résultats de plusieurs ajustements différents à l'aide d'un graphique sur papier de probabilité normal. Pour notre étude, trois lois ont été appliquées : Gumbel, Weibull et GEV (loi Généralisée des Valeurs Extrêmes). L'application de ces lois permet d'apprécier celle qui s'adapte au mieux à une série chronologique de pluies.

1.3.2.2. Critères de comparaison numérique

Pour comparer les modèles statistiques par critères de comparaison, l'on se fixe des probabilités à priori égales pour toutes les distributions. Ensuite, l'on spécifie une période de retour (T). Ainsi, la probabilité à posteriori est calculée à partir de la probabilité à priori. Le Critère d'Information Bayésien (*BIC*) et le Critère d'Information d'Akaike (*AIC*) sont aussi calculés à partir des équations suivantes :

$$BIC = -2\,log(L) + 2 \qquad (1)$$

$$AIC = -2\,log(L) + 2klog(n) \qquad (2)$$

Avec : L : la vraisemblance ; k : nombre de paramètres ; n : taille de l'échantillon.

Le meilleur modèle statistique est celui dont les valeurs de *AIC* et *BIC* sont faibles et la probabilité à posteriori est la plus appropriée (G.E. Soro, 2011, p.54).

1.4. Traitement des données

Pour l'analyse fréquentielle, les données des précipitations collectées à la station d'Ayamé 1sont consignées dans le tableur Excel de la suite *Microsoft Office*, puis prétraitées.

Le prétraitement consiste à extraire le maximum des pluies dans chaque année sur les 33 ans. Le résultat du prétraitement est ensuite intégré à HYFRAN-PLUS pour l'analyse fréquentielle.

Dans HYFRAN-PLUS, on entre d'abord le titre du projet qui sera le titre des graphiques produits par HYFRAN-PLUS, puis on colle les données prétraitées. On inscrit ensuite le nom de la variable qui apparaîtra comme le titre d'un des axes des graphiques (l'abscisse ou l'ordonnée), selon le graphique demandé. Enfin, on inscrit l'unité de mesure des observations qui est indiquée à la suite du nom de la variable sur les graphiques.

Le traitement se poursuit avec la réalisation des opérations suivantes :

- un clic sur l'onglet graphique pour exporter le graphique ;
- un clic sur l'onglet ajustement pour choisir la loi d'ajustement (GEV, Weibull, Gumbel) ;
- pour chaque loi choisie, un clic sur l'onglet graphique pour chaque fois exporter le graphique obtenu. En restant sur la fenêtre graphique, on clique une fois encore sur l'onglet ajustement, puis sur l'onglet comparaison et critères. Cette dernière opération permet de faire la comparaison par critères en soutien à la comparaison graphique.

Pour la répartition spatiale des précipitations annuelles dans le bassin, les données pluviométriques des trois stations (Bianouan, Ayamé et Aboisso) sont prises en compte. Après une étape de prétraitement (extraction des pluies moyennes annuelles sous Excel), on effectue une interpolation des données des trois stations sous Arc gis 10.2.

Enfin, pour la relation pluie/température à Ayamé, les totaux annuels des pluies et des températures enregistrées de 1997 à 2015 sont exprimés en graphiques combinés sous Excel, avec les pluies en bande et les températures en courbe.

2. Résultats

2.1. Répartition spatiale des précipitations moyennes annuelles

Dans le bassin versant de la Bia, les précipitations varient très peu. Les pluies moyennes enregistrées dans les stations d'Aboisso, Ayamé 1 et Bianouan de 1997 à 2015 sont comprises entre 1269 et 1299 mm. Les nuances spatiales indiquent qu'au fur et à mesure qu'on s'éloigne du littoral, la pluviométrie baisse (figure 2). Mais, les différences ne sont pas très significatives. En effet, les stations d'Ayamé 1 et d'Aboisso, plus au sud du bassin, enregistrent des quantités de pluies de l'ordre de 1296 à 1299 mm ; celle de Bianouan, dans la partie nord du bassin, compte des précipitations moyennes annuelles de 1269 à 1279 mm.

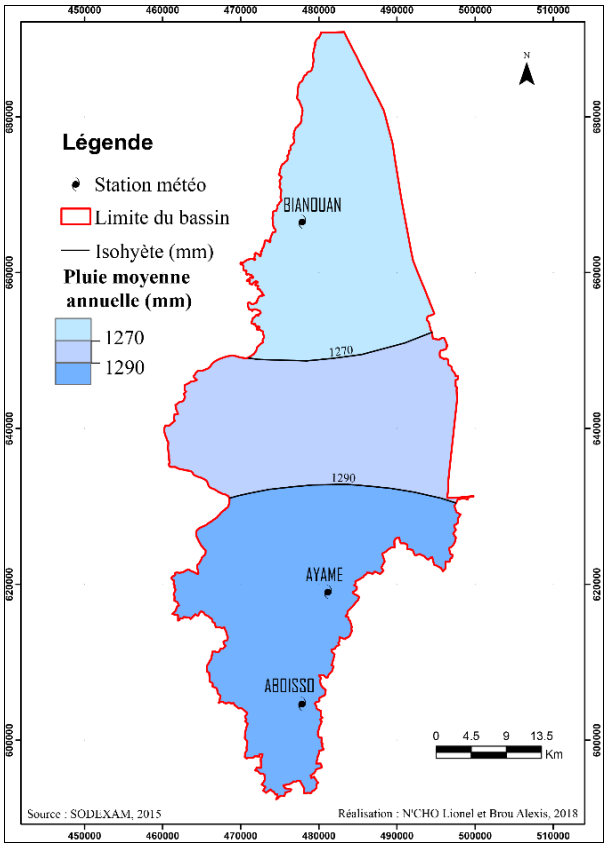


Figure 2. Variation des pluies moyennes annuelles dans le sous-bassin de la Bia

2.2. Analyse des températures et des pluies de 1997 à 2015 à Ayamé

La ville d'Ayamé est située en zone de collines et de forêt, siège d'une intense évapotranspiration, synonyme de pluviométrie abondante. La zone a reçu des précipitations supérieures à 1000 mm sur 18 années successives (1997-2015). Au cours de cette période, un maximum de pluies supérieur à 1500 mm est observé en 1999 (figure 3). Dans la même année, la température moyenne, comprise entre 25 et 26 $^{\circ C}$, n'a baissé que légèrement. De 2001 à 2006, les températures restent constantes, puis font une première hausse sur 2 ans (2006-2008) ; ce qui influence les pluies qui vont aussi augmenter. Après une baisse de la température et des précipitations en 2009, suivie d'une remontée en 2010, la période 2011-2015 s'inscrit dans une chute continue en général, tant au niveau des températures que des précipitations.

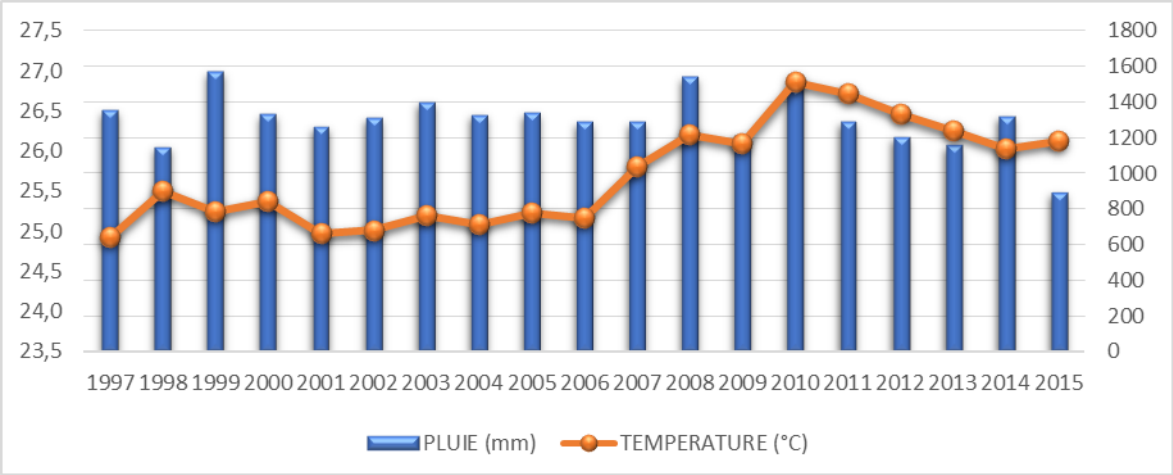


Figure 3 : Variation des pluies et des températures de 1997 à 2015 à la station d'Ayamé

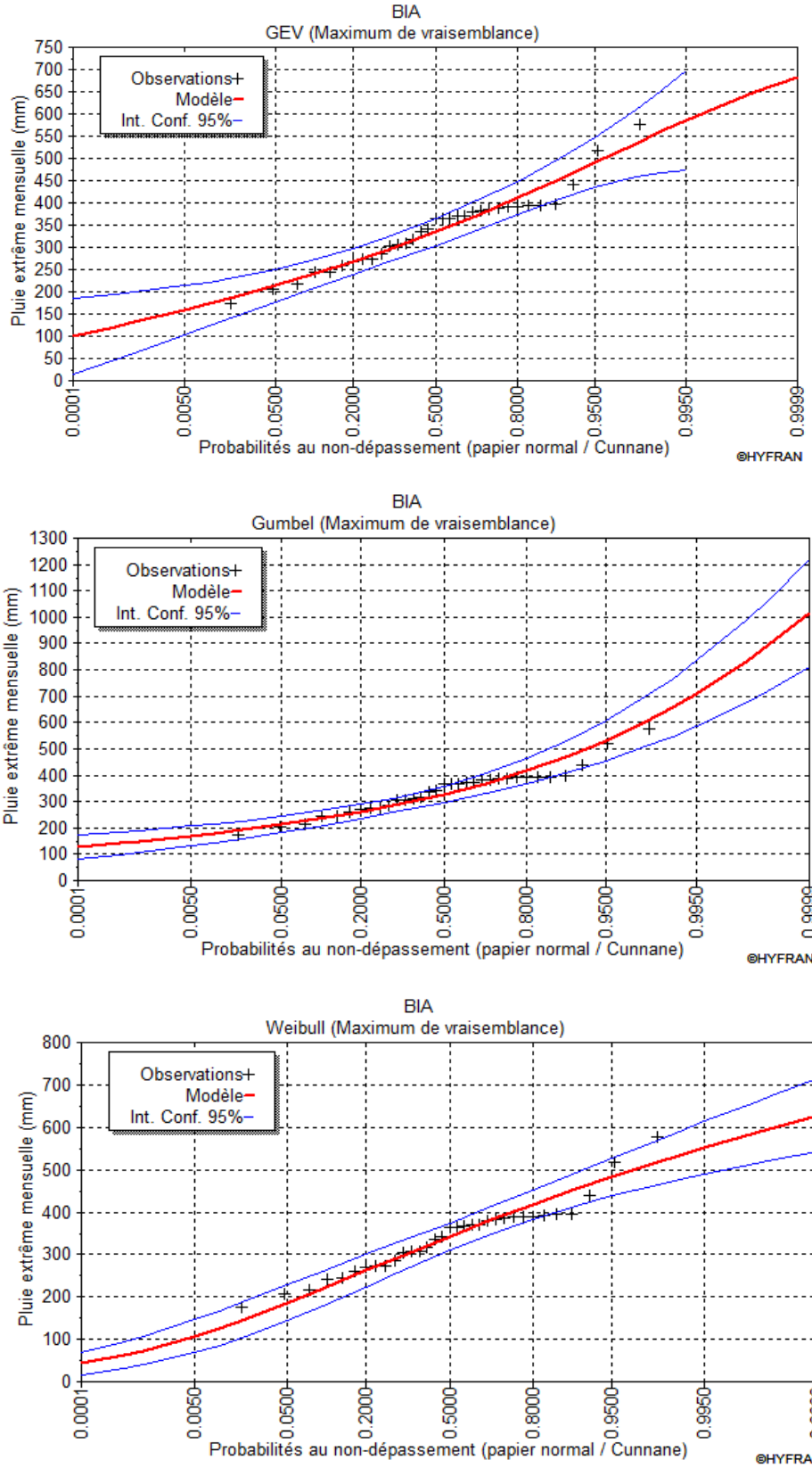
Source : données de la station d'Ayamé

Il y a donc une corrélation entre pluies et températures à Ayamé, ce qui montre que la région est bien arrosée, avec des pluies abondantes et fréquentes sur le site du lac. Ce résultat s'inscrit dans les observations faites ailleurs dans le monde. En effet, plusieurs études indiquent que le réchauffement global du climat s'accompagne d'une augmentation de la fréquence des fortes précipitations dans de nombreuses régions du globe (Frei Ch., Davies H., Gurtz J. et Schär Ch., 2000 ; Trömel S. et Schönwiese Ch., 2007 ; IPCC[2], 2007) cités par J. M. Fallot et J-A. Herting (2013, p.24).

2.3. Étude fréquentielle des pluies mensuelles de 1980 à 2013 dans le bassin de la Bia

Les résultats de l'analyse fréquentielle des données de pluies sont présentés sous forme de graphiques et de tableaux. Les figures4a, 4b et 4c, présentant les modèles statistiques (a = GEV, b = Gumbel, c = Weibull) utilisés, montrent les différents ajustements graphiques des pluies extrêmes mensuelles de la Bia, à la station hydrométrique d'Ayamé (1980-2013). Dans les trois modèles, la représentation graphique du nuage de points présente la forme d'une relation linéaire positive où les pluies extrêmes mensuelles seraient fonction de la probabilité de non-dépassement. Toutefois, la corrélation entre les deux phénomènes est plus fortement attestée par la loi de Gumbel qui s'ajuste le mieux à la Bia.

[2]Intergovernmental Panel on Climate Change



Figures 4a, 4b et 4c. Ajustement des pluies extrêmes mensuelles aux différents. Modèles statistiques

Bien que l'approche visuelle donne de bons résultats, elle a un inconvénient, car les résultats de l'observation à l'œil nu varient forcément d'un observateur à un autre. C'est pourquoi, on a eu recours à l'approche des critères de comparaison numérique qui permet de classer les modèles à partir de critères objectifs que sont les critères d'information Bayésien et Akaike (BIC et AIC).

Ainsi, l'ajustement est confirmé par les critères de comparaison numérique consignés dans le tableau 2 ci-dessous, pour une période de retour T=100 ans. En effet, ce tableau présente le classement des lois ajustées aux séries de pluies extrêmes mensuelles. D'après les critères de comparaison, c'est la loi de Gumbel qui s'ajuste bien au module du fleuve Bia, ensuite viennent la loi de GEV, puis celle de Weibull.

Tableau 2: Comparaison des lois statistiques pour l'ajustement des modules du fleuve Bia à la station d'Ayamé sur la période 1980-2013

Loi statistique	Nombre de paramètres	Critères de comparaison		Classement
		CIA	CIB	
Gumbel	2	357.772	360.765	1
GEV	3	359.077	363.567	2
Weibull	2	360.316	363.309	3

L'estimation des quantiles de pluies extrêmes X_T de période de retour T et leurs probabilités d'occurrence sont présentées dans le tableau 3 où il apparait qu'une pluie extrême de 325 mm pourrait se produire tous les 2 ans dans le bassin versant de la Bia, avec une probabilité d'occurrence de 0,50 et qu'une autre de 469 mm arriverait tous les 10 ans, avec une probabilité de non-dépassement de 0,9. La pluie extrême centenaire a une probabilité de 0,99 et attendrait 649 mm.

Tableau 3 : Estimation des pluies extrêmes dans le bassinversant de la Bia

T	Q	X_T (mm)	Ecart-type	Intervalle de confiance (99%)
2	0,5	325	15,3	286-365
3	0,6667	366	18,9	318-415
5	0,8	412	23,8	351-473
10	0,9	469	30,6	390-548
20	0,95	524	37,6	427-621
50	0,98	596	46,9	475-716
100	0,99	649	53,9	510-788
200	0,995	702	61	545-859
1000	0,999	825	77,6	626-1030

T	Q	X_T (mm)	Ecart-type	Intervalle de confiance (99%)
2000	0,9995	879	84,8	660-1100

De plus, la probabilité de non-dépassement (Q), c'est-à-dire la chance d'avoir un niveau de pluie extrême donnée augmente au fur et à mesure que le temps de retour croît. Cela implique que le modèle est plus fiable dans les longues périodes et que pour les temps de retour courts (par exemple 50 % à 2 ans) où la probabilité peut être dépassée. De même, si rien ne dit que les pluies extrêmes indiquées surviendront réellement tous les 2, 10 ou 100 ans, elles peuvent permettre, dans la gestion préventive du risque d'inondation lié aux crues de la Bia, de prendre des dispositions.

3. Discussion

Dans cette étude de cas sur la Bia, l'analyse fréquentielle des valeurs extrêmes de pluie a montré que la loi statistique de Gumbel s'ajuste bien aux données pluviométriques de la station d'Ayamé 1. Ce résultat rejoint celui de G. E. Soro (2011, p.95) sur la modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire qui a montré que la loi de Gumbel à 2 paramètres, par la méthode des maximum de vraisemblance, est la plus adaptée au module du fleuve Bia. Cela a été déjà confirmé par une étude de N. E. H. Mélèdje (2016, p.110), basée sur les données pluviométriques de 1980 à 2005, qui valide la loi de Gumbel dans le bassin versant de la Bia. Cependant, cette étude a montré qu'une pluie de 123 mm pourrait se produire tous les 2ans, avec une probabilité d'occurrence de 0,50, là où on trouve une pluie de 325 mm. Cette différence indique l'importance du pas de temps dans l'estimation du quantile de pluies extrêmes.

En effet, plusieurs auteurs insistent sur l'intérêt du pas de temps dans l'analyse fréquentielle. C'est le cas de B. Sarr et I. Lona (2007, p.1), à propos des fortes pluies enregistrées au Sahel au cours de l'hivernage 2007, de R. Avahounlin, A. Lawin, A. E. Alamou, A. Chabi et A. Afouda. (2013, p.357 et 359) qui, pour l'analyse fréquentielle des séries de pluies et débits maximaux de l'Ouémé, utilisent des données sur la période de 1960 à 2010, de P. Ozer, Y. C. Hountondji, J. Gassani, B. Djaby et F. De Longueville (2014, p.385) qui s'appuient sur les données journalières des précipitations recueillies de 1933à 2010, au niveau de neuf stations synoptiques dans le sud de la Mauritanie.

H. Hangnon, F. De Longueville et P. Ozer (2015, p.498) vont plus loin, en montrant que la qualité des données pluviométriques pour la détermination des évènements extrêmes permet

de distinguer différents types d'évènements pluvieux, du très exceptionnel (période de retour au-delà de 100 ans) au normal (période de retour inférieur à 6 ans).

En termes d'impact des pluies extrêmes, M. Mathlouthi, A. Ghali et F. Lebdi (2011, p.76) ont indiqué que les pluies extrêmes génèrent et amplifient les glissements de terrain dans le nord de la Tunisie. Il en est de même de B. A. Sarr et M. Camara (2017, p.207) qui, dans une étude sur le Sénégal, font remarquer qu'une hausse des précipitations extrêmes pourrait se traduire par une recrudescence des catastrophes naturelles qui pourraient influer négativement sur les activités socio-économiques des populations locales.

A propos des barrages, dans une étude sur l'évaluation de l'impact de barrage-réservoir Yesa, sur la réduction et la saisonnalité des crues dans le bassin versant amont de l'Aragon en Espagne, M. Lopez, S. Begueria et R. J. Garcia (2002, p.753) concluent que l'action du barrage dépend de la fréquence de la crue, mais également du niveau d'eau dans la retenue. Un résultat plus marquant est qu'il peut arriver que le pic de crue à l'aval du barrage soit plus fort que celui observé à l'amont. Ce cas est possible lorsqu'à l'arrivée d'une crue, la retenue est quasiment pleine et que, pour des raisons de sécurité de l'ouvrage, il est nécessaire de lâcher de l'eau.

Aussi, les méthodes d'analyse de fréquence régionale utilisées par H.Onibon, B.M.J Ouarda Taha, M. Barb, B. Bobee, P. Bruneau et A. ST-Hilaire (2004, p.718) permettent-elles d'estimer, pour un site donné et sur la base de l'information régionale, les quantiles (X_T) de période de retour T. Ces méthodes sont très souvent utilisées pour la conception et le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques tels que les structures de retenue d'eau, les ouvrages anti-érosifs et les réseaux d'assainissement. C'est ce que précisent J. M. Fallot et J. A. Hertig (2013, p.24) qui soutiennent que pour les barrages, les hydrologues dimensionnent généralement les ouvrages de protection contre les crues, sur la base des précipitations extrêmes, avec un temps de retour de 500 ans ou 1000 ans multipliés par 1.5.

Pour la présente étude, la méthode utilisée a été appliquée au niveau local. Il conviendrait de prendre en compte l'échelle régionale dans les études d'analyse fréquentielle, pour tenir compte de l'homogénéité des données hydrologiques et du nombre d'années d'observation qui jouent un rôle important dans le choix du modèle statistique d'ajustement (G. E. Soro, 2011, p.96; K. Benhattab, Ch. Bouvier et M. Meddi, 2014, p.7-8). En effet, l'homogénéité des données hydrologiques reste un paramètre essentiel pour l'étude hydrologique. Dans ce contexte, K. Benhattab, Ch. Bouvier et M. Meddi (2014, p.201), à travers leurs travaux,

proposent l'application de la méthode de régionalisation des distributions des pluies extrêmes journalières, pour obtenir des quantiles fiables en des sites ayant peu ou aucune donnée.

Conclusion

Dans cette région où la pluviométrie est abondante, avec des pluies moyennes annuelles variant de 1270 à 1300 mm, l'analyse fréquentielle de la Bia a permis de déterminer les périodes de retour des pluies extrêmes, à partir de la station d'Ayamé 1. Ces pluies extrêmes qui sont à l'origine des crues du fleuve Bia constituent un risque permanent pour les barrages et les milieux en aval. Ainsi, dans l'optique d'une gestion préventive des crues qui pourraient endommager le barrage hydroélectrique d'Ayamé 1 et éventuellement celui d'Ayamé 2, l'augmentation des pluies extrêmes dont le temps de retour est de cinq ans au moins, avec une probabilité de 80 % et plus, devrait interpeller les gestionnaires de ces barrages. Les résultats de cette étude sont également importants pour le dimensionnement des ouvrages hydroélectriques et de franchissement, afin d'assurer leur protection contre les crues.

Au niveau d'Ayamé, les résultats de l'étude ont permis de montrer que la loi de Gumbel s'applique mieux au fleuve Bia. Il serait intéressant d'appliquer la même démarche à d'autres bassins versants de Côte d'Ivoire, pour intégrer les inondations liées aux crues des fleuves dans l'aménagement du territoire. Ainsi, on se préparerait mieux à faire face aux éventuelles catastrophes qui pourraient survenir.

Références bibliographiques

AVAHOUNLIN Ringo, LAWIN Agnidé Emmanuel, ALAMOU Eric, CHABI Amédée et AFOUDA Abel, 2013, « Analyse fréquentielle des séries de pluies et débits maximaux de l'Ouémé et estimation des débits de pointe », *European journal of scientific research*, vol.107, N° 3, july, pp.355-369

BENHATTAB Karima, BOUVIER Christophe et MEDDI Mohamed, 2014, « Analyse fréquentielle régionale des précipitations journalières maximales annuelles dans le bassin 1 hydrographique », Chéliff, Algérie, pp. 189-203

FALLOT Jean-Michel et HERTIG Jacques-André, 2013, « Détermination des précipitations extrêmes en Suisse à l'aide d'analyses statistiques et augmentation des valeurs extrêmes durant le 20ème siècle », *Mém. Soc. vaud. Sc. nat*. 25, pp. 23-34.

GOULA Bi Tié Albert, KONAN Brou, BROU Yao Télesphore, SAVANÉ Issiaka, FADIKA Vamoryba et SROHOUROU Bernard, 2007, « Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale : cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois Log normale et de Gumbel », *Journal des Sciences Hydrologiques*, 52(2), pp. 49-67

HANGNON Huges, DE LONGUEVILLE Florence et OZER Pierre, 2015, « Précipitations extrêmes et inondations à Ouagadougou : quand le développement urbain est mal maîtrisé », *XXVII^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège, pp. 497-502

LANG Michel, 2008, *Méthodes de prédétermination des pluies et crues extrêmes*, 3ème Rencontres Météo/Math Appli, Toulouse, 48 p.

LOPEZ Moreno Ignacio, BEGUERIA Santiago et GARCIA-Ruiz José 2002, « Influence of the Yesa reservoir on floods of the Aragón River, central Spanish Pyrenees », *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(4), pp. 753–762

MATHLOUTHI Majid, GHALI Abdessalem et LEBDI Fethi, 2011, « Impact des pluies extrêmes sur le genèse et l'amplification des glissement de terrain dans le nord de la Tunisie », *Revue scientifique et technique LJEE*, N°19, décembre 2011,p p. 76-89.

MELEDJE N'diaye Edwige Hermann, 2016, *Modélisation de la dynamique hydrologique et du flux des sédiments dans le lac du barrage hydroélectrique d'Ayamé 1*. Thèse, Université Nanguy Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, 267 p.

MEYLAN Paul., FAVRE Anne-Cathérine et MUSY André, 2008, *Hydrologie fréquentielle, une science prédictive,* 1ère Edition, Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, col. Science et ingénierie de l'environnement, 174 p.

MULLER Aurélie, 2006, *Comportement asymptotique de la distribution des pluies extrêmes en France*. Thèse de doctorat ès Science, Université de Montpellier II, France, 247 p.

ONIBON Hubert, OUARDA TAHA, BARBET Marc, BOBEE Bernard, BRUNEAU Pierre., ST-HILAIRE André, 2004, « Analyse fréquentielle régionale des précipitations journalières maximales annuelles au Québec », Canada, *Hydrological Sciences-Journal des Sciences Hydrologiques*, 49(4) août 2004, pp. 717-735

OZER Pierre, HOUNTONDJI Yvon Carmen, GASSANI Jean, DJABY Bakary, DE LONGUEVILLE Florence, 2014, « Évolution récente des extrêmes pluviométriques en Mauritanie (1933-2010) », *XXVII^{ème} colloque de l'association internationale de climatologie*, 2-5 juillet 2014, Dijon (France), pp. 394-400

SARR Badara Alioune et CAMARA Moctar, 2017, « Evolution des Indices pluviométriques extrêmes par l'analyse de Modèles climatiques régionaux du programme CORDEX: les projections climatiques sur le Sénégal », *European Scientific Journal*, June 2017, Vol.13, n° 17, pp. 206-222.

SARR Benoît et LONA Issaka, 2007, *les fortes pluies enregistrées au Sahel au cours de l'hivernage 2007 : variabilité et/ou changement climatique*, 9 p.

SORO Gneneyougo Émile, 2011, *Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire,* Thèse de doctorat, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, 193 p.