

Analyse fréquentielle et détermination des seuils pluvio-hydrologiques de risques d'inondation dans le bassin-versant de l'Oti au Togo

Dambré KOUNGBANANE^{1,5*}, Pascal Eric ZAHIRI², Henri Sourou TOTIN VODOUNON^{3,4}, Ernest AMOUSSOU^{3,4}, Lalle Yendoukoa LARE⁵ et H. Djan'Na KOUBODANA^{6,7}

¹ Centre d'Excellence Africain sur les Changements Climatiques, la Biodiversité et Agriculture Durable (CEA-CCBAD), Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire

² Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et Mécanisme des Fluides (LAPA-MF), UFR des Sciences de la Structure, de la Matière et de la Technologie (SSMT), Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire

³ Laboratoire de Climatologie & Ethnoclimatologie Tropicales, Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université de Parakou, Bénin, BP 123, Parakou, Bénin

⁴ Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Écosystèmes et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, 03 BP 1122, Cotonou, Bénin

⁵ Laboratoire de Recherches Biogéographiques et d'Études Environnementales, Département de Géographie, Université de Lomé, Togo

⁶ West Africa Science Service Centre on Climate Change and Adapted Land Use, WASCAL-Climate Change and Water Resources, University of Abomey Calavi, 03 BP 526 Cotonou, Benin

⁷ Faculté des Sciences, Université de Lomé, 01 BP 1515 Lomé, Togo

* Correspondance, courriel : dambrekoungbanane@gmail.com

Résumé

L'Afrique de l'Ouest connaît depuis quelques décennies une variabilité spatio-temporelle des régimes pluviohydrologiques caractérisés par l'accroissement des phénomènes climatiques extrêmes entraînant des inondations et des sécheresses. Le Togo n'échappe pas à ces fluctuations hydrologiques et climatiques en termes d'aléas d'inondation. La présente étude vise à faire une analyse fréquentielle des événements pluviohydrologiques extrêmes associés aux inondations afin d'estimer leur période de retour dans le bassin-versant de l'Oti. La démarche méthodologique s'est basée sur la collecte des données de pluies (Barkoissi, Borgou, Dapaong, Guérrin-Kouka, Kanté, Mandouri, Mango, Tankpamba, Toaga) et de débits journaliers (Mango) sur la période 1957-2017. Les indices d'anomalies de précipitation, de débits et la classification de McKee ont été utilisés pour caractériser les seuils d'inondation. De même, la période d'occurrence des pluies maximales journalières et des débits de crues est déterminée par la loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV) avec la méthode de maximum de vraisemblance. Il ressort de l'analyse des résultats obtenus que les seuils journaliers pluviométriques d'aléa d'inondation sont de 76,72 mm pour le risque limité, 92,23 mm pour le risque modéré, 96,83 mm pour le risque significatif et 104,45 mm pour le risque critique. Les pluies maximales journalières comprises entre 101 à 131 mm, 109 à 154 mm et 113 à 172 mm sont qualifiées d'exceptionnelles et très exceptionnelles et ont une période de retour de 20, 50 et 100 ans. Dans le même sens, les débits seuils de risques d'inondation sont de 507,62 m³/s pour le risque limité, 979 m³/s pour le risque modéré, 1223,12 m³/s pour le risque significatif et 1515 m³/s pour le risque critique. Les événements hydrologiques exceptionnels et très exceptionnels ont une période de retour supérieur à 50 et 100 ans et correspondent respectivement aux débits de 1360 à 2340 m³/s et 1490 à 2670 m³/s.

Mots-clés : Bassin de l'Oti, analyse fréquentielle, pluviohydrologiques, risque d'inondation.

Abstract**Frequency analysis and determination of rainfall-flood thresholds for flood risk in the Oti catchment area in Togo**

West Africa has for some decades experienced a spatio-temporal variability of the rainfall-hydrological regimes characterized by the increase of extreme climatic events leading to floods and droughts. Togo does not escape these hydrological and climatic fluctuations in terms of flood hazards. The research aims to make a frequency analysis of extreme rainfall events associated with floods in order to estimate their return period in the Oti catchment area. The methodological approach was based on the collection of rainfall data (Barkoissi, Borgou, Dapaong, Guérrin-Kouka, Kanté, Mandouri, Mango, Tankpamba, Toaga) and daily flows (Mango) over the period 1957-2017. Precipitation anomaly indices, flow rates, and McKee's classification were used to characterize flood thresholds. Similarly, the period of occurrence of daily maximum rainfall and flood discharge is determined by the Generalized Extrem Values (GEV) distribution with the maximum likelihood method. From the results analysis, the daily rainfall risk thresholds for flood hazard are 76.72 mm for the limited risk, 92.23 mm for the moderate risk, 96.83 mm for the significant risk and 104.45 mm for critical risk. The maximum daily rainfall between 101 to 131 mm, 109 to 154 mm and 113 to 172 mm is considered exceptional and very exceptional and has a return period of 20, 50 and 100 years. In the same direction, the flood risk threshold flow rates are 507.62 m³ / s for the limited risk, 979 m³ / s for the moderate risk, 1223.12 m³ / s for the significant risk and 1515 m³ / s for critical risk. The exceptional and very exceptional hydrological events have a return period greater than 50 and 100 years and correspond respectively to flows of 1360 to 2340 m³ / s and 1490 to 2670 m³ / s.

Keywords : *Oti catchment, frequency analysis, rainfall-hydrological, flood risk.*

1. Introduction

L'accroissement des phénomènes climatiques extrêmes entraînant des inondations et des sécheresses dans le monde est l'une des conséquences des changements climatiques. Cette situation se traduit par l'occurrence des événements pluvieux extrêmes au cours de ces dernières années. Selon les projections de [1] et le quatrième rapport du [2], ces événements pluvieux extrêmes augmenteront au cours des prochaines décennies et surtout dans les pays en développement dont les pays de l'Afrique subsaharienne. En effet, les climats Ouest-Africains sont sujets à de fortes variabilités ou à des changements selon les échelles de temps et d'analyse dont les conséquences restent néfastes pour le développement durable [3]. Ce qui entraîne l'apparition fréquente des événements hydrométéorologiques extrêmes et des catastrophes [4 - 7]. Au Togo, la variabilité climatique caractérisée par des épisodes d'inondations sont de plus en plus récurrentes ces deux dernières décennies [8 - 12]. Ce qui laisse des empreintes et des séquelles non encore réparées [13]. L'intensité des pluies est l'un des paramètres majeurs des inondations. Ainsi, même si le Togo a connu une soixantaine d'inondations urbaines et rurales entre 1925 et 1992 qui ont causé des dégâts matériels importants et des pertes en vies humaines [13], ces deux dernières décennies ont été particulièrement marquées par une recrudescence des inondations [14]. Ces inondations dégradent l'environnement physique et le cadre de vie des populations. Pour [14], les récurrentes inondations de la période 2000-2010 s'expliquent par le fait des conditions climatiques favorables aux pluies diluviennes, à la pluviométrie abondante et répétitive. Le bassin-versant de l'Oti au Togo est en proie aux phénomènes pluviohydrologiques extrêmes dont l'occurrence des pluies journalières a des répercussions sur sa dynamique hydrologique, les crues exceptionnelles, ce qui impacte la vie des populations riveraines [15]. Cette étude vise à faire une analyse fréquentielle des événements pluviohydrologiques extrêmes associés aux inondations afin d'estimer leur période de retour dans le bassin-versant de l'Oti.

2. Données et méthodes

2-1. Présentation du secteur d'étude

Le bassin-versant de l'Oti est situé dans le bassin du fleuve Volta et draine une partie des pays transfrontaliers (Burkina-Faso, Bénin, Togo et le Ghana). Il couvre entièrement les régions des savanes et de la Kara, le 1/3 de la région centrale, à peine 1/5 de la région des plateaux et une petite portion de la région maritime sur une superficie de 26 700 km², soit environ 47,3 % de la superficie du territoire du Togo et 4,3 % de la superficie du bassin de la Volta qui fait 400 000 km² [16]. C'est la partie du bassin située dans la région des savanes qui est intéressée par cette étude où se manifestent les phénomènes d'inondation. Le bassin-versant de l'Oti dans la région des savanes est située entre 11°22' et 10°00'N et -0°3' et 0°50'E (*Figure 1*). Le bassin-versant de l'Oti fait partie de la vaste plaine de l'Oti. Cette plaine de l'Oti est une très vaste gouttière centrée sur l'Oti qui la traverse suivant une direction Nord-est Sud-ouest et reçoit à l'Est les rivières venant des inselbergs pré-atakoriens et à l'Ouest celles issues des plateaux de Dapaong et de Bombouaka [17]. La plaine de l'Oti, avec des altitudes basses ne dépassent guère 200 m, est une plaine d'inondation [18]. Cette plaine s'inonde pendant la saison pluvieuse est formée d'une succession de bas plateaux faiblement inclinés vers les talwegs qu'ils dominent d'environ 20 à 30 m [19]. Le bassin-versant de l'Oti fait partie intégrante du domaine du climat tropical de type soudanien où le déplacement du Front Intertropical (FIT) explique l'alternance de la saison pluvieuse et de la saison sèche [20]. La saison des pluies qui s'étend de mai à octobre est de plus en plus marquée par une tendance au rétrécissement ou à l'allongement selon les années. Ainsi, les mois moyennement humides (pluies effectives) dure quatre mois (juin à septembre).

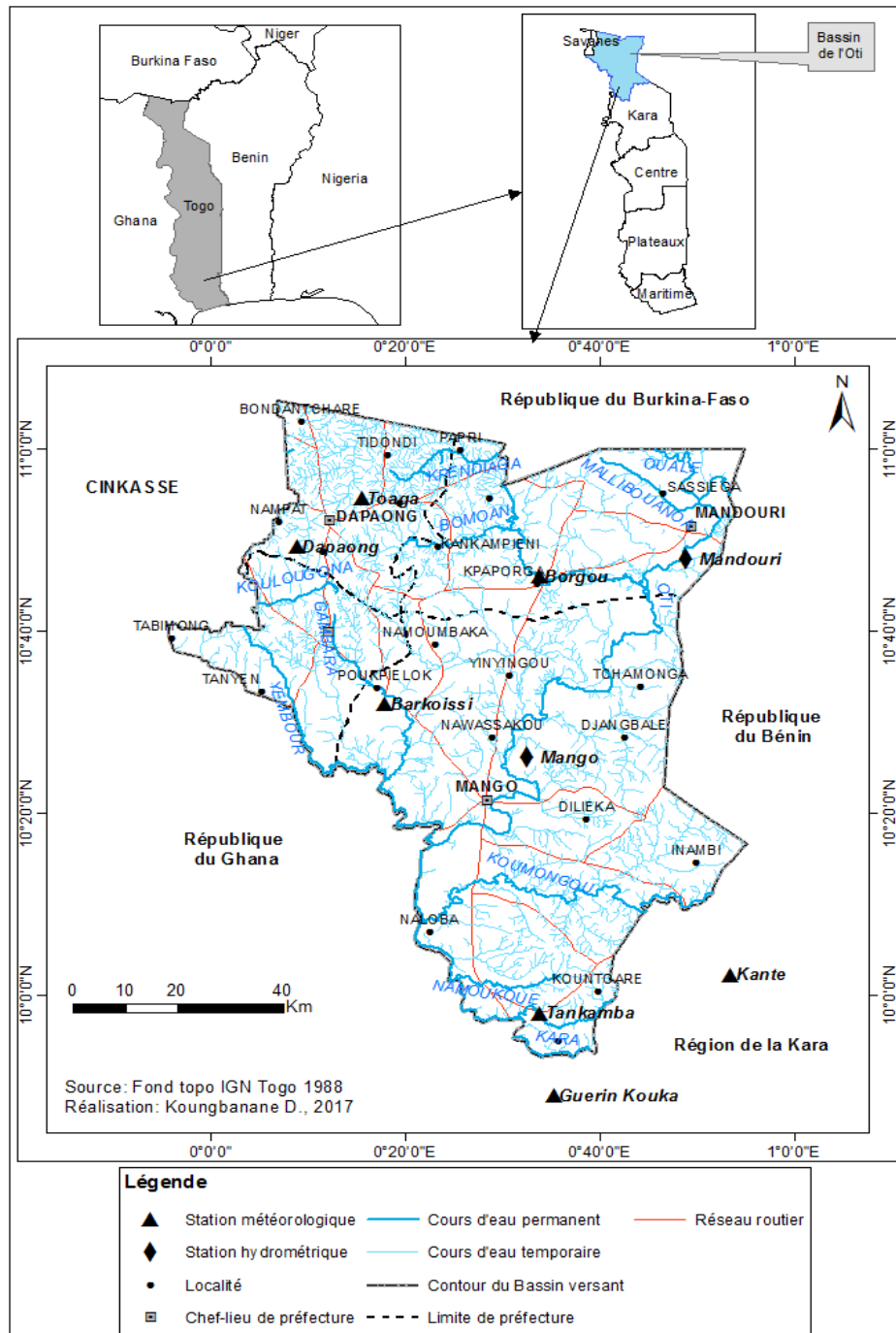


Figure 1 : Localisation géographique du bassin-versant de l'Oti, réseau hydrographique et réseau d'observation hydrométéorologique

2-2. Données

Il s'agit des données hydroclimatiques notamment les précipitations et les débits qui sont utilisés au pas de temps journalier. Les relevés de pluie sont collectés sur neuf stations météorologiques (Barkoissi, Borgou, Dapaong, Guérrin-Kouka, Kanté, Mandouri, Mango, Tankpamba, Toaga) de la Direction de la Météorologie Nationale à Lomé et sur la période de 1961-2017. Les débits de la station hydrométrique de Mango (1957-2017) ont été obtenus à la Direction Générale de Ressources en eau, au Service de l'Hydrologie à Lomé (Togo).

2-3. Méthodes

2-3-1. Détermination des évènements pluviométriques extrêmes

Les indices pluviométriques et hydrologiques de la présente étude ont permis de déterminer et analyser des évènements pluvieux et hydrologiques extrêmes comme l'ont fait [21] au Sahel Soudanien, [22] au Burkina-Faso. L'indice de précipitations normalisé [23] est un indice utilisé dans l'évaluation des inondations [7, 24 - 27]. Ainsi, il peut être assimilé à un outil pour caractériser les évènements pluvieux extrêmes à la normale [25]. En hydrologie, pour l'aléa des débits, c'est l'indice de débits normalisés ou Standardized Flow Index (SFI) utilisé par [26, 27]. Ainsi, à partir des pluies et des débits journaliers pour des échelles de temps multiples, ces indices standardisés [28] ont été calculés. Alors, l'indice standardisé est basé sur l'équiprobabilité de transformation des valeurs de pluie, agrégées à *k*-mois en valeurs standard normales, avec *k* généralement fixé en fonction des objectifs de l'analyse avec pour exemple : *k* = 1, 3, 6, 9, 12, 24, 36 mois [29]. C'est le logiciel SL6 qui permet d'avoir ces échelles de temps pour les indices standardisés. A l'origine, [23] proposent pour le calcul de l'indice SPI une transformation Gamma. Cet indice est utilisé aux pas de temps mensuels ou plurimensuels. Ainsi, l'indice standardisé classique (noté Z) a été utilisé, mais avec un changement de pas de temps à l'échelle journalière. Les données de précipitations et de débits servent à calculer ces indices à travers la **Formule** suivante :

$$Z = \frac{y - \mu}{\sigma} \tag{1}$$

où, *y* : la valeur unitaire du paramètre considéré ; μ : la moyenne de la variable ; σ : l'écart type de la variable.

2-3-2. Détection des seuils pluviométriques et hydrologiques de risques d'inondation

Les catégories SPI/SFI (**Tableau 1**), ont permis de classer les valeurs maximales de précipitations et de débits journaliers en termes d'aléas d'inondation, pour les différents niveaux de risques (limité, modéré, significatif et critique) dans le bassin-versant de l'Oti. Cette catégorisation a été possible grâce à une transposition de la classification de [23] aux données journalières utilisées. Par la normalisation des séries des pluies maximales journalières et des débits maximaux journaliers de l'Oti à Mango, ces seuils ont été déterminés.

Tableau 1 : Classification des valeurs SPI, des catégories d'inondation et des niveaux de risques

Valeurs des seuils SPI/SFI	Catégorie d'inondation	Seuils de risques
2,00 et plus	Catastrophique	Critique
1,5 à 1,99	Grave	Significatif
1 à 1,49	Négligeable	Modéré
0 à 0,99	Sans effet	Limité

Source : Adapté de [23], [27] et [28]

2-3-3. Analyse fréquentielle des évènements hydroclimatiques extrêmes

L'analyse fréquentielle dans cette étude permet de caractériser l'ampleur des évènements hydropluviométriques extrêmes afin de définir les probabilités d'occurrence et cette méthode repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel. C'est une équation qui décrit le comportement statistique d'une série d'évènements et la probabilité d'apparition d'un évènement de valeur donnée comme l'ont fait [30 - 33].

2-3-4. But de l'analyse

Le but de cette analyse est de caractériser l'évolution des pluies et des débits extrêmes en 24 heures afin d'en déterminer la fréquence d'occurrence et leur répercussion sur le bassin-versant de l'Oti à l'exutoire de Mango. C'est partant de là, que les données ont été reconstituées.

2-3-5. Constitution et contrôle qualité des données de pluie et de débit

La disponibilité des données des hauteurs de pluies et des débits au pas de temps journalier sur le bassin-versant de l'Oti à l'exutoire de Mango, a permis d'avoir la série des hauteurs maximales annuelles. La série de 1961 à 2017, soit 57 ans de la taille de l'échantillon a fait le contrôle de qualité et de représentativité. Le test de stationnarité de Kendall a permis de détecter la tendance dans les séries [34, 35, 36], alors que celui d'indépendance de Wald-Wolfowitz [37] a servi à détecter les différences de position et la formes des distributions. Ces différents tests ont été déjà utilisés dans plusieurs études en Afrique de l'Ouest notamment au Bénin par [33, 38 - 40], en Côte d'Ivoire par [41]. Le test de Wilcoxon est un test d'homogénéité qui permet de vérifier si l'échantillon est formé de la réalisation de la même variable et les éléments de l'échantillon proviennent de la même population [33, 42]. Cependant, l'adéquation d'une série de données à une famille de loi de probabilités ou d'indépendance entre deux variables aléatoires a été réalisé par le test de Khi carré [33, 43, 44]. Ce test permet de vérifier si un échantillon aléatoire d'une variable Y donne des observations comparables à celles d'une loi de probabilité P définie a priori dont on pense, pour des raisons théoriques ou pratiques, qu'elle devrait être la loi Y., l'hypothèse nul (H0) d'un test de Khi carré d'adéquation dénommé aussi test de conformité est alors : la variable Y suit la loi de probabilité p., en terme de valeur -P., l'hypothèse nulle est généralement rejetée lorsque $p \leq 5\%$.

2-3-6. Choix du modèle fréquentiel

Plusieurs lois statistiques sont utilisées pour l'analyse fréquentielle. Chacune d'elle s'adapte plus ou moins bien à l'ajustement de l'échantillon, selon la taille de celui-ci, et surtout la nature du phénomène considéré. Ainsi, le choix est porté sur la loi Généralisée des Valeurs extrêmes (GEV) qui est une loi à trois paramètres comme une généralisation de la loi de Gumbel. Cette loi a fait l'objet de beaucoup d'étude en Côte d'Ivoire [45], et au Bénin [33, 46] et au Togo [34]. Pour se faire, la loi GEV a été appliquée aux pluies maximales moyennes journalières de tout le bassin et aux débits maximaux journaliers annuels de la rivière Oti à Mango. Elle est déterminée par la **Formule** suivante :

$$f(x) = \exp \left(- \exp \left(- \frac{x-a}{b} \right)^{\frac{1}{k}} \right) \text{ pour } k \neq 0 \quad (2)$$

Ainsi, l'ajustement des paramètres est réalisé par la méthode de maximum de vraisemblance, qui permet de calculer les incertitudes sur les paramètres grâce au calcul de l'inverse de la matrice de Fisher comme l'a fait [39] en Afrique de l'Ouest dans le bassin versant du Mono situé entre le Togo et le Benin. De même, il faut noter que plusieurs études ont utilisé l'estimation des quantiles sur les extrêmes hydroclimatiques [47 - 50]. Des quantiles à partir des 90^{ème}, 95^{ème} et 99^{ème} quantiles ou percentiles, sont calculés sur les précipitations et les débits en 24 heures associées aux périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 50, 100 ans, pour les évènements pluviométriques et hydrologiques extrêmes pouvant engendrer des inondations dans le bassin-versant de l'Oti au Togo.

3. Résultats et discussion

Pour faire l'analyse fréquentielle des événements pluviométriques extrêmes associés aux inondations dans le bassin-versant de l'Oti, il est nécessaire de procéder à :

- l'analyse des indices pluviométriques et hydrologiques,
- la détermination des seuils pluviométriques,
- l'analyse fréquentielle des événements pluviométriques extrêmes.

3-1. Indices pluviométriques et hydrologiques

3-1-1. Analyse de l'évolution de l'indice normalisé de précipitations (SPI) et de débits (SFI) dans le bassin-versant de l'Oti à Mango

La **Figure 2** présente l'évolution interannuelle du maximum journalier de précipitation dans le bassin-versant de l'Oti de 1961 à 2017.

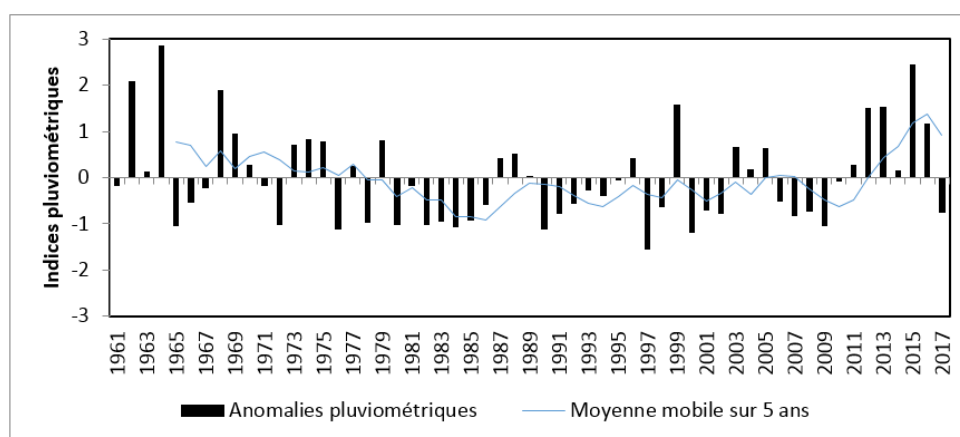


Figure 2 : Variation interannuelle des indices standardisés de précipitations dans le bassin-versant de l'Oti de 1961 - 2017

Il ressort de l'analyse de la **Figure 2** que les indices pluviométriques présentent une variabilité sur toute la série. De plus, les anomalies positives caractérisent les années humides et varient de 0 à 2,85 dans le bassin-versant de l'Oti. Trois années (1962, 1964 et 2015) sont considérées comme extrêmement humides dans l'ensemble du bassin-versant en fonction des indices standardisés de précipitation qui sont au-delà de +2. De même, trois phases pluviométriques se dégagent de l'examen de cette figure. La première phase correspond à la période 1961-1970 qui était caractérisée par une fréquence élevée des anomalies positives et sur les trois années extrêmement humides, deux (1962, 1964) sont de cette phase avec par exemple un indice standardisé de précipitation de +2,85 en 1964. La deuxième phase va de 1971-1990. Elle était caractérisée par la baisse interannuelle des pluies, voire une dominance des anomalies négatives (ne fait pas l'objet de cette étude). La dernière phase couvre la période allant de 1991 à 2017. Elle était marquée par une légère reprise des précipitations avec des indices positifs variant de 0 à 2,43. Cette reprise des précipitations est accompagnée des événements pluvieux extrêmes qui peuvent occasionner des inondations et des dommages socioéconomiques et environnementaux dans le secteur d'étude. C'est le cas de l'année 2015, au cours de laquelle, le bassin-versant de l'Oti a enregistré une anomalie positive de +2,43. Ce retour à une situation humide corrobore les résultats des travaux antérieurs effectués en Afrique de l'Ouest, notamment au Bénin par [40, 26] et au Burkina-Faso par [51 - 53]. La **Figure 3** montre l'évolution interannuelle des indices standardisés des débits dans le bassin-versant de l'Oti de 1957-2017.

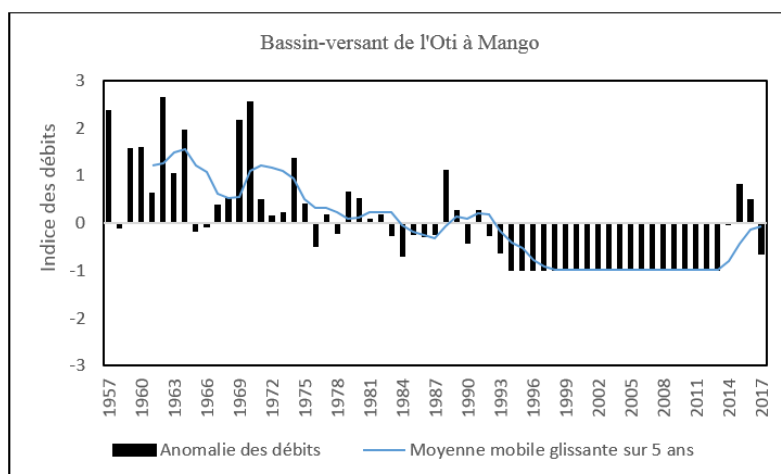


Figure 3 : Variabilité interannuelle des débits maximaux journaliers dans le bassin-versant de l'Oti à Mango (1957-2017)

Il ressort de l'analyse de la **Figure 3** que la période de 1961-1972 était caractérisée par de forts débits dans le bassin-versant de l'Oti à l'exutoire de Mango. Cela se justifie par la fréquence des anomalies positives des années 1960, ce qui témoigne que le secteur d'étude a été hydrologiquement humide marqué par des crues pendant les années 1962, 1964, 1969, 1970 et 1971. Cette période de fort écoulement est l'émanation des excédents pluviométriques de la période 1961-1970. La période 1973-2017 était marquée par de faibles écoulements avec la persistance des anomalies négatives (ne fait pas l'objet de cette recherche). Les années isolées de fortes pluies de la période 1973-2017 ne se traduisent pas par de grandes crues et la reprise des précipitations dans les années 1990 ne se répercute que très tardivement et modérément sur les débits des crues.

3-1-2. Seuils pluviométriques de risques d'inondation dans le bassin-versant de l'Oti

Les indices standardisés de précipitations et de débits commençant de 0 à +2 permettent de catégoriser les seuils pluviométriques et correspondent respectivement aux classes d'aléa limité, modéré, significatif et critique [26, 27]. Cette catégorisation des seuils pluviométriques et hydrologiques permet de définir l'ampleur des inondations dans le bassin-versant de l'Oti. Les seuils pluviométriques et de débits seuils d'aléa d'inondation varient en fonction du niveau de risque comme l'indique le **Tableau 2**.

Tableau 2 : Pluies maximales journalières d'aléa d'inondation (1961-2017) et débits maximaux journaliers annuels (1957-2017) et seuils de risques d'inondation dans le bassin de l'Oti

Seuils journaliers pluviométriques d'aléa d'inondation dans le bassin versant	Débits seuils d'aléa d'inondation à Mango	Niveaux de risques d'inondation
104,45 mm	1515 m ³ /s	Critique
96,83 mm	1223,12 m ³ /s	Significatif
92,23 mm	979 m ³ /s	Modéré
76,72 mm	507,62 m ³ /s	Limité

Il ressort de l'analyse du **Tableau 2** que les seuils pluviométriques journaliers sont de 76,72 mm pour le risque limité, 92,23 mm pour le risque modéré, 96,83 mm pour le risque significatif et 104,45 mm pour le risque critique. Ces différents niveaux de risque sont classés en deux catégories compte tenu des dégâts occasionnés. Il s'agit des risques acceptables (limité et modéré) et les risques inacceptables (significatif et

critique). Dans le bassin-versant de l'Oti, les seuils pluviométriques du risque limité ne sont pas provocateurs d'inondation. Au seuil de risque modéré, l'aléa d'inondation peut survenir. Lorsque le bassin-versant enregistre une quantité de pluie journalière de 92,23 mm, l'ampleur de cette inondation est modérée. Les seuils d'aléa significatif et critique sont plus remarquables dans le bassin de l'Oti, ce qui permet de caractériser les années pluviométriquement et hydrologiquement humides au cours desquelles les phénomènes d'inondations ont été observés. Ce qui n'est pas sans conséquences socio-économiques et écologiques dans le secteur d'étude. Quant aux seuils des débits à risque d'inondation (*Tableau 2*), ils sont de 507,62 m³/s pour le risque limité, 979 m³/s pour le risque modéré, 1223,12 m³/s pour le risque significatif et 1515 m³/s pour le risque critique dans le bassin-versant de l'Oti à l'exutoire de Mango.

3-2. Analyse fréquentielle des pluies maximales dans le bassin versant de l'Oti

3-2-1. Fréquence d'apparition des pluies maximales journalières sur le bassin-versant de l'Oti

La *Figure 4* présente la fréquence d'apparition des pluies maximales journalières sur le bassin-versant de l'Oti.

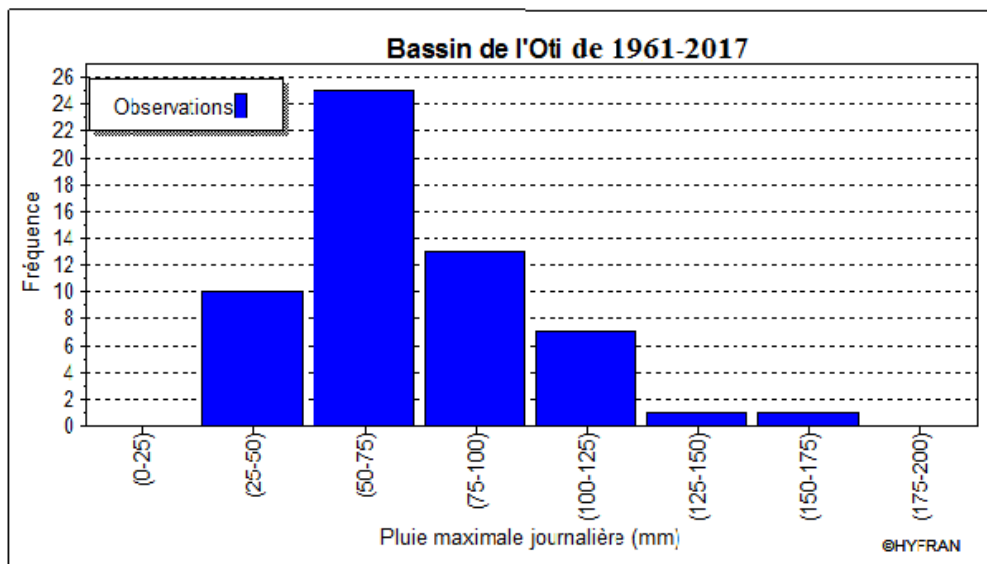


Figure 4 : Fréquence d'apparition des pluies maximales journalières annuelles dans le bassin-versant de l'Oti

Il ressort de l'analyse de la *Figure 4* que les hauteurs de pluies maximales journalières les plus importantes (élevées) étaient de 150 à 175 mm et apparaissent une fois sur la série, soit 1,75 %. Par contre les plus faibles hauteurs (25 à 50 mm) apparaissent 10 fois, ce qui donne 17,54 %. Les hauteurs de pluies comprises entre 125 et 150 mm apparaissent une fois, 100 à 125 mm apparaissent 07 fois, 75 à 100 mm apparaissent 13 fois et 50 à 75 mm apparaissent 25 fois avec respectivement les fréquences d'apparition de 1,75 %, 12,28 %, 22,80 % et 43,85 %.

3-2-2. Ajustement graphique des pluies maximales en 24 heures

La *Figure 5* illustre un ajustement graphique des séries des pluies maximales en 24 heures par la loi de distribution de GEV sur la période 1961 - 2017 dans le bassin-versant de l'Oti.

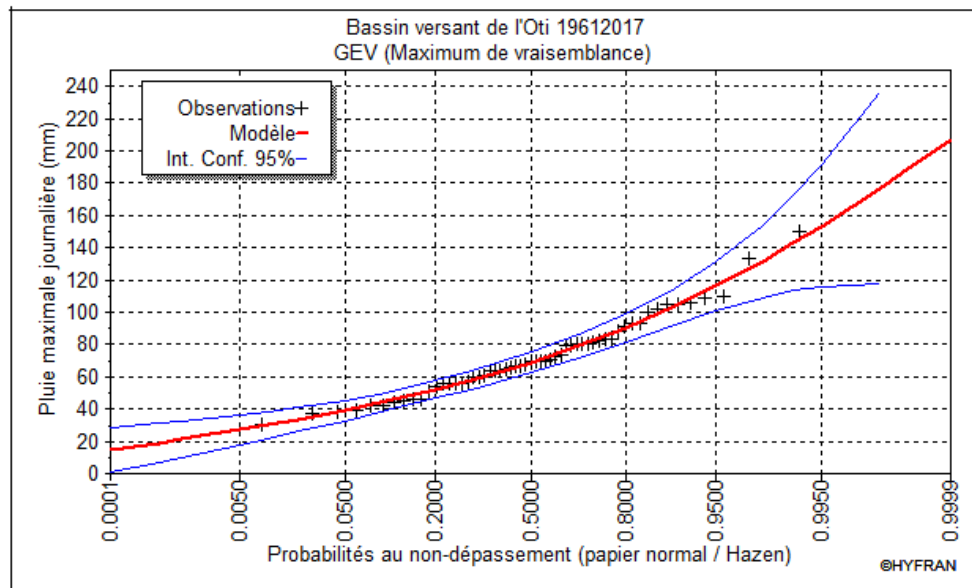


Figure 5 : Ajustement graphique des maximales journalières avec la loi GEV

L'ajustement des pluies maximales journalières avec le maximum de vraisemblance pour la loi GEV (**Figure 5**) montre que les pluies maximales journalières suivent de près le modèle dans un intervalle de confiance avec une probabilité de non-dépassement de 95 % voire 99 %. Ce qui amène à dire que la loi GEV présente des ajustements meilleurs avec le maximum de vraisemblance et paraît de ce point de vue meilleur pour les pluies maximales journalières dans le bassin-versant de l'Oti au Togo.

3-2-3. Critère d'ajustement de la loi GEV

Le **Tableau 3** présente les résultats des tests d'adéquation de Khi carré et d'indépendance de Wald-Wolfowitz pour l'ajustement des pluies maximales journalières avec la loi GEV.

Tableau 3 : Test d'adéquation de Khi carré et d'indépendance pour l'ajustement des pluies maximales avec la loi GEV

Pluie maximale journalière (mm)	Test d'adéquation et d'ajustement de Khi carré		Test d'indépendance (Wald-Wolfowitz)	
	χ^2	P-value	U	P
Loi GEV	4,23	0,64	0,74	0,45

Les résultats du test d'adéquation d'ajustement de Khi carré et celui d'indépendance de Wald-Wolfowitz présentés dans le **Tableau 3** ont permis de mieux ajuster les pluies maximales journalières avec la loi GEV. Il ressort de l'analyse de ce tableau que les pluies maximales journalières sont indépendantes, homogènes et stationnaires dans le bassin versant de l'Oti. Le test d'indépendance de Wald-Wolfowitz vient valider cette hypothèse d'indépendance dans le bassin-versant.

3-2-4. Période de retour de l'aléa pluviométrique extrême du risque d'inondation

Le **Tableau 4** montre les différentes périodes de retour des pluies maximales journalières annuelles et leurs intervalles de confiance.

Tableau 4 : Estimation de périodes de retour des pluies maximales journalières du risque d'inondation et les intervalles de confiance par la loi GEV

Stations	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Bassin versant de l'Oti	69 [62,6-75,1]	90 [81,7-98,9]	104 [92,5-115]	116 [101-131]	132 [109-154]	143 [113-172]

Il ressort de l'analyse du **Tableau 4** que les maximums annuels journaliers de pluie selon la lois GEV variaient de 62,6 à 75,1 mm pour les périodes de retour de 2 ans, 81,7 à 98,9 mm pour 5 ans, 92,5 à 115 mm pour 10 ans. Ces événements pluvieux journaliers peuvent être qualifiés d'anormaux dans le bassin-versant. Par ailleurs, les hauteurs de pluies maximales journalières comprises entre 101 à 131 mm pour les périodes de retour de 20 ans, 109 à 154 mm pour 50 ans et 113 à 172 mm pour 100 ans sont qualifiés d'exceptionnels et très exceptionnels. Des résultats similaires ont été trouvés par [6, 27, 35] dans leur zone d'étude respective. Ces auteurs avaient déjà signalé cette fréquence pour les événements pluvieux forts, très forts et extrêmement forts sur leur secteur d'étude.

3-3. Analyse fréquentielle des débits maximaux journaliers dans le bassin versant de l'Oti

3-3-1. Fréquence d'apparition des débits maximaux journaliers sur le bassin-versant de l'Oti à Mango

La **Figure 6** présente la fréquence d'apparition des débits maximaux annuels en 24 heures dans le bassin-versant de l'Oti à l'exutoire de Mango.

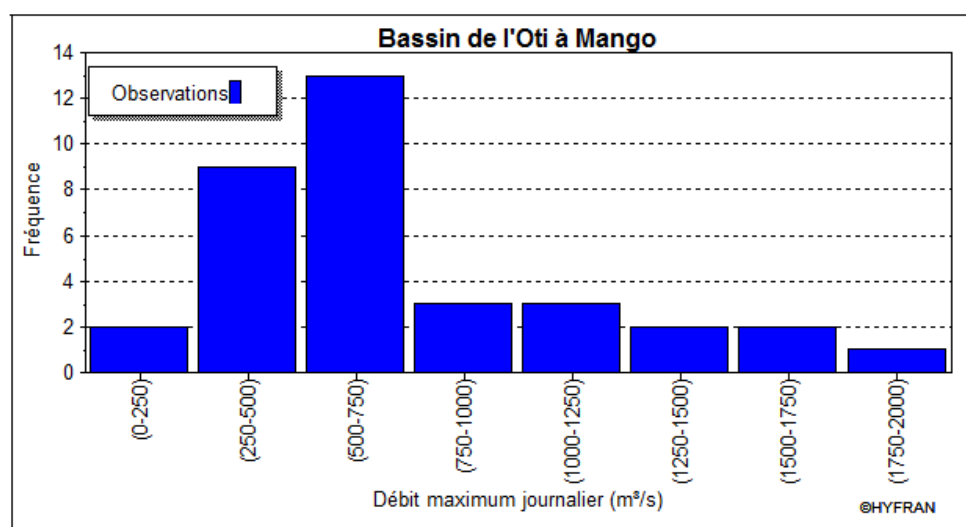


Figure 6 : Fréquence d'apparition des débits maximaux annuels journaliers dans le bassin versant de l'Oti à Mango

Il ressort de l'analyse de la **Figure 6** que les débits maximaux journaliers variaient de 0 à 250 m³/s, 250 à 500 m³/s, 500 à 750 m³/s, 750 à 1000 m³/s, 1000 à 1250 m³/s, 1250 à 1500 m³/s, 1500 à 1750 m³/s et 1750 à 2000 m³/s. Ces débits maximaux ont une fréquence d'apparition respective de 5,71 % (2 fois), 25,71 % (9 fois), 37,14 % (13 fois), 8,57 % (3 fois), 8,57 % (3 fois), 5,71 % (2 fois), 5,71 % (2 fois) et 2,85 % (1 fois). La fréquence d'apparition la plus élevée sur la série correspond aux débits de 500 à 750 m³/s, alors que celle la plus faible correspond aux débits de 1750 à 2000 m³/s.

3-3-2. Ajustement graphique des débits maximaux en 24 heures

La **Figure 7** traduit l'ajustement des débits maximaux journaliers avec la loi GEV sur le bassin-versant de l'Oti à Mango.

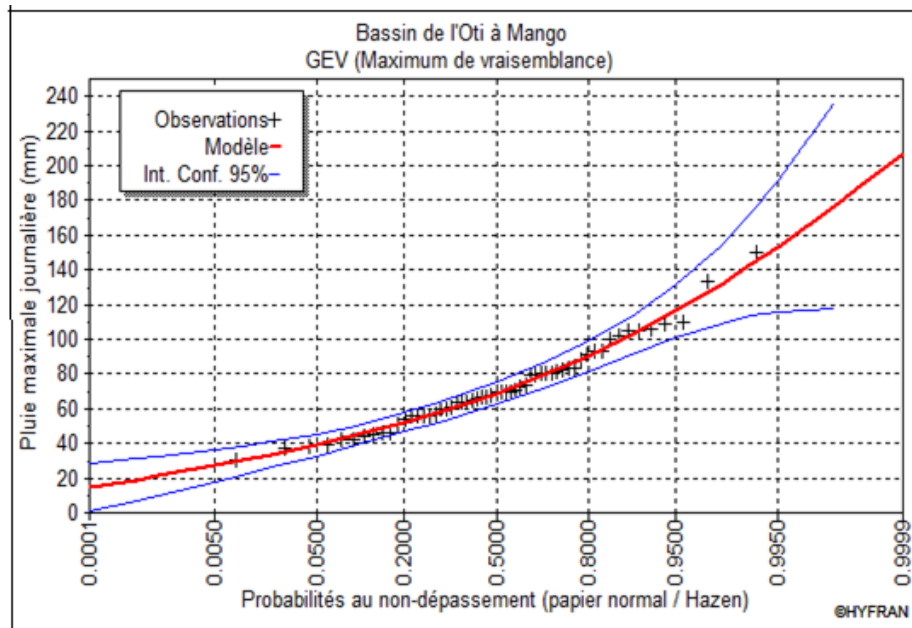


Figure 7 : Ajustement graphique des débits maximaux journaliers avec la loi GEV

L'analyse de la **Figure 7** montre que les débits maximaux journaliers sont bien ajustés avec la loi GEV à Mango. Cela se confirme par les observations qui suivent les modèles et présentent une probabilité au non-dépassement au-delà de 95 %. Dans ce cas, la loi GEV présente un meilleur ajustement des débits maximaux journaliers avec le maximum de vraisemblance dans le bassin-versant de l'Oti à l'exutoire de Mango.

3-3-3. Critère d'ajustement de la loi GEV

Le **Tableau 5** montre les résultats des tests d'adéquation de Khi carré ayant permis d'ajuster les débits maximaux en 24 heures avec la loi GEV dans le bassin-versant de l'Oti.

Tableau 5 : Test d'adéquation de Khi carré pour l'ajustement des débits maximaux journaliers dans le bassin-versant de l'Oti à Mango

Bassin versant	Tests d'adéquation et d'ajustement de Khi2	
	χ^2	P-value
Oti à Mango	5,91	0,20

Les tests d'adéquation et d'ajustement de khi carré ont permis de mieux ajuster les débits maximaux journaliers et les éventuelles périodes de retour de ces débits maximaux sur le bassin-versant de l'Oti à Mango.

3-3-4. Période de retour de l'aléa hydrométrique extrême du risque d'inondation

Le **Tableau 6** présente les périodes de retour (2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans) et les intervalles de confiance permettant d'évaluer l'incertitude associée aux estimations.

Tableau 6 : Estimation de périodes de retour des débits maximaux journaliers du risque d'inondation et les intervalles de confiance par la loi GEV

Stations	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Mango	637 [512-762]	1030 [815-1240]	1290 [997-1580]	1530 [1160-1910]	1850 [1360-2340]	2080 [1490-2670]

Il ressort de l'analyse du **Tableau 6** que les débits de crue ayant une probabilité sur deux de subvenir dans le bassin-versant de l'Oti à l'exutoire de Mango avaient des valeurs variant entre 512 à 762 m³/s. Pour le reste des évènements normaux ou extrêmes de fréquence ≥ 5 ans, ou 10 ans ou 20 ans, les débits de crue variaient respectivement de 815 à 1240 m³/s, 997 à 1580 m³/s et 1160 à 1910 m³/s. Pour les évènements exceptionnels et très exceptionnels de fréquences rares (≥ 50 ans ou = 100 ans), les débits enregistrés étaient respectivement de 1360 à 2340 m³/s et 1490 à 2670 m³/s à l'exutoire de Mango. Ces résultats corroborent ceux de [54]. Ces auteurs trouvent qu'en condition climatique soudanienne, le bassin reçoit tous les apports d'eau drainés par le fleuve depuis le haut bassin-versant sous l'influence de la chaîne de l'Atacora.

4. Conclusion

Le bassin-versant de l'Oti au Togo est confronté au phénomène de variabilité climatique, caractérisé par la survenue fréquente des inondations. Quatre niveaux de risques d'inondation (limité, modéré, significatif et critique) sont définis en fonction des seuils pluviométriques dans le bassin-versant de l'Oti. L'analyse fréquentielle appliquée aux données pluviométriques avec le modèle d'analyse proposé montre la fréquence d'apparition des évènements hydropluviométriques extrêmes. Des quantiles estimés, il a été observé que la période de retour des pluies maximales journalières et les débits de crues varie de 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans. Ainsi, les évènements pluviométriques d'anormaux ou extrêmes ont une période de retour qui va au-delà de 2, 5, 10, 20 ans dans le bassin-versant de l'Oti. De même, les évènements exceptionnels et très exceptionnels de fréquences rares ont une période de retour supérieure à 50 ou 100 ans dans le bassin-versant. L'utilisation des seuils pluviométriques peut servir d'outil d'aide à la décision dans la recherche de solutions pour la lutte contre les risques d'inondation dans le bassin-versant et de réduire les conséquences de ceux-ci. De même, les périodes de retour des pluies maximales extrêmes et débits maximaux journaliers annuels aideraient à anticiper sur les crues journalières.

Références

- [1] - IPCC, "Incidences de l'évolution du climat dans les régions : Rapport spécial sur l'Evaluation de la vulnérabilité en Afrique". Island Press, Washington, (2001) 53 p.
- [2] - GIEC, "Changements climatiques (Rapport de synthèse) ", (2007) 103 p.
- [3] - D. TAPSOBA, "Caractérisation événementielle des régimes pluviométriques Ouest africains et de leur récent changement". Thèse de Doctorat de l'Université de PARIS-XI (ORSAY), (1997) 300 p.
- [4] - G. MAHE, JC. OLIVRY, R. DESSOUASSI, D. ORANGE, F. BAMBA et E. SERVAT, "Relations eaux de surface-eaux souterraines. D'une rivière tropicale au Mali". Comptes rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Terre et Planetary Science, 330 (10) (2000) 689 - 692 p.
- [5] - H. PAETH, N. M. HALL, M. A. GAERTNER, M. D. ALONSO, S. MOUMOUNI, J. POLCHER et A. T. GAYE, "Les progrès réalisés dans le downscaling régionale des précipitations Afrique de l'Ouest". *Lettres de sciences atmosphériques*, 12 (1) (2011) 75 - 82 p.

- [6] - D. H. KOUMASSI, A. E. TCHIBOZO, E. VISSIN et C. HOUSSOU, "Analyse fréquentielle des évènements hydro-pluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin". *Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 10 (2) (2014)
- [7] - D. J. KODJA, E. W. VISSIN, E. AMOUSSOU, C. HOUNDENOU, M. BOKO, G. MAHE, J. E. PATUREL, "Analyse fréquentielle des pluies journalières sur le bassin-versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou", (2016)
- [8] - A. BADAMELI, "Les inondations comme manifestation des changements climatiques au Togo". DEA, U.L., (2010) 93 p.
- [9] - K. S. KLASSOU, "L'influence humaine dans l'origine et la gravité des inondations au Togo : cas de l'aménagement de l'espace dans la grande banlieue nord de Lomé (Togblé- Adétikopé)". In *GEOTROPE, Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, IGT, Abidjan, N° 2 (2014) 3 - 15 p.
- [10] - L. ISSAOU, "Risques climatiques dans le Sud-Togo : manifestations, impacts et stratégies d'adaptation". Thèse de Doctorat de Géographie de l'Université de Lomé, (2014) 264 p.
- [11] - D. KOUNGBANANE, "Inondations de 2007 dans la préfecture de Kpendjal, au Nord-Togo : état des lieux et impacts socio-économiques". Mémoire de Master en Géographie, Université de Lomé, (2016) 108 p.
- [12] - K. SOKEMAWU, "Les inondations et leurs répercussions socio-économiques et sanitaires dans la basse vallée du Zio au sud du Togo". *Revue Ivoirienne de Géographie des Savanes*, N° 2 (Juin 2017), ISSN 2521 - 2125
- [13] - A. V. SODOGAS, K. GOMADO, "Analyse situationnelle des risques et facteurs de risques potentiels en matière de désastres au Togo", (2006)
- [14] - A. BLIVI, "Retour d'informations sur les données et observatoires hydro-climatiques, parties de l'étude sur les inondations en Afrique de l'Ouest et de la communication nationale sur les changements climatiques au Togo". Actes du 30ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Cotonou (Bénin), (2013) 14 - 22 p.
- [15] - K. KOMI, A. A. BARNABAS, D. BERND, "Integrated Flood Risk Assessment of Rural Communities in the Oti River Basin, West Africa". *Hydrology*, (46) (2016) 7 - 12
- [16] - FEM-VOLTA, "Analyse diagnostique transfrontalière du bassin versant de la Volta". Rapport National. Togo, N° 53885 (2010) 146 p.
- [17] - L. BARITSE, "Versants et systèmes de versants ; l'exemple du Nord Togo". Thèse de doctorat de Géographie physique, Paris, Panthéon Sorbonne, (1986) 179 p.
- [18] - L. KANKPENANDJA, "Contribution à l'étude géomorphologique de la plaine alluviale du Kpendjal (Région de maîtrise en Géographie, Université de Lomé, (2002) 136 p.
- [19] - R. POSS, "Etude morphologique du Nord Togo à 1/500000". Edition de l'ORSTOM, Collin. Notice explicative N°109, Paris, (1996) 142 p.
- [20] - K. M. ADDRA, "Contribution à l'étude des climats du Togo ; Un essai de cartographie des climats du Togo". In *Annales de l'UB. Tome V*, N°1 (1978) 213 - 239 p.
- [21] - A. ALI et T. LEBEL, "The Sahelian standardized rainfall index revisited". *International Journal of Climatology*, 29 (2009) 1705 - 1714 p.
- [22] - P. N. KABORE, A. OUEDRAOGO, L. SOME et J. MILLOGO-RASOLODIMBY, "Les facteurs déterminants de la production de céréales sèches en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso". In *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 11, 1 (2015) 214 - 230
- [23] - T. B. MCKEE, N. J. DOESKEN, J. KLEIST, "The relationship of drought frequency and duration of time scales". *Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society*, (1993) 179 - 186
- [24] - R. A. SEILER, M. HAYES, L. BRESSAN, "Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring". In *International Journal of Climatology*, 22 (2002) 1365 - 1376 p.

- [25] - J. DU, J. FANG, W. XU, P. J. SHI, "Analysis of dry/wet conditions using the standardized precipitation index and its potential usefulness for drought/flood monitoring in Hunan Province, *China*". In *Stockholm Environment Resources Risk Assessment*, 27 (2013) 377 - 387 p.
- [26] - S. HOUËSSOU, "Les inondations et les risques prévisionnels liés aux barrages hydroélectriques dans la basse vallée du Mono". Thèse de Doctorat de Géographie, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, (2016) 198 p.
- [27] - V. S. H. TOTIN, E. AMOUSSOU, L. ODOULAMI, M. BOKO, B. A. BLIVI, "Seuils pluviométriques des niveaux de risque d'inondation dans le bassin de l'Ouémé au Bénin (Afrique de l'ouest)". *XXIXe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Lausanne - Besançon*, (2016) 369 - 374 p.
- [28] - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO), "Standardized precipitation index, user guide", (WMO-No. 1090), Genève, Auteur, (2012) 16 p.
- [29] - A. CANCELLIERE, B. BONACCORSO, "Uncertainty analysis of the Standardized Precipitation Index in the presence of trend". *Hydrology Days*, (2009) 14 - 26
- [30] - V. S. H. TOTIN, "Sensibilité des eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier du Bénin à l'évolution du climat et aux modes d'exploitation : stratégies de gestion durable". Thèse de Doctorat de Géographie, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, (2010) 283 p.
- [31] - B. T. DONOU, "Extrêmes hydroclimatiques dans le bassin inférieur du fleuve Ouémé : Diagnostic, impact agricole et scénario de gestion". Thèse de Doctorat, EDP/FLASH/UAC, (2015) 264 p.
- [32] - K. KOMI, "flood risk assessment in poorly gauged river basins -a case study of the oti river basin, Togo, west Africa". Dissertation; PhD of University of Abomey-Calavi, Benin Republic, (2016) 161 p.
- [33] - D. J. KODJA, "Indicateurs des événements hydroclimatiques extrêmes dans le bassin-versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou en Afrique de l'ouest". Université de Montpellier, Thèse de Doctorat, (2018) 287 p.
- [34] - A. AKA, H. LUBÈS, J.M. MASSON, E. SERVAT, J. E. PATUREL, B. KOUAMÉ, "Analysis of the temporal trends of runoff in Ivory Coast - Statistical approach and phenomena characterization". *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 41, N°6 (1996) 959 - 970
- [35] - S. YUE et P. A. PILON, "Comparison of the power of the test, Mann—Kendall and bootstrap tests for trend detection". *Hydrol. Sci. J.*, 49 (1) (2004) 21 - 38 p.
- [36] - M. ARORA, N. K. GOEL et P. SINGH, "Evaluation of temperature trends over India/Evaluation de tendances de température en Inde". *Hydrological sciences journal*, 50 (1) (2005)
- [37] - M. HACHE, L. PERREAULT, L. REMILLARD et B. BOBEE, "Une approche pour la sélection des distributions statistiques: application au bassin hydrographique du Saguenay-Lac St-Jean". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 26 (2) (1999) 216 - 225
- [38] - 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 Doct. de l'Univ. de Bourgogne, Dijon, France, 5210 (2007) 280 p.
- [39] - E. AMOUSSOU, "Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest)". Thèse de Doctorat unique, Université de Bourgogne, Dijon, CRC — CNRS- UMR5210, (2010) 313 p.
- [40] - D. H. KOU MASSI, "Risques hydroclimatiques et vulnérabilité des écosystèmes dans le bassin-versant de la Sota". Thèse de Doctorat de l'Université d'Abomey-Calavi, (2014) 244 p.
- [41] - B. T. A. GOULA, E. G. SORO, W. KOUASSI et B. SROHOUROU, "Tendances et ruptures au niveau des pluies journalières extrêmes en Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest)". *Hydrological Sciences Journal*, 57 (6) (2012) 1067 - 1080

- [42] - N. SORO, T. LASM, B. H. KOUADIO, G. SORO, K. E. AHOUSSE, "Variabilité du régime pluviométrique du Sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan". *Rev. Sud Sciences et technologies*, N°14 (2006) 30 - 40 p.
- [43] - P. MEYLAN, A. C. FAVRE et A. MUSY, "Hydrologie fréquentielle : une science prédictive". PPUR presses polytechniques, (2008) 173 p.
- [44] - A. HABIBI, M. MEDDI et A. BOUCEFIANE, "Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales : Cas du Bassin Chott-Chergui". *Nature et Technology*, (8) (2013) 41B
- [45] - B. T. GOULA, A. KONAN, T. BROU, Y. ISSIAKA, S. V. FADIKA et B. SROHOUROU, "Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale: cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois log normale et de Gumbel". *Hydrological sciences journal*, 52 (1) (2007) 49 - 67
- [46] - E. AMOUSSOU, Y. TRAMBLAY, V. S. H. TOTIN, G. MAHE et P. CAMBERLIN, "Dynamique et modélisation des crues dans le bassin du Mono à Nangbéto (Togo/Bénin)". *Hydrological Sciences Journal*, Volume 59, Issue 11 (November 2014) 2060 - 2071 p.
- [47] - P. OZER, "Risques d'inondation dans la ville de Nouakchott (Mauritanie)". *Geo-Eco-Trop*, (2007) 31
- [48] - M. D. MARTINEZ, X. LANA, A. BURGUENO, C. SERRA, "Spatial and temporal daily rainfall regime in Catalonia (NE-Spain) derived from four precipitation indices, years 1950–2000". *Int. J. Climatol.*, 27 (2007) 123 - 138 p.
- [49] - P. MAHERAS, K. TOLIKA et C. ANAGNOSTOPOULOU, "Relations entre les précipitations moyennes et extrêmes et les types de circulation atmosphérique en Belgique". *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 51 (2008) 115 - 125 p.
- [50] - M. SAHANI, J. MOEYERSONS, I. VANDECASTEELE, P. TREFOIS, P. OZER, "Evolution des caractéristiques pluviométriques dans la zone urbaine de Butembo (RDC) de 1957 à 2010". *Geo-Eco-Trop.*, 36 (2012) 121 - 136 p.
- [51] - T. P. ZOUNGRANA, "Les stratégies d'adaptation des producteurs ruraux à la variabilité climatique dans la cuvette de Ziga, au centre du Burkina Faso". *Annales de l'université de Ouagadougou— Série A*, Vol. 011, (2010) 585 - 606 p.
- [52] - J. M. DIPAMA, "Approche spatiale du phénomène du réchauffement climatique à l'échelle du Burkina Faso et perceptions des populations". *Climat et développement*. Laboratoire Pierre PAGNY - Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE), République du Bénin, N° 16 (2014) 36 - 49 p.
- [53] - S. ROUAMBA, "Variabilité climatique et accès à l'eau dans les quartiers informels de Ouagadougou". Thèse de doctorat de géographie, Université Ouaga I Pr Joseph Ki-Zerbo, (2017) 283 p.
- [54] - S. K. KLASSOU, "Évolution climato-hydrologique récente et conséquences sur l'environnement : l'exemple du bassin versant du fleuve Mono (Togo-Bénin)". Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux III, (1996) 472 p.