

Modélisation statistique des pluies maximales annuelles dans le district d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire)

Statistical modelling of maximum annual rainfall in the Abidjan district (southern Ivory Coast)

Amani Michel Kouassi, Relwindé Abdoul-Karim Nassa, Koffi Blaise Yao, Koffi Fernand Kouame and Jean Biemi

Volume 31, Number 2, 2018

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1051697ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/1051697ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Kouassi, A. M., Nassa, R. A., Yao, K. B., Kouame, K. F. & Biemi, J. (2018). Modélisation statistique des pluies maximales annuelles dans le district d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 31(2), 147–160. <https://doi.org/10.7202/1051697ar>

Article abstract

The extreme values of hydroclimatic variables are of particular interest when speaking in terms of risk. The estimation of the recurrence of extreme rainfall provides essential elements for the construction of infrastructures such as dykes, sewage works, etc., in order to effectively protect the population and their property. The aim of this article is to find a theoretical law that can show a good representation of the distribution function of the annual maximum daily rainfall for the prevention of flood risks in the Abidjan district in the south of Ivory Coast. The data used cover the period from 1961 to 2014. Distribution laws used in the design of hydraulic structures have been retained in this analysis: the law of Weibull, the law of Gumbel and the lognormal law. They were adjusted to the maximum annual rainfall and the parameters were estimated in a specific way. The empirical frequencies were calculated from the Hazen relation. The parameters of the different laws were determined by the weighted moment method. Adjustment was assessed using graphic representation and χ^2 test. Two criteria (Akaike criterion and Bayesian criterion) were used to select the best model. The different laws generally showed a good fit with the series of annual maximum daily rains of the Port-Bouët station (Abidjan). However, the law that best adjusted the annual maximum daily rainfall of the Port-Bouët station (Abidjan) was the law of Gumbel. It is therefore recommended to work with the distribution of Gumbel in any design study of hydraulic structures in general and in the field of storm drainage works especially in the district of Abidjan.

MODÉLISATION STATISTIQUE DES PLUIES MAXIMALES ANNUELLES DANS LE DISTRICT D'ABIDJAN (SUD DE LA CÔTE D'IVOIRE)

Statistical modelling of maximum annual rainfall in the Abidjan district (southern Ivory Coast)

AMANI MICHEL KOUASSI¹, RELWINDÉ ABDOUL-KARIM NASSA², KOFFI BLAISE YAO³, KOFFI FERNAND KOUAME³, JEAN BIEMPI

¹Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques, Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi), Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

²École Doctorale Polytechnique (EDP), Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

³Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM), Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Reçu le 3 octobre 2017, accepté le 9 février 2018

RÉSUMÉ

Les valeurs extrêmes des variables hydroclimatiques présentent un intérêt tout particulier lorsqu'on parle en termes de risque. L'estimation de la récurrence de pluies extrêmes fournit des éléments indispensables pour la construction d'infrastructures telles que les digues, les ouvrages d'assainissement, etc., afin de protéger efficacement la population et leurs biens. Cet article a pour objectif de trouver une loi théorique qui peut montrer une bonne représentation de la fonction de distribution des pluies journalières maximales annuelles pour la prévention des risques liés aux inondations dans le district d'Abidjan au sud de la Côte d'Ivoire. Les données utilisées couvrent la période allant de 1961 à 2014. Des lois de distribution employées dans la conception des ouvrages hydrauliques ont ainsi été retenues dans cette analyse :

la loi de Weibull, la loi de Gumbel et la loi log-normale. Elles ont été ajustées aux pluies journalières maximales annuelles et les paramètres ont été estimés de manière spécifique. Les fréquences empiriques ont été calculées à partir de la relation de Hazen. Les paramètres des différentes lois ont été déterminés par la méthode des moments pondérés. L'ajustement a été apprécié à partir de représentation graphique et du test du χ^2 . Deux critères (critère d'Akaike et critère bayésien) ont été retenus pour trancher sur le choix des meilleurs modèles. Les différentes lois ont montré en général une bonne adéquation à la série des pluies journalières maximales annuelles de la station de Port-Bouët (Abidjan). Cependant, la loi qui ajuste le mieux les pluies journalières maximales annuelles de la station de Port-Bouët (Abidjan) est la loi de Gumbel. Il est donc recommandé de travailler avec la distribution de Gumbel dans toute étude de dimensionnement d'ouvrages hydrauliques en

général et dans le domaine des ouvrages d'évacuation des eaux pluviales en particulier dans le district d'Abidjan.

Mots-clés : *précipitations maximales annuelles, modélisation statistique, estimation de paramètres, Abidjan, Côte d'Ivoire.*

ABSTRACT

The extreme values of hydroclimatic variables are of particular interest when speaking in terms of risk. The estimation of the recurrence of extreme rainfall provides essential elements for the construction of infrastructures such as dykes, sewage works, etc., in order to effectively protect the population and their property. The aim of this article is to find a theoretical law that can show a good representation of the distribution function of the annual maximum daily rainfall for the prevention of flood risks in the Abidjan district in the south of Ivory Coast. The data used cover the period from 1961 to 2014. Distribution laws used in the design of hydraulic structures have been retained in this analysis: the law of Weibull, the law of Gumbel and the lognormal law. They were adjusted to the maximum annual rainfall and the parameters were estimated in a specific way. The empirical frequencies were calculated from the Hazen relation. The parameters of the different laws were determined by the weighted moment method. Adjustment was assessed using graphic representation and χ^2 test. Two criteria (Akaike criterion and Bayesian criterion) were used to select the best model. The different laws generally showed a good fit with the series of annual maximum daily rains of the Port-Bouët station (Abidjan). However, the law that best adjusted the annual maximum daily rainfall of the Port-Bouët station (Abidjan) was the law of Gumbel. It is therefore recommended to work with the distribution of Gumbel in any design study of hydraulic structures in general and in the field of storm drainage works especially in the district of Abidjan.

Key words: *maximum annual precipitation, statistical modelling, parameter estimation, Abidjan, Ivory Coast.*

1. INTRODUCTION

La pluie étant le facteur déclenchant des phénomènes d'inondation, l'étude de ces phénomènes peut être menée à partir de l'analyse des pluies extrêmes. Les valeurs extrêmes des variables hydroclimatiques présentent un intérêt tout particulier lorsqu'on parle en termes de risque. L'estimation de la récurrence de pluies extrêmes fournit des éléments

indispensables pour la construction d'infrastructures telles que les digues et les ouvrages d'assainissement, afin de protéger efficacement la population et leurs biens (BENKHALED, 2007). La modélisation statistique des valeurs extrêmes utilisant les valeurs de pluies journalières maximales est généralement préférée à l'utilisation des pluies journalières supérieures à un seuil, aussi bien par les chercheurs que par les projecteurs, car elle est plus facile à appliquer et souvent plus efficace sur le plan statistique (HABIBI *et al.*, 2013). Ainsi, plusieurs auteurs utilisent cette variable de pluies journalières maximales pour modéliser les pluies extrêmes (ONIBON *et al.*, 2004; BENKHALED, 2007; GOULA *et al.*, 2007; ZAHAR et LABORDE, 2007; HABIBI *et al.*, 2013; KOUMASSI *et al.*, 2014; AGUE et AFOUDA, 2015). En hydrologie, pour estimer par exemple la pluie maximale relative à un risque donné, on retient, pour chacune des n années observées, la valeur maximale de la pluie, et l'analyse statistique porte seulement sur l'échantillon de ces n valeurs de hauteur de précipitation maximale annuelle.

La quantification de l'aléa pluviométrique peut se faire à partir de méthodes très différentes qui sont souvent complémentaires (analyse fréquentielle, pluie maximale probable, générateurs stochastiques). L'analyse fréquentielle est l'approche statistique la plus utilisée pour quantifier l'aléa pluviométrique (SORO, 2011; BENABDESSELAM et AMARCHI, 2013; NEPPEL *et al.*, 2014). En attribuant une probabilité d'occurrence à une grandeur physique telle que la pluie extrême, elle fournit un outil remarquable d'aide à la décision aux gouvernants (SORO, 2011). De nombreux auteurs ont utilisé cette approche statistique pour quantifier le risque associé aux pluies extrêmes (BENKHALED, 2007; GOULA *et al.*, 2010; SORO, 2011; HABIBI *et al.*, 2013).

La loi de Gumbel est utilisée par la plupart des services météorologiques officiels, pour décrire la fréquence des pluies extrêmes (GUMBEL, 1958; ZAHAR et LABORDE, 2007; FALLOT et HERTIG, 2013). En effet, la loi de Gumbel a l'avantage d'être très connue par les ingénieurs qui l'utilisent dans le cadre des travaux sur la fiabilité des infrastructures hydrauliques. Selon MULLER (2006), en hydrologie, les maxima saisonniers ou annuels sont souvent modélisés par une loi Gumbel. La simplicité du calcul de la distribution de Gumbel et la configuration géométrique du tracé sur échelle linéaire de probabilité ont été des éléments qui ont contribué à sa popularité (BENKHALED, 2007). Cependant, la littérature hydrologique montre depuis peu un certain scepticisme vis-à-vis de la modélisation des maxima annuels ou saisonniers par une loi Gumbel (MULLER, 2006). Ainsi, il n'est peut être pas justifié d'utiliser la loi Gumbel au lieu d'une loi des valeurs extrêmes généralisée (GEV) plus générale (MULLER, 2006). D'autres travaux ont montré également que la distribution exacte des maxima à la loi de Gumbel pour de longues séries, fait de la distribution de Gumbel une approximation inadéquate

(KOUTSOYIANNIS, 2004a, 2004b; HABIBI *et al.*, 2013). L'enjeu d'un tel débat entre la loi de Gumbel et les autres lois est considérable, puisqu'il est directement lié à la sécurité des structures hydrauliques. En effet, la recherche d'un modèle de fréquence des hauteurs de pluies journalières revêt une grande importance en hydrologie opérationnelle : elle constitue la base de calcul de la crue de projet associée à une probabilité d'occurrence donnée, une fois les quantiles déterminés (SAMBOU, 2004). D'où la nécessité de tester plusieurs lois pour chaque station locale donnée afin d'en retenir la meilleure qui va servir à la détermination des paramètres servant au dimensionnement des ouvrages hydrauliques et non choisir de façon systématique la loi de Gumbel. Ainsi, cet article a pour objectif de trouver une loi théorique qui peut montrer une bonne représentation de la fonction de distribution des pluies journalières maximales annuelles pour la prévention des risques liés aux inondations dans le district d'Abidjan au sud de la Côte d'Ivoire.

2. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La Côte d'Ivoire fait partie des pays du golfe de Guinée. Elle s'étend sur une superficie de 322 462 km², environ 1 % du continent africain. La zone d'étude est le district d'Abidjan. Le district d'Abidjan est situé au sud de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 5°10' et 5°30' Nord et les longitudes 3°45' et 4°21' Ouest. Elle est composée de dix communes auxquelles s'ajoutent trois sous-préfectures (Bingerville, Songon et Anyama) (Figure 1). Le district s'étend sur une superficie totale de 2 119 km², dont 566 km² de lagune. Il regroupe une population estimée à environ 4 707 404 selon le Recensement général de la Population et de l'Habitat de 2014 (INS, 2014). Le district d'Abidjan est limité par la ligne de contact socle-bassin sédimentaire au nord, la lagune Ébrié au sud, les cours d'eau Agnéby, Niéké à l'ouest et enfin la rivière la Mé, les lagunes Adjin et Potou à l'est.

Le cumul moyen mensuel des pluies varie de 23 mm pour le mois le moins pluvieux (janvier) à 525 mm pour le mois le plus pluvieux (juin). La pluviométrie dans le district d'Abidjan est très importante. Elle participerait à l'effet d'inondation par débordement du réseau et au transport de polluants liquides et solides, affectant ainsi les conditions de vie et d'assainissement des populations (DONGO *et al.*, 2008). Le district d'Abidjan est caractérisé par un climat équatorial avec quatre saisons dont deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches. Au cours de la première saison pluvieuse (mars-juillet), il est enregistré plus de deux tiers de la pluviométrie annuelle (1 922 mm). Ensuite, s'en

suit une petite saison sèche (août-septembre). Un second pic de pluies est atteint pendant la petite saison pluvieuse (octobre à novembre). La dernière saison est la grande saison sèche qui va de décembre à mars. Les températures moyennes mensuelles dans le district d'Abidjan varient de 24,2 °C en août, le mois le plus froid, à 27,4 °C en mars, le mois le plus chaud (KABLAN, 2016). La durée moyenne de l'insolation est comprise entre 110 et 219 h par jour (KABLAN, 2016). L'humidité relative moyenne mensuelle varie entre 78 et 87 % (KABLAN, 2016).

La végétation du district d'Abidjan est marquée par une forêt dense qui constitue la végétation primaire du littoral, une forêt marécageuse qui se présente en îlots isolés ou sur les marges de la forêt dense humide et un fourré littoral caractérisé par une savane germinée à îlots arbustifs.

La géomorphologie est caractérisée par trois grands ensembles : les hauts plateaux à deux niveaux (40 à 50 m et 100 à 120 m) représentés par les buttes du Continental Terminal au nord de la lagune Ébrié; les moyens plateaux d'altitude allant de 8 à 12 m constituant les affleurements du cordon littoral du Quaternaire, les plaines et les lagunes, au sud, constituant l'ensemble le plus affaissé; les vallées profondes allant de 12 à 40 m, issues du centre-nord de la zone et qui entaillent les hauts Plateaux du Tertiaire. Le district d'Abidjan repose sur un sol qui est issu des formations sédimentaires, de type ferrallitique (KABLAN, 2016). Ces formations sédimentaires présentent une texture argilosableuse très favorable à l'érosion. En effet, la pluviométrie élevée et l'effet du climat favorisent l'altération intense des roches ferrallitiques. Cela constitue l'une des causes de risques naturels sur les versants de certains quartiers à Abidjan. La géologie du district d'Abidjan s'identifie à celle du bassin sédimentaire côtier de la Côte d'Ivoire. La lithostratigraphie du bassin sédimentaire est marquée par des formations d'âge crétacé quaternaire, avec d'importantes variations latérales et verticales de toutes les formations lithologiques. Au nord de la faille des lagunes, on rencontre les terrains du Continental Terminal, formations d'âge miopliocène caractérisées par une stratification lenticulaire, des sables grossiers, des argiles bariolées, des grès ferrugineux et des minerais de fer. Les vases et les sables lessivés sont rencontrés vers les bordures lagunaires. Au sud de la faille des lagunes, ce sont les sédiments du Quaternaire constitués de sables, d'argiles et de grès ferrugineux avec des vases et des sables lessivés. Sur le plan paléogéographique, du Crétacé au Quaternaire actuel, trois épisodes de transgression sont bien connus : Albo-Aptien : argiles et grès du Crétacé inférieur; Maestrichtien-Éocène inférieur : argiles glauconieuses, argiles et sables, et Miocène inférieur : marnes noires à reliques de requins, argiles bariolées et lignites.

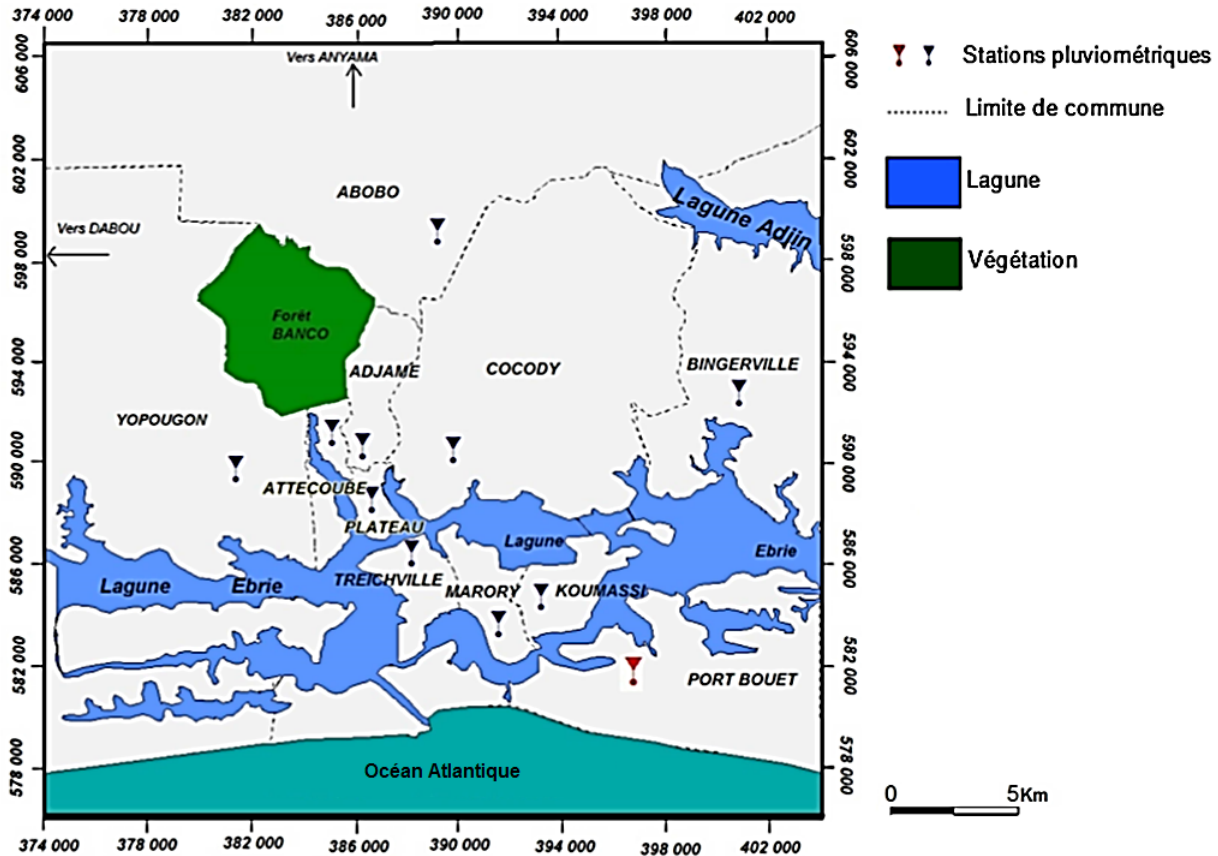


Figure 1. Localisation de la zone d'étude (KONATE *et al.*, 2016).
Location of the study area (KONATE *et al.*, 2016).

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 Matériel

Les données climatiques utilisées au cours de notre étude ont été mises à notre disposition par la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) à travers la Direction de la Météorologie Nationale (DMN). Il s'agit des données de pluviométrie journalière de la station synoptique d'Abidjan-Port-Bouët. Les données collectées s'étendent sur la période 1961-2014. Le traitement des données pour cette étude a nécessité l'utilisation de logiciels tels qu'Excel 2016 pour la réalisation des calculs et graphes et Hyfran 1.1 (Hydrological Frequency Analysis, EL ADLOUNI *et al.*, 2008) pour l'analyse fréquentielle des pluies journalières maximales annuelles.

3.2 Modélisation statistique des pluies journalières maximales annuelles

L'approche méthodologique a consisté d'abord à vérifier un certain nombre d'hypothèses statistiques dans le contexte de l'application de l'analyse fréquentielle, telles que

l'indépendance, l'homogénéité, l'autocorrélation et la normalité des données. Ensuite, les différentes lois de distribution choisies ont été ajustées aux données de pluies journalières maximales annuelles. Enfin, une évaluation de la validité des modèles adoptés a été réalisée.

Des lois de distribution employées dans la conception des réseaux d'assainissement et des aménagements pour la protection contre les inondations, principalement dans les zones urbaines et semi-urbaines, ont ainsi été retenues dans cette analyse.

3.2.1 Hypothèses de l'analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle passe en premier lieu par l'appréciation de la qualité des séries à posséder une fonction de distribution en utilisant les tests de stationnarité de Kendall, d'indépendance de Wald-Wolfowitz et d'homogénéité de Wilcoxon (HABIBI *et al.*, 2013; AGUE et AFOUDA, 2015). Ces tests fonctionnent tous sur le même principe qui consiste à énoncer une hypothèse sur la population mère et à vérifier sur les observations constatées si celles-ci sont vraisemblables dans le cadre de cette hypothèse. L'hypothèse à tester est appelée H_0 (hypothèse nulle) et s'accompagne impérativement de son hypothèse alternative appelée H_1 . Le test s'attachera à valider

ou à rejeter H_0 (et par conséquent à tirer la conclusion inverse pour H_0). Si le résultat du test amène à accepter l'hypothèse nulle H_0 , alors la probabilité que la répartition soit aléatoire est élevée. En revanche, le rejet de H_0 signifie que cette répartition des réponses recèle des informations qui ne semblent pas être aléatoires et qu'il convient d'approfondir l'analyse.

Le test d'homogénéité de Wilcoxon à l'échelle annuelle consiste à découper la série selon les différentes ruptures et à vérifier si ces sous-séries ont la même moyenne. Les hypothèses sont donc :

- H_0 : les moyennes des deux sous-échantillons sont égales;
- H_1 : les moyennes des deux sous-échantillons sont différentes.

Le test de stationnarité de Kendall, qui est un test de corrélation sur le rang, sert à détecter les tendances dans les séries (YUE ET PILON, 2004). Pour ce test, les hypothèses sont les suivantes :

- H_0 : il n'y a aucune tendance dans les observations;
- H_1 : il y a une tendance dans les observations.

Le test d'indépendance de Wald-Wolfowitz est utile pour vérifier dans les observations l'existence d'une dépendance séquentielle qui conduirait, lorsque celle-ci est avérée, à définir le type et le niveau de celle-ci avant de continuer l'étude du processus des fréquences. Pour cela les hypothèses sont les suivantes :

- H_0 : les observations sont indépendantes;
- H_1 : les observations sont dépendantes.

3.2.2 Choix et estimation des paramètres des modèles statistiques

Le choix des différents modèles statistiques retenus pour l'ajustement des pluies journalières maximales annuelles repose sur des considérations théoriques et les recommandations des travaux antérieurs en la matière (KOUTSOYIANNIS, 2004a, 2004b; MULLER, 2006; GOULA *et al.*, 2007; EL ADLOUNI *et al.*, 2008; SORO, 2011). De manière générale, la détermination de la meilleure loi d'ajustement a toujours été délicate et le choix du modèle peut être crucial pour l'estimation des périodes de retour des valeurs extrêmes de précipitation. Dans le cadre de cette étude, trois lois ont été retenues dont la loi des valeurs extrêmes généralisée (GEV) à trois paramètres, la loi de Gumbel et la loi log-normale qui peuvent être utilisées comme fonctions de distribution des valeurs extrêmes de pluie. La présentation complète de ces lois a été faite par plusieurs auteurs (MULLER, 2006; SORO, 2011; HABIBI *et al.*, 2013; AGUE et AFOUDA, 2015). Les modèles statistiques retenus a priori pour l'ajustement des variables des pluies journalières extrêmes sont présentés dans le tableau 1.

Les paramètres u , α , k désignent respectivement les paramètres de position, d'échelle et de forme des différentes lois. Le paramètre de position u caractérise l'ordre de grandeur de la série des pluies extrêmes. Le paramètre de forme k indique le comportement des extrêmes ou la forme de la distribution. Suivant le signe de ce paramètre de forme, on définit trois types de lois GEV :

- $k = 0$, loi à queue légère (ou distribution de Gumbel);
- $k < 0$, loi à queue lourde (ou distribution de Fréchet);
- $k > 0$, loi à queue bornée (ou distribution de Weibull).

Les paramètres μ et σ désignent respectivement la moyenne et l'écart-type de la loi log-normale. Ces paramètres ont été déterminés par la méthode des moments pondérés.

3.2.3 Calcul des fréquences empiriques

La détermination des fréquences expérimentales se base sur l'étude critique et comparative des différentes approches pour le développement des fonctions de probabilité empiriques (FPE). La formule de Hazen a été retenue, et ce, malgré la recommandation d'utiliser la FPE basée sur la médiane des statistiques d'ordre comme compromis entre les FPE basées sur le mode des statistiques d'ordre et les FPE non biaisées. Selon ROSBJERC *et al.* (1992), les FPE non biaisées sont dépendantes de la distribution parente des échantillons considérés et correspondent à la moyenne des statistiques d'ordre. En zone tropicale humide, la formule de Hazen a été utilisée par la plupart des auteurs (BENKHALED, 2007; GOULA *et al.*, 2010; SORO, 2011). Après un classement par ordre croissant d'un échantillon de pluies maximales de taille n , l'expression de la fréquence empirique ou expérimentale de non-dépassement de Hazen pour une valeur x de rang i se note (Équation 1) :

$$f(x_i) = \frac{i - 0,5}{n} \quad (1)$$

où n est la taille de l'échantillon considéré.

3.2.4 Validation du modèle statistique

De nombreuses techniques existent pour comparer les différentes méthodes d'analyse des lois de probabilité et pour choisir la meilleure. C'est le test d'adéquation du χ^2 qui a été utilisé dans cette étude. L'examen visuel des graphiques d'ajustement réalisés, même s'il peut paraître rudimentaire, reste un bon moyen pour juger de la qualité d'un ajustement et devrait toujours constituer un préambule à tout test statistique. Enfin, les critères d'Akaike (AIC) et bayésien (BIC) sont représentés chez AGUE et AFOUDA, 2015.

La procédure du test du χ^2 appliqué se présente comme suit : un échantillon de n valeurs classées par ordre croissant (ou décroissant) et pour lequel une loi de répartition $F(x)$ a

Tableau 1. Modèles statistiques présélectionnés pour l'ajustement des pluies maximales.
Table 1. Pre-selected statistical models for the adjustment of maximum rainfall.

Loi de probabilité	Fonction de densité	Paramètres
Valeurs extrêmes généralisée (GEV)	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{k}{\alpha}(x-u) \right]^{k-1} \exp \left\{ - \left[1 - \frac{k}{\alpha}(x-u) \right]^{\frac{1}{k}} \right\}$	u, α, k^a
Gumbel	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp \left(-\frac{x-u}{\alpha} \right) \right]$	u, α
Log-normale	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right]$	μ, σ^b

^a u : paramètre de position; α : paramètre d'échelle; k : paramètre de forme

^b μ : moyenne; σ : écart-type

été déterminée; on divise cet échantillon en un certain nombre C de classes contenant chacune n_i valeurs expérimentales. Le nombre v_i est le nombre théorique de valeurs affectées à la classe i par la loi de répartition. Ce nombre v_i est donné par l'équation 2 :

$$v_i = n \int_{x_{i+1}}^{x_i} f(x) dx = n [F(x_i) - F(x_{i+1})] \quad (2)$$

où $f(x)$ étant la fonction densité de probabilité correspondant à la loi théorique.

L'expression de χ^2 expérimental est présentée comme suit (Équation 3) :

$$\chi^2 = \sum \frac{(n_i - v_i)^2}{v_i} \quad (3)$$

La probabilité de dépassement correspondant au nombre de degrés de liberté λ est ainsi déterminée, avec $\lambda = C - 1 - n_p$ où n_p est le nombre de paramètres de la loi $F(x)$. Si cette probabilité est supérieure à 0,05, l'ajustement est satisfaisant. Dans le cas contraire, il y a rejet de la loi.

La sélection de la distribution statistique la mieux ajustée aux échantillons a été faite à l'aide de deux critères à savoir le critère d'Akaike (AIC) et le critère d'information bayésien (BIC). Ces deux critères permettent de choisir la loi la mieux ajustée en tenant compte de l'erreur d'estimation et de la parcimonie (nombre de paramètres à ajuster). La distribution pour laquelle les valeurs des deux critères sont les plus faibles est celle qui est sélectionnée.

En d'autres termes, il s'agit de déterminer le meilleur ajustement. En effet, le but de ces critères est de rechercher un compromis entre une paramétrisation suffisante pour bien ajuster une loi de probabilité aux observations, et une

paramétrisation la moins complexe possible. Un tel compromis permet de respecter le principe de parcimonie des lois de distribution de fréquences théoriques. Ainsi, la meilleure loi est celle dont les valeurs d'AIC et de BIC sont les plus faibles par rapport aux autres valeurs de la série de données analysées. Les fondements de base de ces critères sont développés ci-après.

L'expression du critère d'information d'Akaike (AIC) se présente comme suit (GOULA *et al.*, 2010; AGUE et AFOUDA, 2015) (Équation 4) :

$$AIC = -2\log(L) + 2n_p \quad (4)$$

où L : vraisemblance et n_p : nombre de paramètres.

L'expression du critère d'information bayésien (BIC) se présente comme suit (GOULA *et al.*, 2010; AGUE et AFOUDA, 2015) (Équation 5) :

$$BIC = -2\log(L) + 2n_p \log(N) \quad (5)$$

où L : vraisemblance; n_p : nombre de paramètres; N : taille de l'échantillon.

3.2.5 Caractérisation des périodes de retour

La loi identifiée comme ajustant le mieux les pluies extrêmes a été appliquée aux hauteurs de pluies journalières pour caractériser les périodes de retour des événements pluvieux extrêmes. Le but étant de vérifier si les épisodes pluvieux à la source d'inondations recensées peuvent être qualifiés d'événements extrêmes ou non. Selon HANGNON *et al.* (2015), la période de retour (ou temps de retour) caractérise le temps statistique entre deux occurrences d'un événement naturel d'une intensité donnée. Ce terme est très utilisé pour caractériser les risques naturels. Le calcul des fréquences d'apparition des pluies extrêmes fournit des indications

intéressantes pour les gestionnaires de l'aménagement (EL GHACHI et MORCHID, 2015). La période de retour d'un événement est définie comme étant l'inverse de la probabilité annuelle de dépassement de cet événement (MOHYMONT et DEMARÉE, 2006) (Équation 6) :

$$T = \frac{1}{1-F} \quad (6)$$

où T : période de retour (année); F : fréquence de non-dépassement.

Un événement pluvieux est qualifié de très exceptionnel si sa période de retour est au-delà de 100 ans; d'exceptionnel si la période de retour est située dans l'intervalle de 30 à 100 ans; de très anormal si la période de retour est comprise entre 10 à 30 ans; d'anormal si la période de retour est située entre 6 à 10 ans et de normal si la période de retour est à moins de six ans (HANGNON *et al.*, 2015).

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Vérification des tests d'hypothèses de l'analyse fréquentielle

Plusieurs tests d'hypothèses ont été appliqués aux pluies journalières maximales annuelles de la station pluviométrique de Port-Bouët (Abidjan) (test d'indépendance de Wald-Wolfowitz, test d'homogénéité de Wilcoxon et test de stationnarité de Kendall). Le tableau 2 montre les résultats d'application de ces différents tests d'hypothèses. L'analyse de ce tableau a permis de constater que les tests d'indépendance et d'homogénéité restent valables pour les pluies maximales journalières à un seuil de 5 % (seuil de rejet de H_0). Quant au test de stationnarité de Kendall, il a été accepté au seuil de 1 %. Ces résultats montrent que la série des valeurs maximales annuelles de précipitations journalières considérée est constituée par des valeurs indépendantes (Figure 2), homogènes et stationnaires. Ainsi, la série des pluies journalières maximales annuelles de la station de Port-Bouët (Abidjan), vérifie les conditions d'application de l'analyse fréquentielle.

Tableau 2. Résultats des tests d'hypothèses de l'analyse fréquentielle.

Table 2. Results of the frequency analysis hypothesis tests.

Test d'hypothèse	Résultat	P
Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz	$6,33 \times 10^{-2}$	$9,50 \times 10^{-1}$
Test de stationnarité de Kendall	2,43	$1,50 \times 10^{-2}$
Test d'homogénéité de Wilcoxon	1,95	$5,14 \times 10^{-2}$

4.2 Ajustement des pluies extrêmes aux lois statistiques

4.2.1 Analyse des paramètres des lois statistiques appliquées

La figure 2 présente l'évolution des probabilités empiriques des pluies journalières maximales annuelles de la station d'Abidjan Port-Bouët de la chronique 1961-2014.

Les différents paramètres (paramètre de position u , paramètre d'échelle α et paramètre de forme k) des lois statistiques retenues (loi généralisée des valeurs extrêmes, loi de Gumbel et loi log-normale) ont été évalués (Tableau 3). Les paramètres de position et d'échelle sont en général instables au niveau de la loi GEV et de la loi de Gumbel. Ils sont plus stables au niveau de la loi log-normale. Les valeurs du paramètre de position varient entre 4,8 (loi log-normale) et 111,52 mm (loi GEV) avec une moyenne de 75,3 mm. Les valeurs du paramètre d'échelle (gradex) oscillent entre 0,38 (loi log-normale) et 39,46 mm (loi GEV) avec une moyenne de 25,26 mm. Le paramètre d'échelle de la loi de valeurs extrêmes généralisée est supérieur à celui de la loi de Gumbel. Le paramètre de forme de la loi GEV est positif ($k = 0,11$), donc cette loi correspond à la loi de Weibull avec cette valeur de paramètre spécifique. Les fortes valeurs du gradex observées montrent que les pluies journalières maximales annuelles de la station d'Abidjan-Port-Bouët varient très fortement d'une fréquence à l'autre. Ainsi, Abidjan est une zone où le risque de pluies extrêmes en général et en particulier le risque de pluies journalières maximales est très élevé.

4.2.2 Ajustement des pluies journalières maximales annuelles

Les résultats d'ajustement des données de pluies journalières maximales annuelles à la station d'Abidjan-Port-Bouët à partir des quatre modèles retenus avec une marge d'erreur de 1 à 5 % sont illustrés aux figures 3 à 6. L'examen visuel des différentes figures (3 à 5) a permis de montrer que les meilleurs modèles semblent être dans un ordre décroissant de qualité, la loi de Gumbel, la loi log-normale et la loi de Weibull. Pour mieux apprécier l'ajustement des différentes lois appliquées, un graphe de comparaison (Figure 6) a été construit par superposition des trois modèles. Cette figure a permis d'observer que la courbe relative à la loi de Gumbel est encadrée par celles de la loi log-normale (au-dessus) et la loi de Weibull (au-dessous). Ainsi, des tests numériques de vérification de l'adéquation des ajustements ont été appliqués pour mieux apprécier leur relative qualité.

Tableau 3. Paramètres des lois appliquées : de position (u), d'échelle (α), de forme (k).

Table 3. Parameters of applied laws: position (u), scale (α), shape (k).

Loi de probabilité	u (mm)	α (mm)	k
Valeurs extrêmes généralisée (GEV)	111,52	39,46	0,11
Gumbel	109,58	35,94	–
Log-normale	4,8	0,38	–

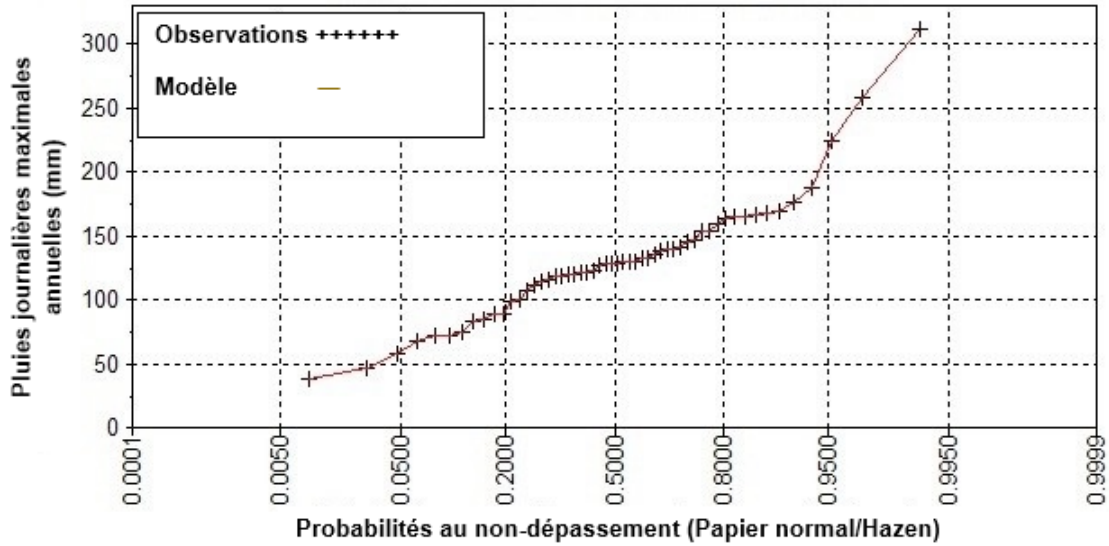


Figure 2. Évolution des probabilités empiriques de la série des pluies journalières maximales annuelles de la station d'Abidjan-Port-Bouët (1961-2014).
Evolution of the empirical probabilities of the annual maximum daily rainfall series at the Abidjan-Port-Bouët station (1961-2014).

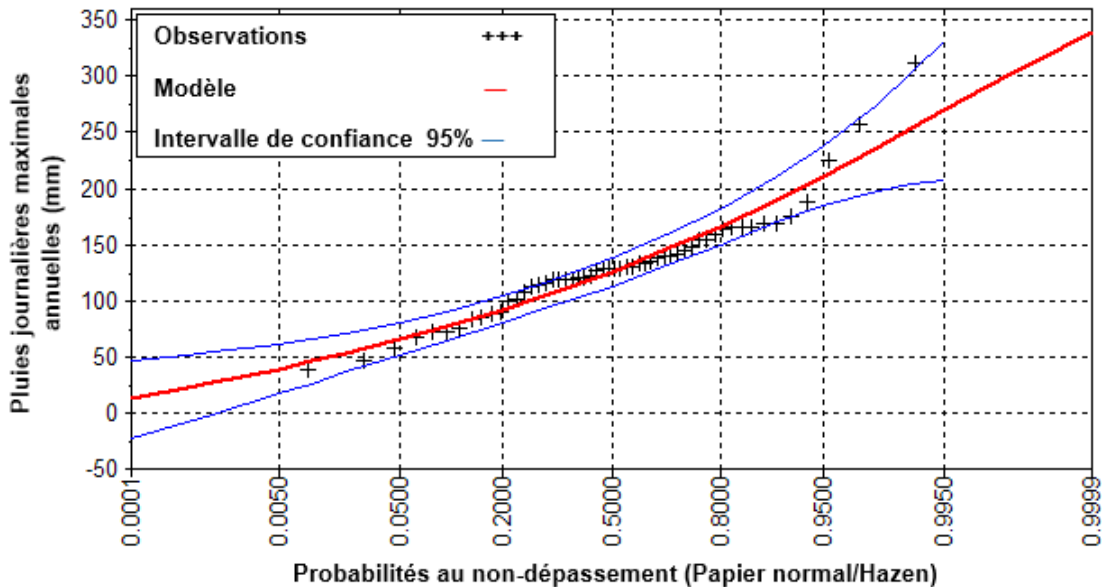


Figure 3. Ajustement des pluies journalières maximales à la loi de Weibull.
Adjustment of maximum daily rainfall to Weibull's law.

Les différents résultats du test du χ^2 appliqué sur les données de pluies journalières maximales annuelles sont consignés dans le tableau 4. L'application de ce test s'est révélée concluante pour la totalité des lois d'ajustement sur les pluies journalières maximales annuelles. En ce qui concerne la loi de Weibull et la loi de Gumbel, elles ont été acceptées au seuil de signification de 5 % tandis que la loi log-normale affiche un niveau de signification de 1 % accepté après un refus au seuil de 5 %. Ce test ne permet pas de trancher sur le choix de la meilleure loi d'ajustement des pluies journalières maximales annuelles de la

station de Port-Bouët (Abidjan). Cela nécessite le recours aux critères d'Akaike et bayésien.

Les résultats obtenus suite à l'application des critères d'Akaike et bayésien sont consignés dans le tableau 5. Il est constaté que les différentes valeurs sont assez rapprochées pour les trois lois selon le critère donné. De plus, dans certains cas, les deux critères ne choisissent pas nécessairement la même loi, donc ne convergent pas toujours vers le même modèle. Selon le critère d'Akaike, la loi de Gumbel est suivie par la loi de

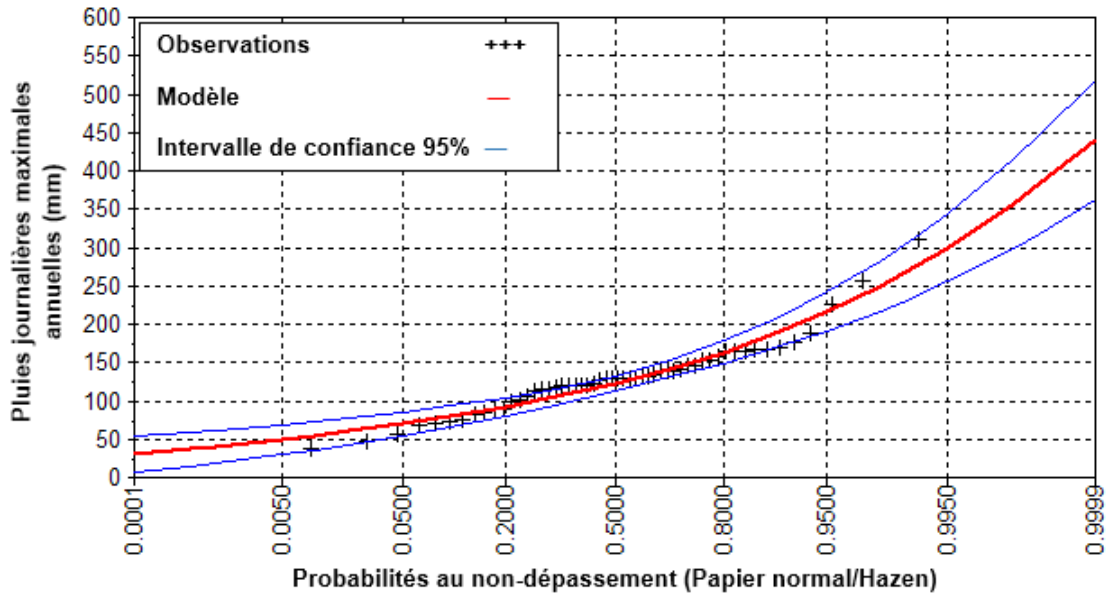


Figure 4. Ajustement des pluies journalières maximales à la loi de Gumbel.
Adjustment of maximum daily rainfall to Gumbel's law.

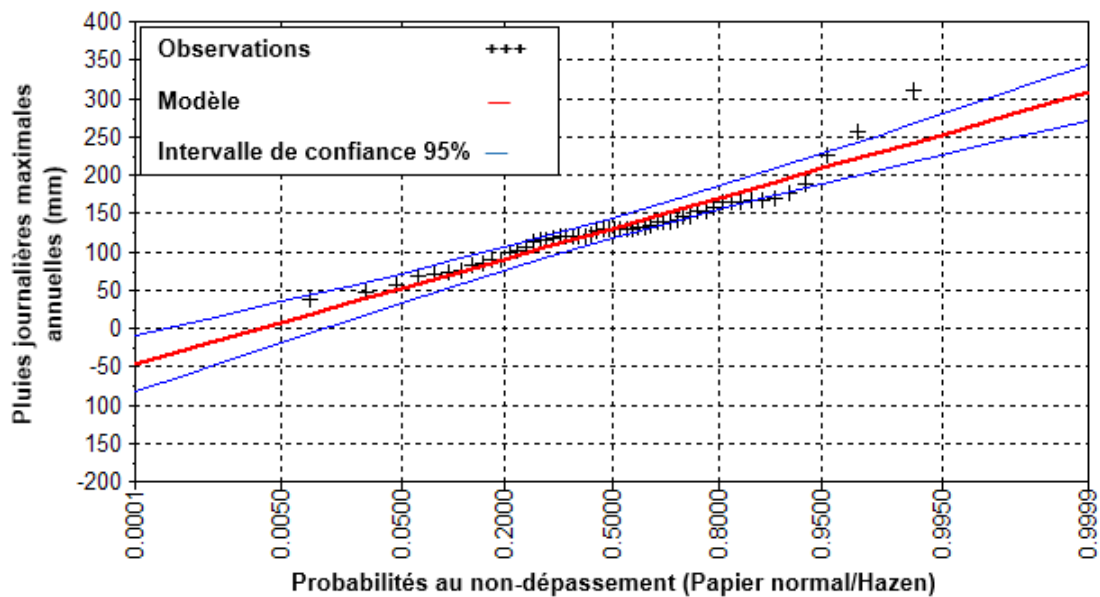


Figure 5. Ajustement des pluies journalières maximales à la loi log-normale.
Adjustment of maximum daily rainfall to log-normal distribution.

Tableau 4. Test du χ^2 appliqué aux pluies journalières maximales annuelles.

Table 4. χ^2 test applied to annual maximum daily rainfall.

Loi de probabilité	χ^2	p
Valeurs extrêmes généralisée (GEV)	7,33	0,18
Gumbel	12	0,06
Weibull	13,33	0,04

Tableau 5. Critères d'Akaike (AIC) et bayésien (BIC) appliqués aux lois de probabilité utilisées.

Table 5. Akaike (AIC) and Bayesian (BIC) criteria applied to probability laws used.

Loi de probabilité	BIC	AIC
Gumbel (EV1)	573,827	569,849
Log-normale	573,955	569,977
Weibull (EV3)	575,938	569,972

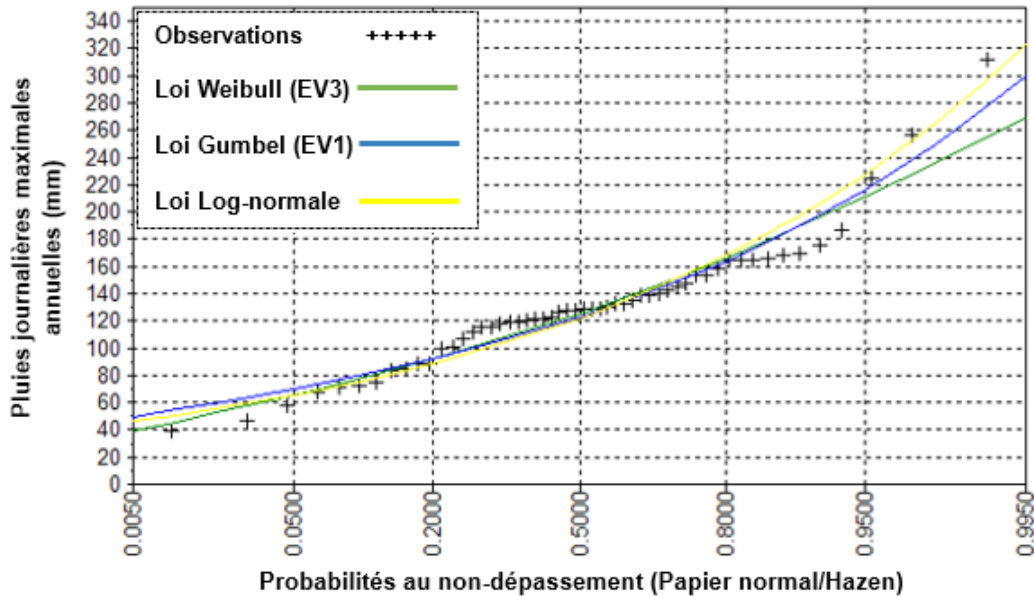


Figure 6. Comparaison des lissages des trois lois d'ajustement.
Comparison of smoothing of the three adjustment laws.

Weibull, ensuite vient la loi log-normale. Cependant, selon le critère bayésien, la loi de Gumbel est suivie par la loi log-normale, ensuite par la loi de Weibull. La loi de Gumbel a les valeurs les plus faibles des différents critères.

Pour trancher sur le cas des lois de Weibull et log-normale, les écarts entre les valeurs des critères de ces lois et ceux de la loi de Gumbel, considérée comme la référence ont été évalués (Tableau 6). Les écarts pour la loi Weibull sont de $-0,067$ (critère AIC) et $-2,056$ (critère bayésien) avec une moyenne de $-1,062$. Quant à la loi log-normale, les écarts évalués sont de $-0,159$ pour les deux critères et donc une moyenne de $-0,159$, et restent les plus faibles. Ainsi, ces résultats tranchent en faveur de la loi log-normale qui est plus performante pour l'ajustement des pluies journalières maximales annuelles de la station d'Abidjan. L'apport des résultats graphiques montre que la courbe de la loi log-normale est plus proche de celle de la loi de Gumbel. Cependant, elle a tendance à surestimer les pluies extrêmes. Quant à la loi de Weibull, elle sous-estime les pluies maximales annuelles. Le recoupage des résultats graphiques et numériques montre que le modèle log-normal a été plus performant que la loi de Weibull.

Tableau 6. Écarts des critères entre la loi de Gumbel et les autres modèles.

Table 6. Criteria deviations between Gumbel's law and other models.

Loi de probabilité	AIC	BIC	Moyenne
Weibull	-0,067	-2,056	-1,062
Gumbel	0	0	0
Log-normale	-0,159	-0,159	-0,159

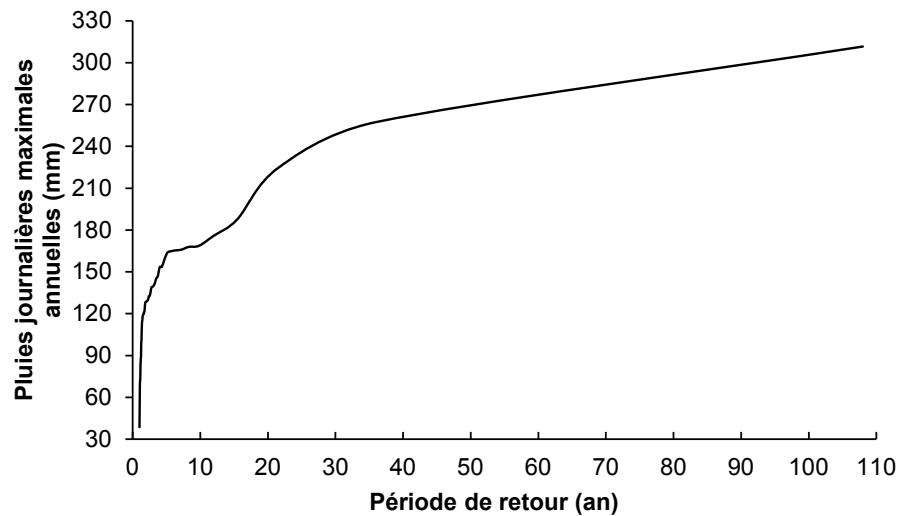
Les principaux résultats ont montré que les différentes hypothèses d'application de l'analyse fréquentielle ont été vérifiées. Ainsi, la série des valeurs maximales annuelles de précipitations journalières considérée (station d'Abidjan-Port-Bouët) est constituée par des valeurs indépendantes, homogènes et stationnaires, ce qui induit une fiabilité des résultats. Étant donné que la meilleure loi est celle qui présente les plus faibles valeurs des critères d'Akaike et bayésien, le meilleur modèle adapté à la série des pluies journalières maximales annuelles de la station d'Abidjan-Port-Bouët avec une marge d'erreur de 1 à 5 %, est la loi de Gumbel. En effet, tous les critères (graphiques et numériques) se sont accordés sur le fait que la loi de Gumbel reste la loi qui ajuste le mieux les données de pluies journalières maximales annuelles de la station de Port-Bouët (Abidjan). Elle est suivie par la loi log-normale et enfin vient la loi de Weibull.

4.2.3 Analyse des résultats de la fréquence de retour des pluies journalières maximales

Les périodes de retour évaluées varient entre un et 108 ans avec une moyenne de six ans (Tableau 7, Figure 7). La quasi-totalité des pluies journalières maximales étudiées est classée dans la catégorie des événements de type normal (83,3 %). Dans le type anormal ont été classées 7,41 % contre 5,56 % de type très anormal. Il a été enregistré par conséquent une seule pluie exceptionnelle (257 mm) et une seule pluie très exceptionnelle (312 mm) avec respectivement des périodes de retour de 36 et 108 ans.

Tableau 7. Fréquence de retour des pluies maximales journalières à la station d'Abidjan.*Table 7. Return frequency of daily maximum rainfall at the Abidjan station.*

Type d'évènement	Fréquence d'apparition	Pourcentage (%)	Pluviométrie (mm)
Normal	45	83,33	38,6-164,8
Anormal	4	7,41	164,8-168,7
Très anormal	3	5,56	168,7-224,8
Exceptionnel	1	1,85	257,4
Très exceptionnel	1	1,85	311,6

**Figure 7. Fréquence de retour des pluies maximales journalières à la station d'Abidjan.**
Return frequency of daily maximum rainfall at the Abidjan station.

4.3 Discussion

Les résultats obtenus au cours de cette étude corroborent les résultats de certains travaux antérieurs (GOULA *et al.*, 2007; GOULA *et al.*, 2010; SORO, 2011). En effet, GOULA *et al.* (2007) ont réalisé des travaux dans ce sens à partir des pluies maximales journalières annuelles de 34 postes pluviométriques de la Côte d'Ivoire couvrant la période 1947-1995. Les pluies maximales journalières annuelles ont été ajustées à une loi de valeurs extrêmes sélectionnée parmi les lois log-normale et de Gumbel. Selon les résultats, la cartographie des quantiles de période de retour de deux à 100 ans à l'aide du krigeage indique que la loi log-normale convient mieux aux séries des régimes climatiques de type équatorial de transition et équatorial de transition atténué, surtout dans les parties ouest et centrale du pays. La loi de Gumbel paraît bien adaptée aux régimes de montagne, équatorial de transition et équatorial de transition atténué surtout dans sa partie nord et une petite portion de sa zone sud. En ce qui concerne la station d'Abidjan, les auteurs sont parvenus à la conclusion selon laquelle le modèle de Gumbel a été plus performant que le modèle log-normal. GOULA *et al.*

(2010) ont conclu, au cours de leur étude portant sur 47 postes pluviométriques ivoiriens avec des données de pluies maximales annuelles couvrant la période 1947-1993, que la loi de Gumbel et la loi log-normale ajustent au mieux les pluies maximales annuelles. Selon les travaux de SORO (2011) réalisés en Côte d'Ivoire sur la période 1942-2002, il est difficile d'affirmer la prédominance d'une distribution de probabilité par rapport à une autre. La loi généralisée des valeurs extrêmes de type I (loi de Gumbel) s'ajuste bien aux séries de maxima annuels de 15 postes pluviométriques. La distribution de probabilité des pluies journalières maximales annuelles de 13 stations suit celle de la loi généralisée des valeurs extrêmes de type II (loi de Fréchet). La loi log-normale à deux paramètres s'ajuste bien aux séries de maxima annuels de dix postes pluviométriques. La loi généralisée des valeurs extrêmes de type III (loi de Weibull) est appropriée pour décrire le comportement asymptotique de la queue de distribution des pluies extrêmes de six postes pluviométriques. Aucune distribution de probabilité des pluies journalières maximales annuelles ne suit la distribution statistique de Pearson type III. Il a conclu pour le cas spécifique d'Abidjan que les données suivent la loi de Gumbel.

En dehors du contexte ivoirien, des comparaisons ont été faites avec les résultats de certains travaux. Trois tendances se sont dégagées. La première tendance consacre la suprématie de la loi de Gumbel sur les autres lois. Dans ce contexte, plusieurs études sont parvenues à cette conclusion. À partir des données de 35 stations couvrant globalement la période de 1921 à 2001, cinq lois statistiques (GEV, Gumbel, log-normale, Pearson type III et log-Pearson type III) ont été utilisées pour l'analyse fréquentielle de maxima annuels de pluies journalières (AGUE et AFOUDA, 2015). Le choix du meilleur modèle a été fait sur la base de la comparaison numérique. Les résultats ont montré une prédominance des lois Gumbel (51,43 %) et log-normale (28,57 %). Dans l'ensemble, il est constaté que les lois de probabilité des maxima annuels de pluies journalières n'obéissent pas spécifiquement à un régime pluviométrique donné. L'analyse fréquentielle a été appliquée par KOUMASSI *et al.* (2014) aux données de hauteurs de pluies journalières extraites de huit stations appartenant au bassin versant de la Sota (Bénin). Ces données s'étendent sur la période 1965-2008. Les principaux résultats ont montré que la loi de Gumbel et la loi log-Pearson type III s'adaptent le mieux aux séries pluviométriques maximales.

Selon HABIBI *et al.* (2013), une analyse fréquentielle de séries annuelles de pluies maximales journalières a été réalisée sur les données de 27 stations pluviométriques du bassin du Chott Chergui (Algérie). Ce choix a été porté sur quatre lois usuellement appliquées à l'étude et l'analyse fréquentielle des pluies journalières maximales. La période choisie est de 1970-1971 à 2004-2005. Elle a servi à la prévision des quantiles. Les lois utilisées sont : la loi généralisée des extrêmes (GEV) à trois composantes, celles des valeurs extrêmes à deux composantes (Gumbel et log-normale) à deux paramètres et la loi Pearson type III à trois paramètres. La loi GEV a montré une bonne adéquation aux séries des pluies journalières maximales du bassin du Chott Chergui (Algérie). Ces différents résultats confortent la deuxième tendance des auteurs qui ont montré l'inadéquation de la loi de Gumbel avec la distribution des maxima annuels de pluie. Selon les résultats des travaux de MULLER (2006), dans un grand nombre de cas, la loi Gumbel traditionnellement utilisée par les hydrologues français est rejetée au profit de la loi GEV non bornée supérieurement et de paramètre de forme non nul, impliquant des quantiles de pluie extrême bien plus forts qu'avec une loi Gumbel. Cependant, une conclusion unique est difficile à établir, car les résultats diffèrent suivant les séries étudiées (MULLER, 2006). En effet, compte tenu de la forte incertitude liée à l'estimation du paramètre de forme de la loi GEV, la loi Gumbel est acceptable dans un nombre non négligeable de cas, pour modéliser les maxima annuels.

La dernière tendance est celle qui concerne une égalité de performance entre le modèle de Gumbel et les autres modèles statistiques. Ainsi, des travaux ont été réalisés par

BENKHALED (2007) dans la région du Cheliff. Ces travaux étaient basés sur une analyse comparative des méthodes GEV et Gumbel à partir de quatre échantillons de données échelonnées sur une durée comprise entre 21 et 30 ans. Les résultats obtenus ont montré que les méthodes GEV et Gumbel sont parvenues à des performances semblables avec des différences voisines de 12 % pour une période de retour de 100 ans. Les résultats montrent que les quantiles les plus élevés sont obtenus par la méthode GEV. Une analyse statistique de séries annuelles de pluies maximales journalières a été réalisée sur les données de 47 stations météorologiques situées dans le bassin du Guadalhorce (Espagne) par FERRER (1992) en utilisant des méthodes usuellement appliquées à l'étude des crues; trois lois de distribution ont ainsi été retenues dans cette analyse : la loi des valeurs extrêmes généralisées, la loi log-Pearson III et la loi des valeurs extrêmes à deux composantes. Elles ont été ajustées en utilisant conjointement des données locales et régionales. Les résultats issus des trois méthodes ont fourni des résultats semblables avec des différences voisines de 15 % pour une période de retour de 1 000 ans.

5. CONCLUSION

L'intérêt principal de ce travail a été de trouver un modèle fréquentiel capable de rendre compte du régime des pluies journalières maximales annuelles de la station de Port-Bouët (Abidjan). Les modèles de distribution usuels utilisés pour l'ajustement des pluies journalières maximales annuelles à savoir : GEV (Weibull), Gumbel et log-normal, ont donné des résultats satisfaisants dans l'ensemble. Les principaux résultats ont montré que les différentes hypothèses d'application de l'analyse fréquentielle ont été vérifiées. Ainsi, la série des valeurs maximales annuelles de précipitations journalières considérée (station d'Abidjan-Port-Bouët) est constituée par des valeurs indépendantes, homogènes et stationnaires, ce qui induit une fiabilité des résultats. Les fortes valeurs du gradex observées montrent que les pluies journalières maximales annuelles de la station d'Abidjan-Port-Bouët varient très fortement d'une fréquence à l'autre. Ainsi, Abidjan est une zone où le risque de pluies extrêmes en général et en particulier le risque de pluies journalières maximales est très élevé. D'après les résultats du critère visuel graphique, du test du χ^2 et des critères d'Akaike et bayésien, il en ressort que la série de pluies journalières maximales annuelles de la station d'Abidjan suit préférentiellement la loi de Gumbel. Elle est suivie par la loi log-normale. Il est donc recommandé de travailler avec la distribution de Gumbel qui n'implique que deux paramètres et qui est traduite par une expression mathématique plus simple dans toute étude de dimensionnement d'ouvrages hydrauliques en général et dans le domaine des ouvrages d'évacuation des eaux pluviales en particulier dans le district d'Abidjan.

L'application de l'analyse fréquentielle aux pluies extrêmes permet de déterminer des quantiles selon les durées de retour. Ces quantiles servent entre autres au dimensionnement des ouvrages hydrauliques. Cependant, les pluies extrêmes servant de base de ces analyses sont elles-mêmes affectées par le phénomène des changements climatiques. Ce qui soulève la question de la période de référence qu'il convient de retenir pour la définition des caractéristiques hydrologiques dans ce contexte de changement climatique en Afrique de l'Ouest.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article remercient les instructeurs dont les critiques et les suggestions ont permis d'améliorer le présent article. Ils remercient également la Direction de la SODEXAM pour leur avoir fourni les données climatiques utilisées dans cette étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGUE A.I. et A. AFOUDA (2015). Analyse fréquentielle et nouvelle cartographie des maxima annuels de pluies journalières au Bénin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 9, 121-133.
- BENABDESSELAM T. et H. AMARCHI (2013). Approche régionale pour l'estimation des précipitations journalières extrêmes du Nord-Est algérien. *Courrier du Savoir*, 17, 175-184.
- BENKHALED A. (2007). Distributions statistiques des pluies maximales annuelles dans la région du Cheliff. Comparaison des techniques et des résultats. *Courrier du Savoir*, 8, 83-91.
- DONGO K., M. DIOMANDE, C. GUELADIO, M. TANNER et J. BIEMI (2008). Improving urban drainage in Abidjan, Côte d'Ivoire. *Afr. J. Sci. Technol.*, 8, 8-16.
- EL ADLOUNI S., B. BOBEE et T.B.M.J. OUARDA (2008). On the tails of extreme event distributions. *J. Hydrol.*, 355, 16-33.
- EL GHACHI M. et F.Z. MORCHID (2015). Analyse des tendances pluviométriques dans la ville de Khénifra dans un contexte de variabilité climatique. *J. Mater. Environ. Sci.*, 6, 3346-3358.
- FALLOT J.M. et J.A. HERTIG (2013). Détermination des précipitations extrêmes en Suisse à l'aide d'analyses statistiques et augmentation des valeurs extrêmes durant le 20^{ème} siècle. *Mémoires de la Société vaudoise des Sciences naturelles*, 25, 23-34.
- FERRER J.P. (1992). Analyse statistique de pluies maximales journalières : comparaison de différentes méthodes et application au bassin Guadalhorce (Espagne). *Hydrologie Continentale*, 7, 23-31.
- GOULA B.T.A., B. KONAN, Y. BROU, I. SAVANE, F. VAMORYBA et B. SROHOUROU (2007). Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale : cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois Log-normale et de Gumbel. *Hydrol. Sci. J.*, 52, 49-67.
- GOULA B.T.A., G.E. SORO, A. DAO, F.W. KOUASSI et B. SROHOUROU (2010). Frequency analysis and new cartography of extremes daily rainfall events in Côte d'Ivoire. *J. Appl. Sci.*, 10, 1684-1694.
- GUMBEL E.J. (1958). *Statistics of extremes*. Columbia University Press, NY, États-Unis, 375p.
- HABIBI B., M. MEDDIA et A. BOUCEFIANE (2013). Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales : cas du Bassin-Chergui. *Nature Tech. J.*, 8, 41-48.
- HANGNON H., F. DE LONGUEVILLE et P. OZER (2015). Précipitations 'extrêmes' et inondations à Ouagadougou : quand le développement urbain est mal maîtrisé. *XXVIII^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 1-4 juillet 2015, Liège, Actes, p. 497-502.
- INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE (INS) (2014). *Recensement général de la population et de l'habitat 2014 : principaux résultats préliminaires*. Abidjan, Côte d'Ivoire, 26 p.
- KABLAN M. (2016). *Vulnérabilité et adaptation des populations urbaines aux effets des variations climatiques (température et pluviométrie) : analyse de la situation dans la commune de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire*. Thèse de doctorat, Univ. Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire, 242 p.
- KONATE L., B.H. KOUADIO, B. DJÈ, G. AKE, H. VAMI, L. GNAGNE, M. KOFFI et J. BIEMI (2016). Caractérisation des pluies journalières intenses et récurrences des inondations : apport des totaux glissants trois (3) jours à la détermination d'une quantité seuil d'inondation (District d'Abidjan au Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *IJJAS*, 17, 990-1003.

- KOUMASSI D., A.E. TCHIBOZO, E. VISSIN et E. HOUSSOU (2014). Analyse fréquentielle des évènements hydro-pluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin. *Afrique Sci.*, 10, 137-148.
- KOUTSOYIANNIS D. (2004a). Statistics of estimation of extreme rainfall I. Theoretical of investigation. *Hydrol. Sci. J.*, 49, 575-590.
- KOUTSOYIANNIS D. (2004b). Statistics of estimation of extreme rainfall II. Theoretical of investigation. Empirical investigation of long rainfall records. *Hydrol. Sci. J.*, 49, 591-610.
- MOHYMONT B. et R.G. DEMARÉE (2006). Courbes intensité-durée-fréquence des précipitations à Yangambi, Congo, au moyen de différents modèles de type Montana. *Hydrol. Sci. J.*, 51, 239-253.
- MULLER A. (2006). *Comportement asymptotique de la distribution des pluies extrêmes en France*. Thèse de doctorat, Univ. Montpellier 2, France, 214 p.
- NEPPEL L., P. ARNAUD, F. BORCHI, J. CARREAU, F. GARAVAGLIA, M. LANG, E. PAQUET, B. RENARD, J.M. SOUBEYROUX et J.M. VEYSSEIRE (2014). Résultats du projet Extraflo sur la comparaison des méthodes d'estimation des pluies extrêmes en France. *Houille Blanche*, 2, 14-19.
- ONIBON H., T. OUARDA, B. BOBEE, M. BARBET, A. SAINT-HILAIRE et P. BRUNEAU (2004). Regional frequency analysis of annual maximum daily precipitation in Quebec. *Hydrol. Sci. J.*, 49, 717-735.
- ROSBJERC D., J. CORREA et P.F. RASMUSSEN (1992). Justification des formules de probabilité empirique basées sur la médiane de la statistique d'ordre. *Rev. Sci. Eau*, 5 (4), 529-540.
- SAMBOU S. (2004). Modèle statistique des hauteurs de pluies journalières en zone sahélienne : exemple du bassin amont du fleuve Sénégal. *Hydrol. Sci. J.*, 49, 115-129.
- SORO G. (2011). *Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire*. Thèse de doctorat, Univ. Nangui-Abrogoua, Côte d'Ivoire, 172 p.
- YUE S. et P. PILON (2004). A comparison of the power of the *t*-test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend-detection. *Hydrol. Sci. J.*, 49, 21 - 37.
- ZAHAR Y. et J.P. LABORDE (2007). Modélisation statistique et synthèse cartographique des précipitations journalières extrêmes de Tunisie. *J. Water Sci.*, 20, 409-424.