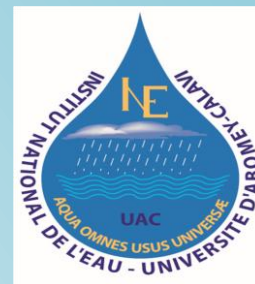


UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI
=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=====



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté et soutenu par

BABA BODY Hanif

Licence Professionnelle en Hydrologie

OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

=====

ANALYSE FREQUENTIELLE ET
DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-
HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION
DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

Maître de Mémoire

Dr. Éliézer BIAO

Maître-Assistant CAMES



DEDICACE

À

Mon défunt père **BABA BODY Nourou-Dine** et ma mère **ALEX IDRISOU Foussénatou**.

Recevez ce travail comme la récompense des nombreux efforts consentis pour nous donner une éducation de qualité.

REMERCIEMENTS

Le présent mémoire a été réalisé grâce à l'appui et la contribution de plusieurs personnes.

Une note spéciale de gratitude revient à mon maître de mémoire Dr. **Eliezer BIAO** pour s'être rendu disponible et pour avoir supervisé ce travail ainsi que pour ses conseils scientifiques.

Qu'il me soit permis ici d'exprimer aussi mes vifs remerciements à l'endroit de :

- Monsieur **DAOUDA MAMA**, Professeur Titulaire des universités du CAMES et actuel Directeur de l'Institut National de l'Eau.
- Monsieur **DOVONOU Flavien**, Maître de Conférences des universités du CAMES, Enseignant Chercheur LHA/INE/UAC et actuel Chef Département Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau à l'Institut National de l'Eau.

Un sincère merci :

- à tout le **personnel administratif, technique et le corps enseignant de l'Institut National de l'Eau** et spécialement celui intervenant au Département d'Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau. Nous vous remercions pour les nombreux efforts que vous faites pour que notre formation soit de qualité.
- à tous mes **camarades de l'INE** pour la convivialité et l'entraide qui ont régné en notre sein tout au long de notre formation ;
- à tous les **membres de ma famille, mes amis**, qui m'ont toujours encouragé dans mes études et grâce à qui j'ai grandi dans un milieu épanouissant.
- aux **honoraux membres du jury**, pour l'honneur que vous me faites en acceptant d'examiner et de juger ce travail.

Enfin un sincère merci à tous ceux qui de près ou de loin m'ont soutenu dans l'accomplissement de ce travail.

RÉSUMÉ

Cette étude analyse les événements pluvio-hydrologiques extrêmes dans le bassin versant de l'Ouémé à Bonou, en utilisant des données de pluie et de débit (1960-2016) pour estimer leurs périodes de retour, catégoriser les seuils de risque et évaluer l'ampleur des inondations, dans un contexte de gestion des ressources hydriques et de prévention des catastrophes naturelles. De plus, la période d'occurrence des pluies et des débits des crues est estimée à l'aide de la loi généralisée dont les paramètres ont été estimés avec la méthode des moments. L'analyse des résultats montre que les seuils journaliers associés au risque d'inondation sont de 1150,85 mm pour le risque limité, 1324,62 mm pour le risque modéré, 1411,51 mm pour le risque significatif et 1498,40 mm pour le risque critique. Les pluies maximales annuelles varient de 1073,3mm à 1174,7mm pour les périodes de retour de 2 ans, 1225,2mm à 1346,9mm pour 5 ans, 1305,2mm à 1448,3mm pour 10 ans. Les hauteurs de pluies maximales journalières comprises entre 1365,1mm à 1541,1mm pour les périodes de retour de 20 ans, 1420,2mm à 1656,7 mm pour 50 ans et 1447,8mm à 1739mm pour 100 ans sont qualifiés d'exceptionnel. De même, les débits des seuils de risques d'inondation sont 769,86 m³/s pour le risque limité, 1103,39 m³/s pour le risque modéré, 1270,15 m³/s pour le risque significatif et 1436,91 m³/s pour le risque critique dans le bassin-versant de Ouémé à l'exutoire de Bonou. Les événements hydrologiques normaux ou extrêmes associé à des périodes de retour 5 ans 10 ans ou 20ans varient respectivement de 1007,0 m³/s à 1128,2 m³/s, 1080m³/s à 1204,9m³/s et 1109m³/s à 1269 m³/s. Les débits enregistrés pour les événements exceptionnels et très exceptionnels de fréquences rares (≥ 50 ans ou = 100 ans), les débits enregistrés étaient respectivement de 1119,3m³/s à 1333,5 m³/s et 1243,6m³/s à Bonou.

Mots-clés : analyse fréquentielle, seuil pluvio-hydrologique, risque d'inondation, événement hydrologique.

ABSTRACT

This study analyzes extreme rainfall-hydrological events in the Ouémé catchment at Bonou, using rainfall and discharge data (1960-2016) to estimate their return periods, categorize risk thresholds and assess the extent of flooding, in a context of water resource management and natural disaster prevention. In addition, the period of occurrence of rainfall and flood flows is estimated using the generalized law whose parameters have been estimated with the method of moments. Analysis of the results shows that the daily thresholds associated with flood risk are 1150.85 mm for limited risk, 1324.62 mm for moderate risk, 1411.51 mm for significant risk and 1498.40 mm for critical risk. Annual daily rainfall totals range from 1073.3mm to 1174.7mm for 2-year return periods, 1225.2mm to 1346.9mm for 5 years, 1305.2mm to 1448.3mm for 10 years. Annual daily rainfall amounts ranging from 1365.1mm to 1541.1mm for 20-year return periods, 1420.2mm to 1656.7mm for 50-year return periods and 1447.8mm to 1739mm for 100-year return periods are considered exceptional. Similarly, the flood risk flow threshold flows are 769.86 m³/s for limited risk, 1103.39 m³/s for moderate risk, 1270.15 m³/s for significant risk and 1436.91 m³/s for critical risk in the Ouémé watershed at the Bonou outlet. Normal or extreme hydrological events associated with return periods of 5 years, 10 years or 20 years range respectively from 1007.0 m³/s to 1128.2 m³/s, 1080m³/s to 1204.9m³/s and 1109m³/s to 1269 m³/s. Exceptional and very exceptional events of rare frequency (≥ 50 years or = 100 years) flows recorded were 1119.3m³ /s to 1333.5 m³/s and 1243.6m³/s respectively at Bonou.

Keywords: frequency analysis, rainfall threshold flows, flood risk, hydrological event

SIGLES ET ACRONYMES

AIC : Critères d'Information d'Akaike

BIC : Critères d'Information Bayésien

DGEau : Direction Générale de l'Eau

GEV: Generalized Extreme Value

INE: Institut National de l'Eau

SFI: Standardized Flow Index

SPI : Standardized Precipitation Index

UAC : Université d'Abomey-Calavi

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les différentes stations utilisées.....	15
Tableau 2 : Classification des valeurs SPI/SFI, des catégories d'inondation et des niveaux de risques	19
Tableau 3 : Segmentation de Hubert (Niveau de significativité de Scheffé 1%).....	25
Tableau 4 : Segmentation de Hubert pour les débits.....	27
Tableau 5 : Pluies maximales d'aléa d'inondation (1960-2016) et débits maximaux journaliers annuels (1960-2016) et seuils de risques d'inondation dans le bassin de l'Ouémé à Bonou	28
Tableau 6 : Test d'adéquation de Khi carré pour l'ajustement des pluies.....	31
Tableau 7 : Estimation des périodes de retour des pluies maximales du risque d'inondation et des intervalles de confiance par la loi GEV	32
Tableau 8 : Test d'adéquation de Khi carré.....	34
Tableau 9 : Estimation des périodes de retour des débits maximaux de risque d'inondation et les intervalles de confiance par la loi GEV	35

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Présentation de la zone d'étude	9
Figure 2 : Carte des stations choisies.....	16
Figure 3 : Variation interannuelle des indices standardisés de précipitations dans le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou de 1960 -2016	24
Figure 4 : Résultat du test de Pettitt	25
Figure 5 : Variabilité interannuelle des débits maximaux journaliers dans le bassin- versant de l'Ouémé à Bonou (1960-2016)	26
Figure 6 : Résultat du test de Pettitt pour les débits	27
Figure 7 : Comparaison de la variabilité interannuelle des précipitations et des débits maximaux journaliers dans le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou (1960-2016).....	28
Figure 8 : Ajustement graphique des pluies avec la loi GEV	30
Figure 9 : Ajustement graphique des pluies avec la loi Gumbel.....	31
Figure 10 : Ajustement graphique des débits avec la loi GEV.....	33
Figure 11 : Ajustement graphique des débits avec la loi Gumbel	34

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	ii
REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ.....	iv
ABSTRACT	v
SIGLES ET ACRONYMES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	viii
TABLE DES MATIERES	ix
INTRODUCTION GENERALE.....	1
1. Contexte et justification	1
2. Revue de littérature.....	2
2.1. Clarification conceptuelle	2
2.2. Revue de littérature.....	3
3. But de la recherche.....	5
4. Problème et questions de recherches	5
5. Objectifs du mémoire.....	5
5.1. Objectif général	5
5.2. Objectifs spécifiques.....	5
6. Hypothèse de travail.....	5
7. Grandes divisions du mémoire.....	6
Chapitre 1 : Données, matériels et méthodes.....	7
1.1. Milieu d'étude	8
1.1.1. Localisation	8
1.1.2. Géomorphologie et géologie.....	9
1.1.3. Hydrogéologie	11
1.1.4. Sols, végétation, climat et hydrographie	11

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

1.1.5. Quelques aspects socio-économiques	14
1.2. Données collectées et utilisées	15
1.3. Matériels utilisés	16
1.4. Méthodes	17
1.4.1. Correction et qualité des données	17
1.4.2. Méthodes de traitement des données	18
Chapitre 2 : Résultats, discussions, conclusion et perspectives.....	23
2.1. Introduction	24
2.2. Indices pluviométriques et hydrologiques	24
2.2.1. Analyse de l'évolution de l'indice normalisé de précipitations (SPI).....	24
2.2.2. Analyse de l'évolution de l'indice normalisé de débits (SFI)	26
2.2.3. Analyse de l'évolution de l'indice normalisé de précipitations et de débits	28
2.3. Seuils pluviométriques de risques d'inondation dans le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou	28
2.4. Ajustement graphique des pluies	29
2.4.1. Ajustement graphique des pluies annuelles avec GEV	29
2.4.2. Ajustement graphique des pluies avec la loi Gumbel	30
2.5. Ajustement graphique des débits maximaux.....	32
2.5.1. Ajustement graphique des débits avec la loi GEV	32
2.5.2. Ajustement graphique des débits avec la loi de Gumbel	33
2.4. Discussions.....	35
CONCLUSION	37
Synthèse des principaux résultats	38
Perspective.....	38
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	39

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte et justification

L'eau, omniprésente sur Terre, est une ressource indispensable à la vie. Cependant, elle peut aussi causer des catastrophes naturelles telles que les sécheresses et les inondations. Par exemple, entre 1999 et 2010, le Bénin a subi cinq épisodes majeurs d'inondations, dont les plus graves ont eu lieu en 1999, 2009 et 2010. Ces phénomènes ont touché entre 400 000 et plus de 600 000 personnes, selon Totin (2012). Ces inondations sont principalement liées à l'augmentation des événements pluvieux extrêmes dans la région, comme le montrent les travaux de Ozer et al. (2012).

Dans le bassin de l'Ouémé, les pluies intenses provoquent des crues qui entraînent des inondations, perturbant considérablement les activités socio-économiques, notamment dans les zones inondables (Kodja et al., 2013 ; Donou, 2015 ; Atchadé et al., 2015). Ces inondations résultent souvent des débordements du fleuve à la suite des crues, mais aussi d'une mauvaise gestion de l'utilisation des terres dans le bassin-versant de l'Ouémé. Le bassin-versant de l'Ouémé, à l'exutoire de Bonou, est marqué par une forte variabilité des précipitations et des écoulements hydrologiques. On y observe deux types de phénomènes hydro-climatiques extrêmes : d'une part, des sécheresses fréquentes depuis la fin des années 1970, largement documentées, et, d'autre part, des crues majeures au cours de la dernière décennie. Ces crues sont souvent déclenchées par des pluies intenses qui augmentent la vulnérabilité des populations et menacent les cultures. Malgré l'impact important de ces phénomènes, peu d'études se sont penchées sur la vulnérabilité des systèmes humains et environnementaux face à ces événements extrêmes dans le bassin-versant de l'Ouémé, à l'exutoire de Bonou. C'est dans ce contexte que cette recherche, intitulée « Analyse fréquentielle et détermination des seuils pluvio-hydrologiques de risque d'inondation dans le bassin de l'Ouémé à Bonou », a été réalisée. Elle vise à mieux comprendre les risques liés aux inondations et les mécanismes qui y sont associés, afin de mieux protéger les populations et leur environnement.

2. Revue de littérature

La présente revue de littérature a pour objectif de situer l'état des connaissances sur l'analyse fréquentielle et la détermination des seuils pluvio-hydrologiques des risques d'inondation.

2.1. Clarification conceptuelle

Afin de mieux cerner le sujet, il s'avère nécessaire de clarifier certains mots ou expressions.

2.1.1. Analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle en hydrologie est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utilisées pour examiner les données hydrologiques dans le domaine des fréquences. Elle vise à décomposer une série temporelle hydrologique en composantes de différentes fréquences pour comprendre les cycles périodiques et les variations saisonnières ou irrégulières des phénomènes liés à l'eau. (André St-Hilaire, 2005)

Elle a différents objectifs dont le premier est de détecter des cycles réguliers (comme les saisons) ou des tendances irrégulières (comme les épisodes de sécheresse ou d'inondation) dans les données hydrologiques. Elle permet aussi de mieux prévoir les événements extrêmes, de planifier la gestion des ressources en eau, et d'élaborer des stratégies de mitigation des risques. Enfin, l'analyse fréquentielle aide à évaluer la probabilité et la fréquence des événements hydrologiques extrêmes, tels que les crues ou les sécheresses, en utilisant des modèles de distributions statistiques.

2.1.2. Seuil-pluviométrique

Un seuil-pluviométrique est une grandeur spécifique de précipitations au-delà de laquelle des impacts significatifs, tels que des inondations ou des glissements de terrain, sont probables. Il sert de critère pour évaluer les risques météorologiques et hydrologiques et pour déclencher des alertes (Ifremer, 2020). Ce seuil est déterminé à partir de données historiques et de modèles climatiques, prenant en compte les caractéristiques locales comme la topographie et l'utilisation des terres. Les seuils-pluviométriques sont essentiels pour la gestion des risques naturels, la planification urbaine et la protection des populations et des infrastructures.

2.1.3. Seuil hydrologique

Un seuil hydrologique est une valeur critique d'un paramètre hydrologique, tel que le débit fluvial ou le niveau d'eau, au-delà de laquelle des conséquences importantes, comme des inondations ou des sécheresses, sont probables (wikihydro). Il est déterminé par des analyses

statistiques et des modèles hydrologiques, basés sur des données historiques et les conditions locales. Ces seuils sont utilisés pour évaluer les risques liés aux événements hydrométéorologiques extrêmes, pour la gestion des ressources en eau, et pour déclencher des systèmes d'alerte précoce, protégeant ainsi les populations et les infrastructures.

2.1.4. Seuil pluvio-hydrologique

Le seuil pluvio-hydrologique est la quantité spécifique de précipitations qui caractérise des débits très extrêmes (élevés ou très bas) à partir desquels surviennent les inondations ou sécheresses extrêmes (Koungbanane et al., 2020).

2.1.5. Risque d'inondation

Le risque d'inondation est la probabilité qu'un événement hydrologique dépasse un certain seuil, entraînant une submersion temporaire de terrains, causée par des débordements de cours d'eau, des précipitations intenses, des marées de tempête ou des ruptures de barrages (géorisques.gouv.fr). Ce risque est évalué en fonction de la fréquence des événements hydrologiques extrêmes et de leur intensité, ainsi que de la vulnérabilité des zones affectées. L'évaluation du risque d'inondation inclut des analyses statistiques de données historiques, des modélisations hydrologiques et des études de terrain. Elle prend en compte les caractéristiques topographiques, la perméabilité des sols et les infrastructures humaines. La gestion du risque d'inondation implique des mesures d'aménagement du territoire, de construction de protections hydrauliques et de systèmes d'alerte précoce. Ces mesures visent à minimiser les impacts économiques, environnementaux et sociaux des inondations, protégeant ainsi les populations et les biens.

2.2.Revue de littérature

Cette revue de littérature a pour but de présenter l'état des connaissances sur l'analyse fréquentielle et la détermination des seuils pluvio-hydrologiques des risques d'inondation.

Kodja (2018) a travaillé sur les indicateurs des événements hydroclimatiques extrêmes dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou en Afrique de l'Ouest. L'analyse de la variabilité hydroclimatique a permis d'identifier deux ruptures de non-stationnarité (en 1968 et 1987) au cours de la période 1951-2015, en divisant les données en trois sous-périodes. Les précipitations ont diminué de 18 % dans le sud, de 16 % dans le centre et de 15,8 % dans le nord entre la première (1951-1968) et la deuxième (1969-1987) sous-période, suivies d'une

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

reprise de 15 %, 16,3 % et 15,7 % respectivement au cours de la dernière sous-période (1988-2015). Cela a affecté la dynamique hydrologique de la région, avec une baisse de 49,27 % des débits annuels moyens entre 1951-1968 et 1969-1987, et une augmentation de 65 % entre 1969-1987 et 1988-2015.

Au cours de la sous-période la plus récente (1988-2015), les indicateurs d'événements hydroclimatiques extrêmes, susceptibles d'entraîner des inondations à Bonou, ont également augmenté. Les précipitations quotidiennes maximales se sont produites tous les 2, 5, 10, 20 et 50+ ans pour les événements forts, très forts et extrêmement forts. Les débits maximaux de 24 heures ont également augmenté avec les périodes de retour, le quantile 50 se produisant tous les deux ans, les événements forts et très forts tous les 10 ans et les événements centenaires pour les événements extrêmement forts.

Koungbanane et al (2020) ont travaillé sur l'analyse fréquentielle et la détermination des seuils pluvio-hydrologiques de risques d'inondation dans le bassin-versant de l'Oti au Togo. Pour ce travail, une analyse fréquentielle des événements pluviométriques extrêmes associées aux inondations, a été faite dans le but d'estimer leurs périodes de retour dans ledit bassin.

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 a été déterminée par la loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV). Les résultats obtenus ont montré 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 de seuil de risque 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, dans ce bassin, et correspondent respectivement aux débits de 1360 à 2340 m³/s et 1490 à 2670 m³/s.

Les travaux de Koumassi et al (2014) ont porté sur l'analyse fréquentielle des événements hydro-pluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin.

Pendant ces travaux, des tests statistiques ont été effectués et différents modèles ou lois ont été testés afin de choisir le modèle le plus approprié. Les paramètres du modèle estimés ont permis

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

de calculer les quantiles et les périodes de retour des événements pluvio-hydrologique extrêmes dans le bassin. Les résultats obtenus montrent que les crues récurrentes dans le bassin de la Sota varient entre $254 \text{ m}^3/\text{s}$ dans le sous bassin de Gbassè et de $285 \text{ m}^3/\text{s}$ dans le sous bassin de Coubéri. Les hauteurs de pluie les plus récurrents ont une valeur de 39 à $52 \text{ m}^3/\text{s}$ suivant les stations.

3. But de la recherche

Cette étude a pour but de contribuer à la prévention des inondations dans le bassin versant de l'Ouémé à Bonou en faisant l'analyse fréquentielle des événements pluvio-hydrologique.

4. Problème et questions de recherches

Le problème posé dans notre travail est la connaissance des seuils pluvio-hydrologiques pour détecter les risques d'inondation dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou.

Les questions suivantes ont été formulées :

- Comment déterminer les événements pluvio-hydrologique extrêmes ?
- Comment détecter les seuils pluviométriques et hydrologiques de risque d'inondation ?
- Quelles sont les périodes de retour des événements pluvio-hydrologiques extrêmes ?

5. Objectifs du mémoire

5.1.Objectif général

L'objectif général de ce travail est de faire une analyse fréquentielle des événements pluvio-hydrologiques extrêmes associés aux inondations afin d'estimer leur période de retour dans le bassin versant de l'Ouémé à Bonou

5.2. Objectifs spécifiques

L'atteinte de cet objectif général passera par les objectifs spécifiques ci-dessous :

- Déterminer des événements pluvio-hydrologiques extrêmes ;
- Détecter des seuils pluviométriques et hydrologiques de risque d'inondation ;
- Faire l'analyse fréquentielle des événements hydro-climatiques extrêmes.

6. Hypothèse de travail

- Les événements pluvio-hydrologiques extrêmes dans le bassin-versant de l'Ouémé sont de plus en plus fréquents et intenses en raison des changements climatiques.

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

- Il est possible de détecter des seuils pluviométriques et hydrologiques critiques pour évaluer le risque d'inondation dans le bassin-versant de l'Ouémé.
- L'analyse fréquentielle des événements hydro-climatiques permet de mieux comprendre leur occurrence et d'améliorer les stratégies de gestion des risques associés.

7. Grandes divisions du mémoire

Ce mémoire est organisé en deux (2) chapitres. Le premier chapitre les données, matériels et méthodes. Dans ce chapitre, les données, les matériels et les méthodes utilisés ont été abordés. Dans le deuxième chapitre, les résultats, discussions, conclusions et perspectives sont présentés.

Chapitre 1 : Données, matériels et méthodes

1.1. Milieu d'étude

Ce chapitre porte essentiellement sur la description du cadre d'étude notamment sa situation géographique, le relief, l'hydrographie, le climat, la végétation, les activités socio-économiques et la géologie.

1.1.1. Localisation

Le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou est situé en Afrique de l'Ouest en République du Bénin. À l'exutoire de Bonou, il est compris entre les latitudes 6,9° et 10,3° Nord et les longitudes 1,5° et 3,5° Est (Houngue, 2020). Le secteur d'étude est à cheval sur les départements de la Donga, du Borgou, des Collines, du Zou, de l'Ouémé et du Plateau et compte en son sein 38 communes soit 49,35 % sur les 77 communes du Bénin. Avec ses affluents, dont le Zou et l'Okpara, il couvre une superficie de 46 200 km² répartis d'une part sur le socle Dahoméen, partie supérieure du bassin et d'autre part sur les formations sédimentaires du bassin côtier, appelé l'Ouémé inférieur (Moniod, 1973 ; Le Barbé, 1993 ; Atchadé, 2014 ; Akognongbé, 2014). La diversité de ces substratums géologiques influence directement ou indirectement la manifestation des événements extrêmes hydroclimatiques (Vissin, 2007 ; Amoussou, 2010 ; Kodja et al., 2012 ; Atchadé, 2014).

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

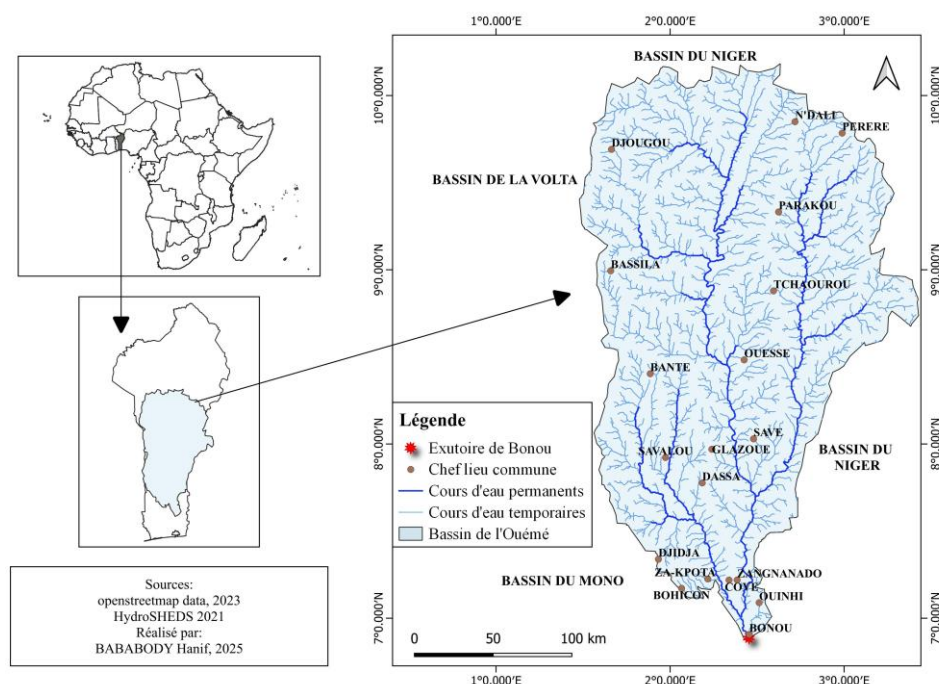


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude

1.1.2. Géomorphologie et géologie

Le bassin de l'Ouémé (50000 Km² environ) comprend deux unités géologiques. La première est un bassin supérieur à substrat intégralement précambrien, et au relief accusé. La seconde un bassin inférieur à substrat sédimentaire tendre, au relief peu accentué et monotone qui favorise l'étalement et la divagation des cours d'eau, l'érosion et l'alluvionnement. La limite entre les deux bassins se situe un peu au nord de la confluence du Zou et de l'Ouémé. Le delta de l'Ouémé est situé entre 6°21' et 6°58' de latitude Nord et 2°21' et 2°40' de longitude Est. La zone deltaïque occupe une superficie de 9000 Km² et s'étend sur 90 Km le long du fleuve jusqu'à son débouché dans la zone lagunaire de Porto-Novo. (Colombani et al... 1972 et Welcom 1971). Le fleuve Ouémé, en pénétrant dans le bassin sédimentaire côtier par le nord-est du plateau de Zangnanado, reçoit son principal affluent le Zou à la latitude de Pobè. Ensuite, il longe le plateau de Pobè-Porto-Novo avant de se jeter dans la lagune de Porto-Novo (Dissou, 1986). La zone ainsi traversée constitue le delta de l'Ouémé qui couvre les communes de Bonou, d'Adjohoun, de Dangbo et des Aguégués. Son relief est peu marqué avec une pente très faible favorisant l'étalement des eaux pendant la crue. Le delta de l'Ouémé est subdivisé en 3 grandes parties :

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

- ✚ Le haut-delta, constituant sa partie nord, est un couloir ouvert dans les formations argileuses du crétacé et de l'éocène sur une distance de 20 à 30 Km. Il s'étend jusqu'à la limite de Bonou où commence le moyen delta (Kamoutchoni,2020).
 - ✚ Le moyen delta est une plaine longue de 50 Km environ qui s'étend de Bonou à Azowlissè en passant par Adjohoun. La largeur est relativement uniforme dans cette zone où elle ne dépasse guère 10 Km (Nonfon, 1988). Le lit du fleuve est sablonneux ; l'eau est peu profonde en saison sèche et les berges sont assez hautes (Kamoutchoni,2020).
 - ✚ Le bas delta débute de l'aval de Azowlissè où la vallée s'élargit brusquement jusqu'à 20 Km et se termine à la façade sud où le fleuve se jette dans la lagune de Porto-Novo. Dans cette partie, le lit du fleuve est vaseux, l'eau profonde en saison sèche et les berges sont basses. La plaine inondable est également basse et reste marécageuse toute l'année. Le moyen delta et le bas delta constituent la basse vallée de l'Ouémé. Les coupes topographiques (est-ouest) de la vallée de l'Ouémé font apparaître deux unités morphologiques très importantes : le plateau et la basse plaine inondable (Kamoutchoni,2020).
- Le plateau : c'est une formation latéritique d'une grande perméabilité. Les eaux d'infiltration réapparaissent en de nombreuses sources au pied du plateau. Ces résurgences (par exemple Sissèkpa, Saôrô dans le bas-delta) offrent des possibilités de pêche et donnent naissance à des marécages permanents (Kamoutchoni,2020).
 - La basse plaine inondable : les crues de l'Ouémé qui s'étalent chaque année et déposent leur charge d'alluvions, sont responsables du modelé de la vallée et de la nature des sols qui la recouvrent. En effet, le fleuve en débordant se débarrasse sur ses berges des alluvions les plus lourdes et les éléments les plus fins sont déposés aux limites de la zone d'inondation. De l'amont vers l'aval, les dépôts sont d'autant plus fins que la pente de la plaine est plus faible d'est en ouest. Ce mécanisme de dépôt des charges solides est à l'origine de la formation de bourrelets de berge de part et d'autre du lit mineur du fleuve Le Barbé et al. (1993). Ceux-ci sont aplatis au fur et à mesure qu'on descend du nord vers le sud La séparation entre les bassins inférieur et supérieur de l'Ouémé n'est pas artificielle ; elle est marquée par le passage brutal du socle précambrien aux terrains sédimentaires de la zone côtière. Ce sont les roches métamorphiques entrecoupées de roches éruptives dures qui composent le substratum précambrien qui donnent au bassin supérieur un relief plus accusé avec des collines granitiques et des « monts » gneissiques ou quartzitiques, coupés de thalwegs marqués peu alluvionnaires. Le bassin de l'Ouémé au pont de Savé (23600 Km)

étend 55% de sa superficie entre 300 et 400 m d'altitude. Le delta proprement dit est à une altitude comprise entre 0 et 20 m. Les profils en long de l'Ouémé et de ses affluents montrent que ces rivières n'ont pas encore atteint leur équilibre et continuent à creuser leur lit (Kamoutchoni, 2020). Sur le socle précambrien, la nature lithologique des terrains traversés provoque des ruptures de pentes rapides et même des chutes comme celles de l'Okpara en aval de Kaboua. D'une façon générale, la pente du lit est de l'ordre de 10m/Km dans la plus haute partie du cours et atteint 0,5 m/Km, parfois moins, en arrivant dans le delta. Là, la pente diminue fortement puisqu'elle n'est en moyenne que de 10,6 cm/ Km entre Sagon et Houédomé.

1.1.3. Hydrogéologie

La portion du bassin de l'Ouémé située dans la zone tropicale sèche encore appelée zone soudanienne avec une saison sèche et une saison humide se caractérise par une coexistence de ruissellement hortonien et d'écoulements de subsurface et souterrains sur surfaces saturées (Chevallier, 1988 ; Chevallier et Planchon, 1986). Les nappes y sont peu profondes et affleurantes et contribueraient aux écoulements. Elle recouvre la partie amont de l'Ouémé qui prend sa source au pied de l'Atacora. Le haut bassin de l'Ouémé repose sur un socle fracturé granito-gneissique dit dahoméen constitué essentiellement de migmatites et gneiss (Faure et Volkoff, 1998). Ainsi, ce socle est altéré, fracturé et fissuré dans sa partie supérieure puis de moins en moins en profondeur et agit comme un réservoir de stockage, avec une transmissivité faible de l'ordre de $10^{-4} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ (Kamagaté, 2006). Le bassin de l'Ouémé utilise les chenaux de Lagos et de Cotonou pour communiquer avec l'océan atlantique.

1.1.4. Sols, végétation, climat et hydrographie

1.1.4.1. Sols et végétations

Les études de reconnaissance pédologiques (Faure, 1997) menées sur le haut bassin de l'Ouémé ont mis en évidence une structure verticale des sols, conforme à celle observée sur l'ensemble de l'Afrique de l'ouest en zone Soudanienne. Une couche de sol de surface de 1 à 3 mètres d'épaisseur surplombe une zone d'altérites de 10 à 20 mètres d'épaisseur formées par les arènes issues de la décomposition des roches du sol, qui repose elle-même sur le socle. Les sols sont ferrugineux et se caractérisent par une stratification marquée. Un premier horizon argileux, relativement imperméable s'observe à une profondeur de l'ordre d'un mètre. La profondeur de cet horizon, ses caractéristiques hydrodynamiques ainsi que celle des horizons qui le surmontent, sont les principaux facteurs contrôlant le stock d'eau présent dans le sol, la production des écoulements et la recharge des nappes souterraines. Selon (Bigot et al., 2005),

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

5 ou 6 types différents d'occupation des sols ont été caractérisés sur le haut bassin de l'Ouémé. Ainsi, la végétation typique de la zone est la savane arborée. On y trouve également d'autres états dégradés de la forêt claire naturelle : savane arbustive, jachère, cultures, zones ouvertes.

Actuellement les couverts végétaux sont en pleine évolution du fait de l'anthropisation croissante de la zone : les forêts sont de plus en plus défrichées (par brûlis) au profit de culture de rente (coton) ou vivrière (igname, manioc, maïs, sorgho, riz). Aussi, on tend de plus en plus vers la savane qui montre une forte évaporation et des pertes d'interception accompagnées d'une forte capacité de stockage en raison des horizons du sol plus épais parce que l'érosion est moins prononcée sur ces secteurs avec pour conséquence un écoulement lent de surface (Giertz and Diekkrüger, 2003).

Il faut également remarquer la forte végétalisation des lits majeurs des rivières, à l'origine des forêts galeries. Dans la vallée de l'Ouémé nous distinguons différents types de sols :

- Les sols de plateau de terre de barre : sols appauvris sur 50-60 cm renfermant 40 % d'argile et de 2 à 3 % de matière organique bien évoluée.
- Les tourbes argileuses et tourbes brutes localisées au pied du plateau de terre de barre.
- Les sols de bourrelet de berge argileux à limono-argileux renfermant 50 à 80 % d'argile et 3 à 6 % de matière organique assez évoluée.
- Les sols humiques à Gley (Tigbodji)

Ils correspondent à la zone basse qui se développe entre le bourrelet de berge et le pied du plateau de terre de barre. Ils sont situés en général à moins de 50 cm au-dessus du niveau moyen de la nappe phréatique (dans la zone sud) et 1 m dans la zone située au nord de Houêda. Allongés nord-sud, dans le sens de la vallée, leur largeur est variable : 500 à 2000 m. Elle dépend de l'importance du bourrelet de berge. Cette zone déprimée à topographie très plane est parcourue par de très nombreux trous à poissons recouverts d'une végétation dense de sorgho sauvage qui ne brûle pas naturellement. La nappe reste toute l'année très proche de la surface. La texture est très lourde. Les teneurs en argile dépassent 60 % avec des valeurs moyennes supérieures à 70 % et celles en matière organique varient de 5 à 15 % (Jeanneret et Viennot, 1971 cités par Nonfon, 1988).

Il convient de noter que la fertilité de la couverture pédologique du delta est annuellement renouvelée avec le dépôt alluvionnaire de la crue et la décomposition subséquente de la végétation de la plaine d'inondation.

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

Selon Paradis (1975), les formations climatiques édaphiques dans la vallée de l'Ouémé, appartenant au domaine des forêts denses humides, devraient être, avant l'intervention humaine :

- Forêt occasionnellement inondée sur les sols sableux élevés
- Forêt ombrophile riveraine sur les sols argileux inondés chaque année. Les forêts occasionnellement inondées ont été transformées en palmeraies ou en champs cultivés à l'exception de quelques îlots sacrés.

Les forêts ombrophiles riveraines dont il ne reste souvent qu'un fourré arbustif très dense, envahi par les plantes grimpantes comme *Paullina pinnata* et *Ipomea velutipes*, ont été transformées en (Sokpon et Adjakidjè, 2001) :

- Savane herbeuse à *Mitragyna inermis* et *Andropogon gayanus* var *squamulatus*.
- Savane à *Echinochloa pyramidalis*. Cette espèce végétale domine les parties longuement inondées pendant la crue, là donc où le sol reste très humide jusqu'à 3 ou 4 mois après la décrue.
- Savane à *Polygonum limbaum*. Le *Polygonum limbaum* occupe les dépressions, souvent de faible étendue, où l'eau stagnante de décrue persiste jusqu'au commencement de la saison des pluies. Dans le delta, la presque totalité des strates herbacées disparaît à la décrue pour donner place à des cultures.

1.1.4.2. Faune

L'ichtyofaune est très diversifiée sur l'ensemble du bassin de l'Ouémé. En effet, d'Almeida (1995) a recensé sur le tronçon des deux forêts classées de l'Ouémé supérieur et du Wari Maro 49 espèces de poissons appartenant à 17 familles. Lalèyè (1995) a trouvé pour la zone lagunaire (complexe lac Nokoué - lagune de Porto-Novo) 78 espèces réparties en 36 familles. L'étude la plus complète sur la faune ichtyologique de l'Ouémé est celle de Lalèyè et al. (2004). Cette étude a permis de recenser 122 espèces de poissons réparties en 87 genres et 50 familles. Les Mormyridae sont les plus nombreux avec 12 espèces. Viennent ensuite les Cichlidae, les Characidae, les Cyprinidae et les Gobiidae avec respectivement 10, 8, 7 et 6 espèces. 24 espèces jamais signalées dans le bassin du fleuve Ouémé et appartenant à 17 familles s'ajoutent à la faune ichtyologique jusque-là connue, selon les auteurs. Les richesses spécifiques les plus élevées ont été observées dans le delta de l'Ouémé. On trouve aussi dans le delta de l'Ouémé les crustacés qui sont représentés par 10 espèces appartenant à 3 genres et deux familles (Kouton, 2004 ; Wenon, 2005). Les principales espèces sont : *Macrobrachium vollenhovenii*,

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

Macrobrachium macrobrachion, Macrobrachium duxi, Macrobrachium felicinum, Macrobrachium raridens, Atya gabonensis, Atya africana et Desmocarid trispinosus. Parmi les batraciens, les grenouilles représentent de quantités importantes dans les captures des trous à poissons (whédos) (Nonfon, 1988 ; Chikou et al., 1997a). L'avifaune est dominée par les Ploceus cucullatus (tisserins) et Spermettes nonettes (Adjakpa, 2001). Les insectes les plus représentés dans la plaine sont les Hyménoptères (fourmis), les Odonates, les Coléoptères, les Orthoptères et les Diptères (Gnonhossou, 2002). Parmi les mammifères aquatiques rencontrés on peut citer le lamantin et la loutre (Kidjo et Guédou, 2001). Les animaux sauvages terrestres qui y ont été signalés sont les suivants: francolins (Francolinus bicalcaratus), poule d'eau (Gallinula chloropus meridionalis), céphalophes (Sylvicapra grimmia, Cephalaophus niger), phacochères (Phacochoerus aethiopicus), lièvres (Lepus crawshayi), primates (Papio anubis, Cercopithecus aethiops), de nombreux rongeurs (Thryonomys swindermyi, Xerus erythropus, Heliosciurus gambianus, Arvicanthis niloticus, Cricetomys gambianus), et des reptiles (Python sebae, Varanus niloticus, Crocodylus niloticus) (Kidjo et Guédou, 2001).

Dans la partie Sud du bassin de l'Ouémé qui correspond à la zone du delta et des lagunes, le climat est du type subéquatorial. Il règne jusqu'à la latitude de Savè et est caractérisé par une forte humidité, une température élevée et plus ou moins constante.

1.1.4.3. Hydrographie

Situé sur le territoire béninois, le bassin de l'Ouémé à Bonou est précisément localisé entre 6°24' et 10°12' Nord et entre 1°30' et 3°00' Est (Le Barbé et al., 1998) (figure 1). Il s'écoule du nord vers le sud où il crée dans sa partie aval une vallée très riche en minéraux organiques : la vallée de l'Ouémé, la 2ème la plus fertile au monde après le Nil. Son climat est déterminé par les centres d'action commandée par la circulation atmosphérique ouest-africaine (Le Lay, 2006). L'anticyclone de Sainte-Hélène, dans l'hémisphère sud, gouverne le flux de mousson et le dirige sur le Bénin. C'est ce qui explique les pluies de mousson qui peuvent précipiter une journée au lieu d'être réparties sur tout un mois. La mousson couvre ainsi tout le secteur d'étude aux mois de juillet, août et septembre, influençant ainsi la dynamique hydro-écologique de l'hydrosystème Ouémé et les activités socio-économiques.

1.1.5. Quelques aspects socio-économiques

La pêche est active surtout en période de crue. La production était d'environ 10000 t en 1957 et 6500 t en 1968-69 (Welcome 1971). Il existe des méthodes autochtones de pisciculture : des parcs (acadja) et des étangs (whedo) creusés dans la plaine inondable, des trous Cahlo creusés dans la berge du fleuve.

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

En saison sèche, les pêcheurs pratiquent l'agriculture dans la plaine inondable fertile. Les principales activités économiques du delta de l'Ouémé sont également la pêche et l'agriculture dont l'exercice est régi par le régime du fleuve Ouémé. Dans les communes de Bonou, de Adjohoun, de Dangbo par exemple les populations pratiquent une agriculture appelée « agriculture traditionnelle du delta ». Elle cultive trois types de terre à savoir le plateau de terre de barre, les bourrelets de berge et les bas-fonds. Sur le plateau de terre de barre, la palmeraie est exploitée de façon assez intensive et la quasi-totalité du sol sous palmeraie est consacrée à des cultures de manioc et de maïs. Sur les bourrelets de berge, il est possible d'y pratiquer deux cultures annuelles, l'une en décrue (décembre à mars) et l'autre pluviale de mars à juin : manioc, haricot, patate douce, maïs, piment, tomate, gombo, etc. Dans les bas-fonds, on n'y effectue qu'une seule culture de décrue : les cultures maraîchères et le maïs. L'élevage est également pratiqué dans cette zone du delta de l'Ouémé. On y élève des bovins, des porcins, des caprins et de la volaille (Kamoutchoni,2020). La pêche représente près de 30 à 40 % du revenu du paysan, ce qui est considérable. Seules les femmes mènent une activité commerciale. Elles vendent du poisson et des produits alimentaires de première nécessité. Ce sont en général les étrangers (Yoruba, Nago, etc.) qui mènent une activité intense de commerce.

1.2. Données collectées et utilisées

La collecte des données hydrométriques (débits) de 1948 à 2020 a été faite à la DGEau. Quant aux données de précipitations d'évapotranspiration et de température journaliers, la collecte a été faite à l'agence Météo-Bénin. Ces données proviennent des stations pluviométriques et hydrométriques et s'étendent sur la période de 1960-2016 avec assez de données manquantes.

Le tableau 1 présente les différentes stations utilisées.

Tableau 1 : Les différentes stations utilisées

Numéros	Noms	Latitudes (°décimal)	Longitudes (°décimal)	Altitudes (m)
1	ABOMEY	7.0914	2.07747	221
2	BANTE	8.45537	1.97065	279
3	BASSILA	9.11962	1.73442	325
4	BETEROU	9.32046	2.39439	258
5	BIRNI	10.18935	1.57408	438
6	BOHICON	7.07278	2.16945	167
7	BONOU	6.81408	2.64766	50

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

8	DJOUGOU	9.87531	1.73728	439
9	INA	10.16739	2.90771	392
10	KETOU	7.2746	2.75853	117
11	OPKARA	9.61457	2.90728	292
12	SAVALOU	7.92065	0.20794	227
13	SAVE	8.03021	2.61231	199
14	TCHAUROU	8.95135	2.76018	125
15	ZAGNANADO	7.1644	2.46404	104
16	PARAKOU	9.48573	2.76077	392

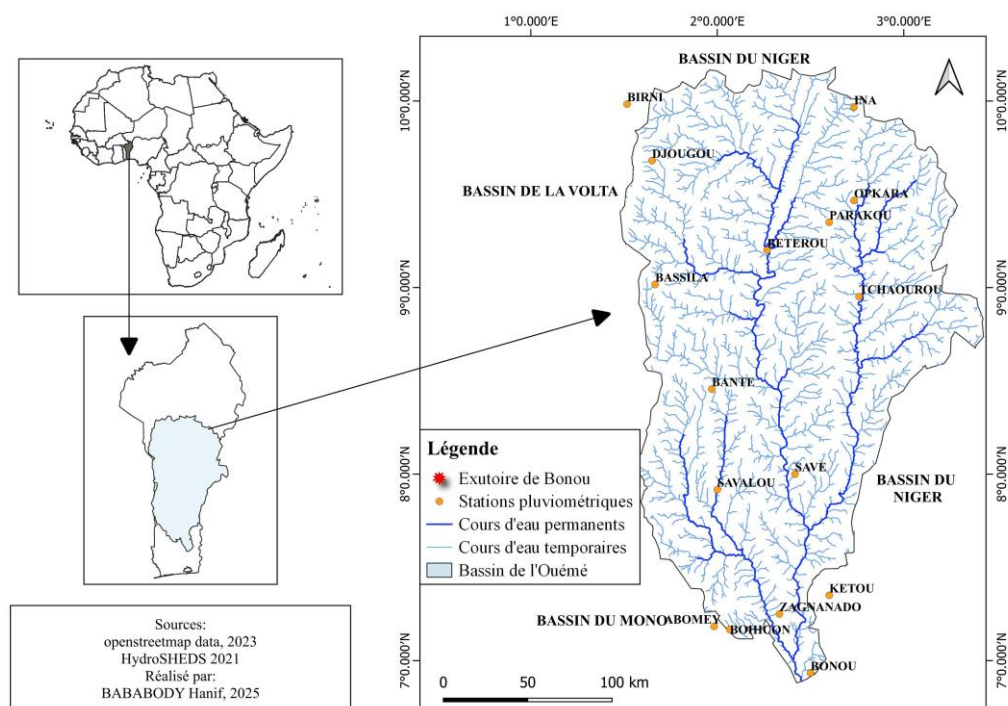


Figure 2 : Carte des stations choisies

1.3. Matériels utilisés

Les données sont traitées grâce au logiciel Hyfran, Khronostat et le logiciel Excel 2019 a permis de faire le calcul de l'indice standardisé. CodeBlocks 17.12 a permis d'arranger les données avant traitement. La carte du milieu d'étude a été faite grâce à QGIS Desktop 2.6.1.

Hyfran

Hyfran est un logiciel spécialisé dans l'analyse statistique des données hydrologiques et hydrauliques. Il est principalement utilisé pour l'étude des crues, des précipitations et d'autres phénomènes naturels rares. Développé par des experts en hydrologie, Hyfran permet d'estimer les probabilités d'occurrence de phénomènes extrêmes en se basant sur des données historiques.

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

Les caractéristiques principales de Hyfran sont :

- Modèles statistiques
- Analyse des séries temporelles
- Estimation des quantiles
- Interface conviviale
- Rapports et graphiques

Hyfran est appliqué dans l'études de crues, la gestion des ressources en eau, la recherche académique.

Logiciel Microsoft Excel :

Microsoft Excel est un logiciel tableur de la suite bureautique Microsoft Office développé et distribué par l'éditeur Microsoft.

C'est un tableur qui se présente sous forme de tableaux structurés en lignes et colonnes dans des onglets séparés avec, pour chaque cellule qui compose chaque feuille, des caractéristiques particulières pour des calculs, des outils de génération de graphiques. Excel est un outil mathématique. On peut y insérer des formules de calculs en référant les cellules par le binôme lettre-chiffre qui l'indique.

Khronostat

Le logiciel Khronostat est un outil statistique performant développé par une équipe de recherche de l'IRD (Lubes-niel et al., 1998). Il a été élaboré dans le cadre d'une étude sur la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. Il est orienté sur l'analyse des séries hydrométéorologiques (Koukponou 2001).

Les tests du logiciel permettent deux principaux types d'analyse :

- les premiers tests concernent la détermination du caractère aléatoire des séries,
- les seconds tests sont relatifs à la détection d'un point de rupture.

1.4. Méthodes

1.4.1. Correction et qualité des données

Dans le cadre d'un travail visant à obtenir de résultats pertinents, il faut s'assurer de la qualité des données collectées. Les données obtenues de la DGEau et de la Météo-Bénin étaient à un état brut. Il a fallu les traiter afin de les rendre utilisables par le modèle choisi. Ainsi, les données

de précipitations et hydrométriques ont été soigneusement arrangées grâce au langage de programmation PHP en vue de constituer une série chronologique. Les données manquantes ont été supprimées et les valeurs aberrantes ont été supprimées grâce au boxplot. Les précipitations moyennes journalières spatialisées sur le bassin ont été obtenues par krigeage (Matheron, 1970) avec un variogramme exponentiel.

1.4.2. Méthodes de traitement des données

Indice standardisé :

L'indice standardisé est une mesure statistique utilisée pour évaluer la position relative d'une valeur au sein d'une distribution. Il est calculé en soustrayant la moyenne de la distribution de la valeur observée, puis en divisant ce résultat par l'écart-type de la distribution. Cette standardisation permet de comparer des valeurs provenant de différentes distributions ou échelles en les ramenant à une échelle commune. L'indice standardisé est fréquemment utilisé dans les analyses statistiques pour évaluer les performances, identifier les anomalies ou comparer des échantillons.

Les calculs des indices standardisés pour les pluies ont été fait à partir du cumul annuel tandis que pour les débits ont été fait à partir des valeurs maximales.

Ainsi pour le calcul de l'indice standardisé de pluie nous avons fait le rapport de la différence entre le cumul annuel de pluie et la moyenne par l'écart type. La même opération a été faite pour déterminer l'indice standardisé de débit à partir des maximas.

La formule de l'indice standardisé Z est la suivante

$$Z = \frac{y - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

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

Méthodologie du logiciel Khronostat

Khronostat (1998) est un logiciel d'analyse statistique des séries temporelles, offrant plusieurs tests pour détecter les ruptures. Parmi ces méthodes, nous avons retenu celles permettant d'identifier les dates de ruptures : la méthode non paramétrique de Pettitt et la segmentation de Hubert. Ces tests ont été appliqués aux séries de précipitations, qu'elles soient observées ou reconstituées. Dans le cadre de cette étude, une rupture est qualifiée de faible lorsqu'un seul des

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

trois tests la détecte, de probable lorsque deux tests la confirment, et de majeure lorsqu'elle est identifiée par les trois tests.

Détection des seuils pluviométriques et hydrologiques de risques d'inondation

Les catégories SPI/SFI (Tableau 2), 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'Ouémé à Bonou.

Tableau 2 : Classification des valeurs SPI/SFI, 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 : McKee et al., 1993

Les valeurs seuils de pluie d'aléa d'inondation ont été déduits à partir de la formule de l'indice standardisé en prenant pour seuil critique 0 ; 1 ; 1,5 et 2.

Analyse fréquentielle des pluies et débits maximaux dans le bassin versant

L'analyse fréquentielle dans cette étude permet de caractériser l'ampleur des événements hydro-pluviométriques 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'événements et la probabilité d'apparition d'un événement de valeur donnée.

À l'aide du logiciel Hyfran, qui est un logiciel d'ajustement de lois statistiques développé par l'INRS-ETE, nous avons procédé à l'ajustement des données avec l'ensemble des lois de probabilité usuellement utilisée en hydrologie. 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. Le choix du meilleur ajustement a été fait avec les critères d'information Bayésien (BIC) et d'Akaike (AIC). Ces deux critères permettent de classer les modèles statistiques tenant compte du principe de parcimonie (donner plus de poids aux distributions à deux paramètres), et de choisir un modèle fréquentiel représentatif des données et d'obtenir une

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

estimation de quantiles sur une base scientifique et uniforme (la même approche pour toutes les stations). La démarche que nous avons adoptée pour l'analyse fréquentielle locale est la suivante :

➤ Choix des stations

Le choix de ces stations est dû à la disponibilité des données sur la période d'étude choisie.

➤ Collecte et préparation des données

La collecte des données hydrométriques (débits) a été faite à la DGEau. Quant aux données de précipitations, la collecte a été faite à l'agence Météo-Bénin. Les données brutes ont été préparées avec les outils suivants : Excel et CodeBlocks.

➤ Vérification des hypothèse (stationnarité, indépendance, homogénéité)

- Test de Conformité :

Formulation des Hypothèses

- **Hypothèse nulle (H0)** : La distribution des données observées suit la distribution théorique spécifiée.
- **Hypothèse alternative (HA)** : La distribution des données observées ne suit pas la distribution théorique spécifiée.

p-value : Indique la probabilité d'obtenir une statistique de test aussi extrême ou plus extrême que celle observée si l'hypothèse nulle est vraie.

- **Si $p\text{-value} < 0.05$** (ou un autre seuil significatif choisi) : Nous rejetons l'hypothèse nulle. Cela signifie que la distribution des données observées diffère significativement de la distribution théorique.
- **Si $p\text{-value} \geq 0.05$** : Nous ne rejetons pas l'hypothèse nulle. Cela signifie qu'il n'y a pas suffisamment de preuves pour dire que la distribution des données observées diffère de la distribution théorique.

- **Test de Khi-carré :**

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

Ce test statistique est utilisé pour évaluer la qualité de l'ajustement des distributions de probabilité. Il compare les fréquences observées des données avec les fréquences attendues sous l'hypothèse que les données suivent la distribution ajustée.

Statistique de test (X^2) : Indique la distance entre les données observées et les données attendues sous l'hypothèse nulle.

p-value : Le test de Khi-carré permet de déterminer si les écarts entre les fréquences observées et attendues sont significatifs. Une valeur de p élevée indique une bonne adéquation du modèle aux données.

➤ Ajustement des lois de probabilité

L'ajustement des distributions de probabilité est effectué pour modéliser les maxima de débit annuel et les maxima de pluie annuelles. Deux types de distributions sont utilisés :

- Distribution GEV (Generalized Extreme Value)
- Distribution de Gumbel

Justification du choix des modèles

Les choix se sont portés sur ces distribution car elles ont un caractère adapté aux valeurs extrêmes, une pertinence théorique, une simplicité, une adoption universelle.

- Loi Gumbel

La loi Gumbel est une distribution qui est souvent utilisée pour décrire le comportement statistique ou l'analyse fréquentielle des valeurs extrêmes (Benhattab, 2016). Elle permet de mieux ajuster les séries de pluies (Slimani, 1985 ; Lubès et Masson, 1991 ; Hubert et Bendjoudi, 1998 ; Koutsoyannis, 2004 ; 2006 ; Goula et al., 2007 ; Soro et al., 2008). La fonction de répartition de la loi de Gumbel est donnée par :

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

$$\text{Où avec la variable réduite suivante } U = \frac{x-a}{b} \quad (3)$$

Où a et b sont les paramètres du modèle de Gumbel

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

- Loi Généralisée des Valeurs Extrêmes (GEV)

Elle est une loi à trois paramètres représentés comme une généralisation de la loi de Gumbel. Elle a aussi fait l'objet de beaucoup d'étude au Carribean (Sisson et al., 2006) ; en Côte d'Ivoire 94 (Goula et al., 2007 ; Soro et al., 2008) et au Bénin (Amoussou et al., 2014). Sa fonction de répartition est donnée par la formule :

$$F(x) = \exp \left(-\exp \left(\left(\frac{x-a}{b} \right)^{\frac{1}{k}} \right) \right) \text{ pour } k \neq 0 \quad (4)$$

Méthodes d'ajustement :

- **Méthode des moments :**

Cette méthode est utilisée pour les deux distributions (GEV et Gumbel). Elle consiste à estimer les paramètres d'une distribution de probabilité à partir d'un échantillon de données. Elle repose sur l'idée que les moments théoriques d'une distribution (comme la moyenne, la variance, etc.) peuvent être approximatés par les moments empiriques, calculés à partir de l'échantillon.

- Comparaison des lois (BIC et AIC)

Le choix du meilleur ajustement a été fait avec les critères d'information Bayésien (BIC) et d'Akaike (AIC). Ces deux critères permettent de classer les modèles statistiques tenant compte du principe de parcimonie, et de choisir un modèle fréquentiel représentatif des données. Le choix du meilleur ajustement est fait en prenant compte du modèle qui a un AIC plus petit.

- Estimation des quantiles et intervalle de confiance

Les quantiles sont estimés pour différentes périodes de retour afin de caractériser les événements extrêmes. Les périodes de retour choisies sont : 2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans. Ces périodes de retour permettent d'estimer la probabilité de dépassement de certains niveaux de débit extrême sur différentes échelles temporelles.

Les résultats seront interprétés après à la suite de cette méthodologie.

Chapitre 2 : Résultats, discussions, conclusion et perspectives

2.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats issus de l'application de la méthodologie décrite dans le chapitre précédent.

2.2. Indices pluviométriques et hydrologiques

2.2.1. Analyse de l'évolution de l'indice normalisé de précipitations (SPI)

La figure 3 présente l'évolution interannuelle du cumul annuel de précipitation dans le bassin-versant de Bonou de 1960 à 2016.

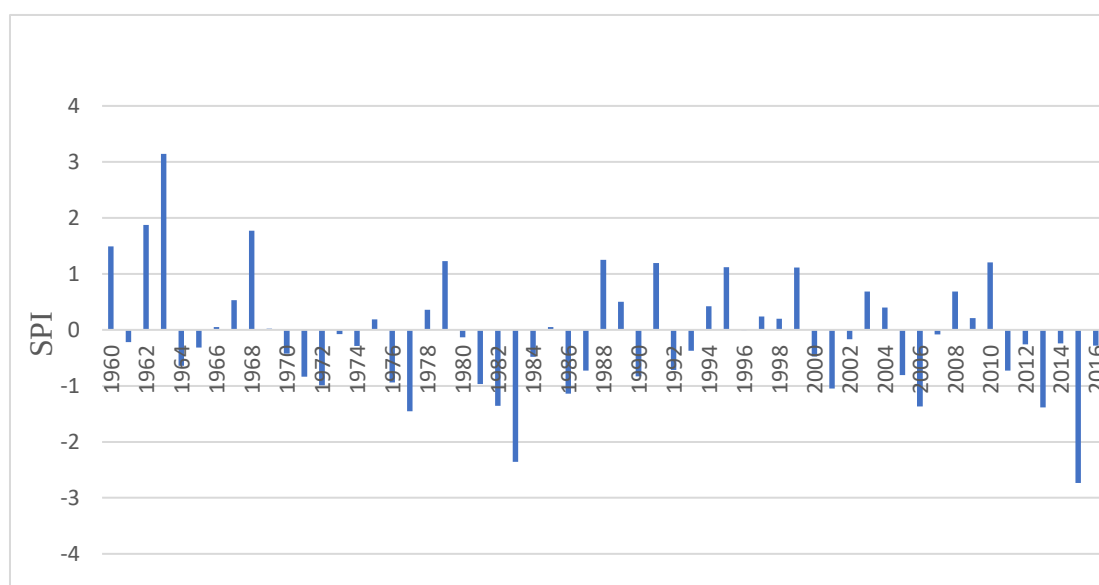


Figure 3 : Variation interannuelle des indices standardisés de précipitations dans le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou de 1960 -2016

Il ressort de cette analyse 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 3,14 dans le bassin versant. L'année 1963 est considérée comme extrêmement humide dans l'ensemble du bassin-versant en fonction de son indice de précipitation qui est au-delà de +3. De même, trois phases pluviométriques se dégagent de l'examen de cette figure. La première phase correspond à la période 1960-1968 qui est caractérisée par une fréquence élevée des anomalies positives et contient l'année 1963, considérée comme extrêmement humide avec indice de précipitation de +3,14. La deuxième phase va de 1970-1986. Elle est 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 1988 à 2010. Elle est marquée par une légère reprise des précipitations avec des indices positifs variant de 0 à 1,25.

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

Cette reprise des précipitations est accompagnée des évènements pluvieux pas extrêmes qui ne peuvent pas occasionner des inondations et des dommages socioéconomiques et environnementaux dans le secteur d'étude.

L'analyse statistique par le test de corrélation sur le rang ne met en évidence aucune tendance dans la chronique des précipitations annuelles. La figure 4 présente le résultat du test de Pettitt sur des séries de précipitations annuelles.

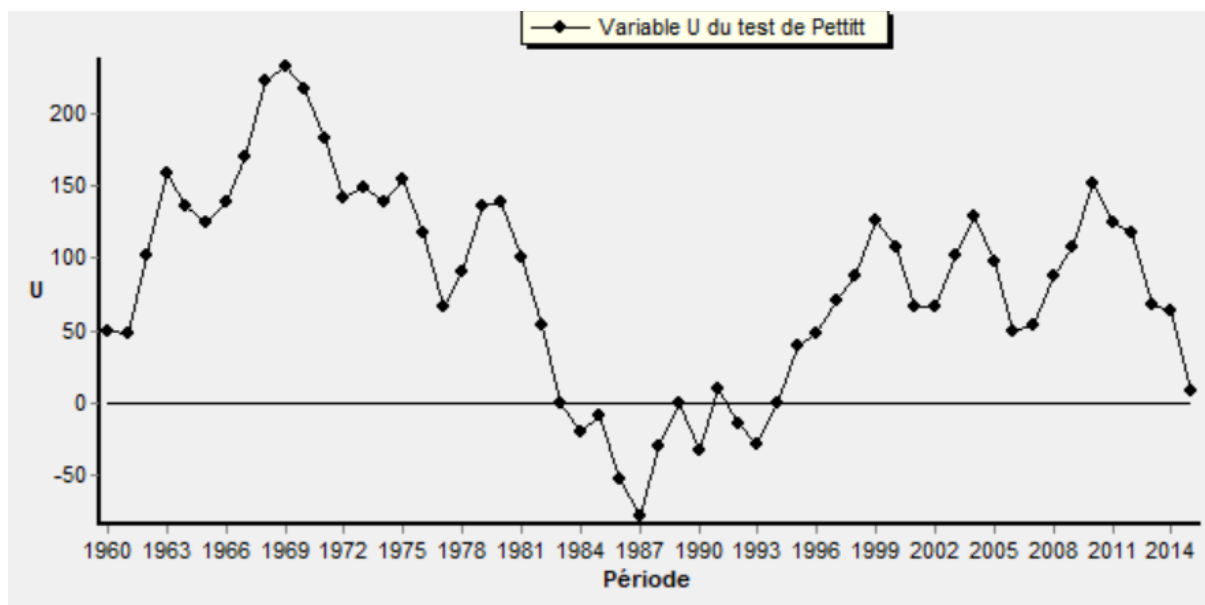


Figure 4 : Résultat du test de Pettitt

L'analyse de la figure 4 permet de constater que le test de Pettitt identifie l'année 1963 comme année de rupture de stationnarité. Cette rupture est significative au seuil 99%. Il se dégage donc deux sous séries : la série 1960 à 1963 et la série 1964 à 2016.

Tableau 3 : Segmentation de Hubert (Niveau de significativité de Scheffé 1%)

Début	Fin	Moyenne	Ecart-type
1960	1963	1424,275	241,186
1964	2016	1114,164	157,224

Au regard de ces tests, il est remarqué que la moyenne de la sous-série avant la rupture est de 1424,275 (plus ou moins 241,186) et de 1114,164 (plus ou moins 157,224) après la rupture soit un déficit pluviométrique de 21,77% après la rupture. La sous période 1960 à 1963 est donc plus humide que la sous période 1964 à 2016.

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

2.2.2. Analyse de l'évolution de l'indice normalisé de débits (SFI)

La figure 5 montre l'évolution interannuelle des indices standardisés des débits dans le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou.

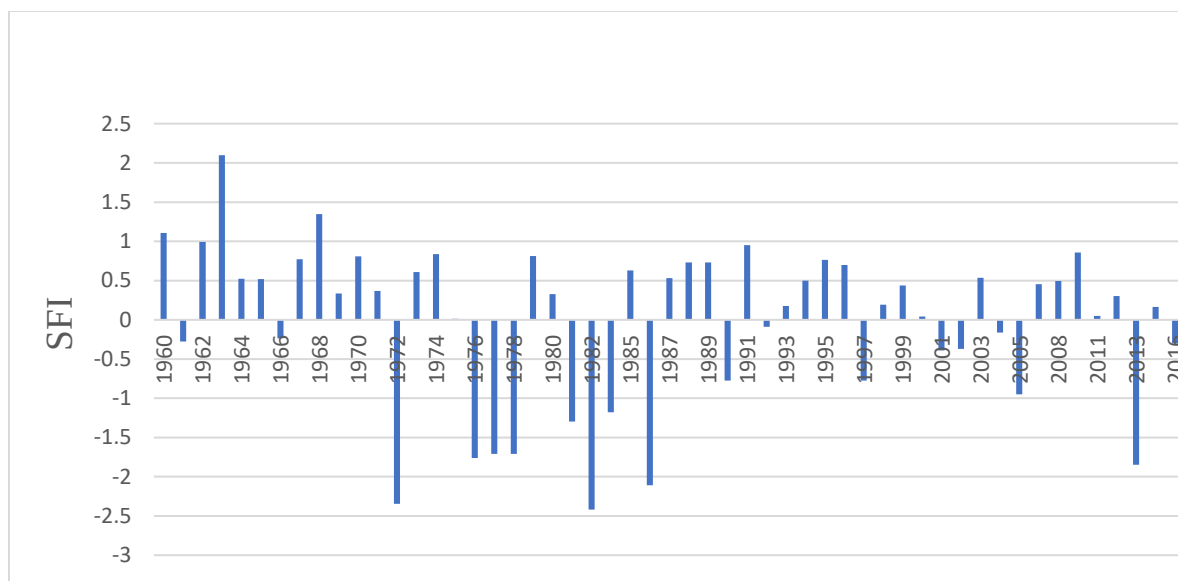


Figure 5 : Variabilité interannuelle des débits maximaux journaliers dans le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou (1960-2016)

Il ressort de l'analyse de la figure 5 que la période de 1960-1974 est caractérisée par de forts débits dans le bassin-versant. 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 1960, 1962, 1963 et 1968. Cette période de fort écoulement est l'émanation des excédents pluviométriques de la période 1960-1968. La période 1976-1984 est marquée par de faibles écoulements avec la persistance des anomalies négatives. La période 1987 à 2003 a été objet de débits moyens (0 à 0,94 pour les indices). Les années de 2004 à 2014 sont également caractérisées par des anomalies positives malgré deux anomalies négatives.

L'analyse statistique par le test de corrélation sur le rang ne met en évidence aucune tendance dans la chronique des débits maximaux. La figure 6 présente le résultat du test de Pettitt sur des séries des débits maximaux.

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

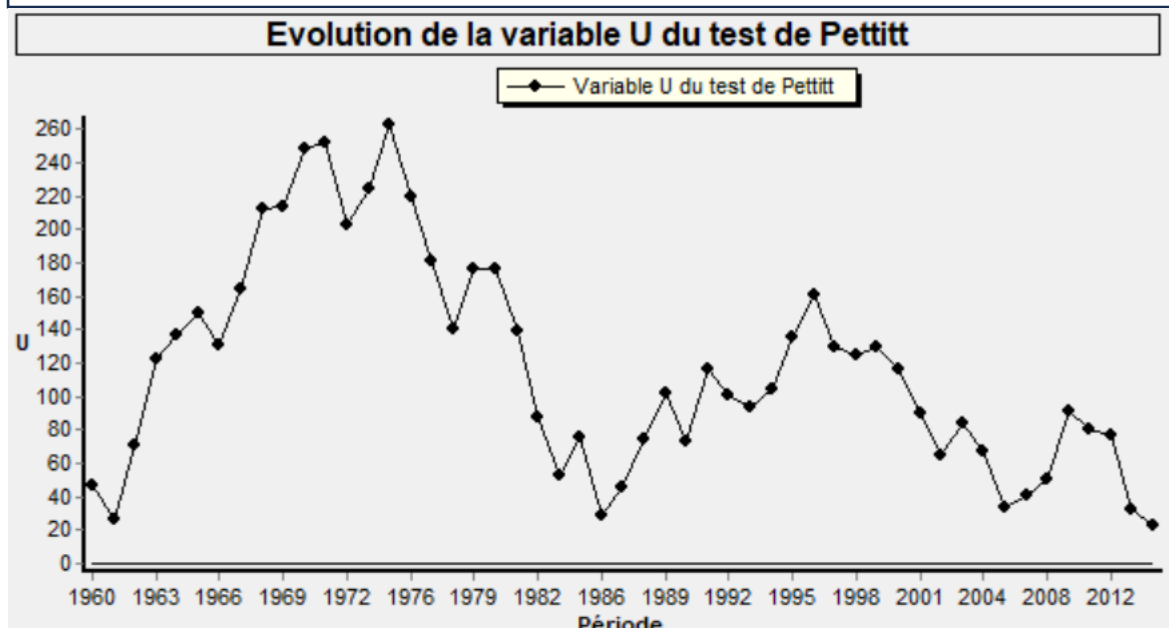


Figure 6 : Résultat du test de Pettitt pour les débits

L'analyse de la figure permet de constater que le test de Pettitt identifie les années 1971 et 1984 comme année de rupture de stationnarité. Cette rupture est significative au seuil 99%. Il se dégage donc trois sous séries : la série 1960 à 1971, la série 1972 à 1984 et la série 1985 à 2011.

Tableau 4 : Segmentation de Hubert pour les débits

Début	Fin	Moyenne	Ecart-type
1960	1971	1015,908	180,202
1972	1984	587,531	354,575
1985	2011	855,315	177,944

Au regard de ces tests, il est remarqué que les moyennes des sous-séries avant et après la première rupture sont respectivement de 1015,908 (plus moins 180,202) et de 587,531 (plus ou moins 354,575) soit un déficit de 42,16% après la rupture. La sous période 1960 à 1971 est donc plus prolifique en termes de débit que la sous période 1972 à 1984. La moyenne de la troisième sous série est de 855,315 (plus ou moins 177,944) avec un excès 45,57% par rapport à la deuxième sous série.

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

2.2.3. Analyse de l'évolution de l'indice normalisé de précipitations et de débits

La figure 7 montre l'évolution interannuelle des indices standardisés des précipitation et des débits dans le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou.

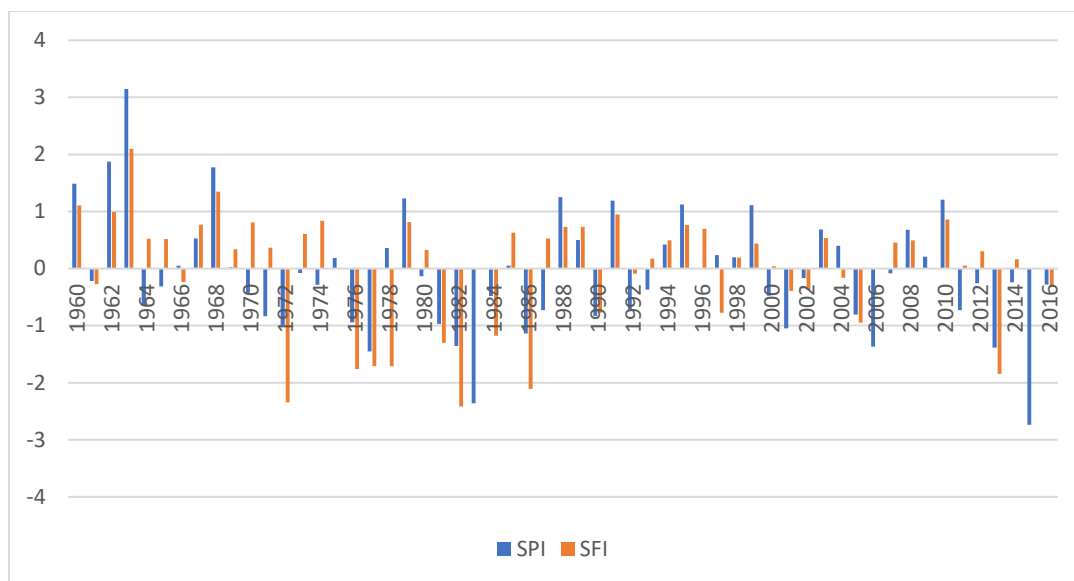


Figure 7 : Comparaison de la variabilité interannuelle des précipitations et des débits maximaux journaliers dans le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou (1960-2016)

De l'analyse de cette figure, on peut remarquer que les variations des pluies et des débits sont similaires. Les périodes 1960 à 1968 et 1986 à 2002 sont marquées par de fortes pluies caractérisées par des hauts débits. De 1970 à 1978 et 2004 à 2016, on remarque une baisse des débits ; due à une diminution des hauteurs de pluies. La relation pluie-débit est donc justifiée.

2.3. Seuils pluvio-hydrologiques de risques d'inondation dans le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou

Les indices standardisés de précipitations et de débits commençants de 0 à +2 permettent de catégoriser les seuils pluviohydrologiques et correspondent respectivement aux classes d'aléa limité, modéré, significatif et critique. Cette catégorisation des seuils pluviométriques et hydrologiques permet de définir l'ampleur des inondations dans le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou. Les seuils pluviométriques et de débits seuils d'aléa d'inondation varient en fonction du niveau de risque comme l'indique le tableau 5.

Tableau 5 : Pluies maximales d'aléa d'inondation (1960-2016) et débits maximaux journaliers annuels (1960-2016) et seuils de risques d'inondation dans le bassin de l'Ouémé à Bonou

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

Seuils journaliers pluviométriques d'inondation dans le bassin versant (mm)	Débits seuils d'aléas d'inondation à Bonou (m^3/s)	Niveaux de risques d'inondation
1498,40	1436,91	Critique
1411,51	1270,15	Significatif
1324,62	1103,39	Modéré
1150,85	769,86	Limité

Il ressort de l'analyse du tableau 5 que les seuils pluviométriques journaliers sont de 1150,85 mm pour le risque limité, 1324,62 mm pour le risque modéré, 1411,51 mm pour le risque significatif et 1498,40 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 Ouémé, 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 1324,62 mm, l'ampleur de cette inondation est modérée. Les seuils d'aléa significatif et critique sont plus remarquables dans le bassin de Ouémé 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), ils sont de 769,86 m^3/s pour le risque limité, 1103,39 m^3/s pour le risque modéré, 1270,15 m^3/s pour le risque significatif et 1436,91 m^3/s pour le risque critique dans le bassin-versant de Ouémé à l'exutoire de Bonou.

2.4. Ajustement graphique des pluies

2.4.1. Ajustement graphique des pluies annuelles avec GEV

La figure 8 présente un ajustement graphique des séries de précipitations modélisées par la loi de distribution GEV pour la période 1960-2016 dans le bassin de l'Ouémé à Bonou.

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

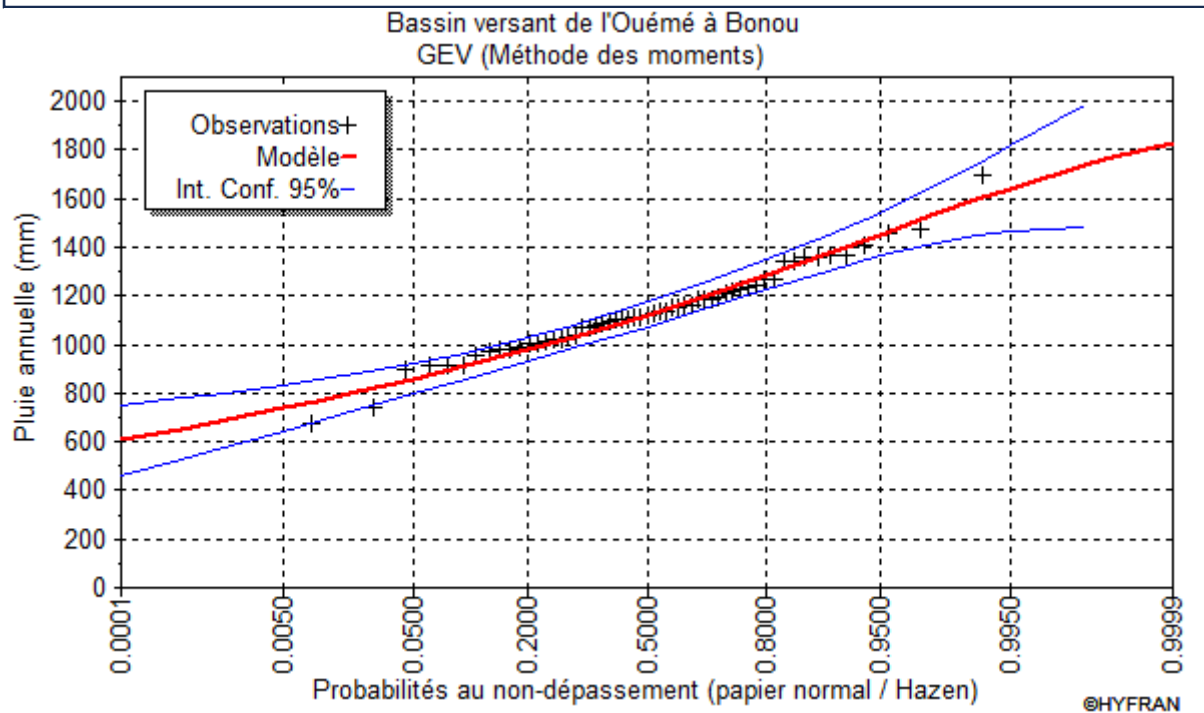


Figure 8 : Ajustement graphique des pluies avec la loi GEV

L'ajustement des pluies selon la loi GEV, effectué par la méthode des moments (Figure 8), révèle que ces pluies suivent de près le modèle dans un intervalle de confiance avec une probabilité de non dépassement de 95%. Cela suggère que la loi GEV, en utilisant la méthode des moments, offre des ajustements de meilleure qualité, ce qui en fait un modèle particulièrement adapté.

2.4.2. Ajustement graphique des pluies avec la loi Gumbel

La figure 9 suivante présente un ajustement graphique des séries de précipitations modélisées par la loi de distribution Gumbel pour la période 1960-2016 dans le bassin de l'Ouémé à Bonou.

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

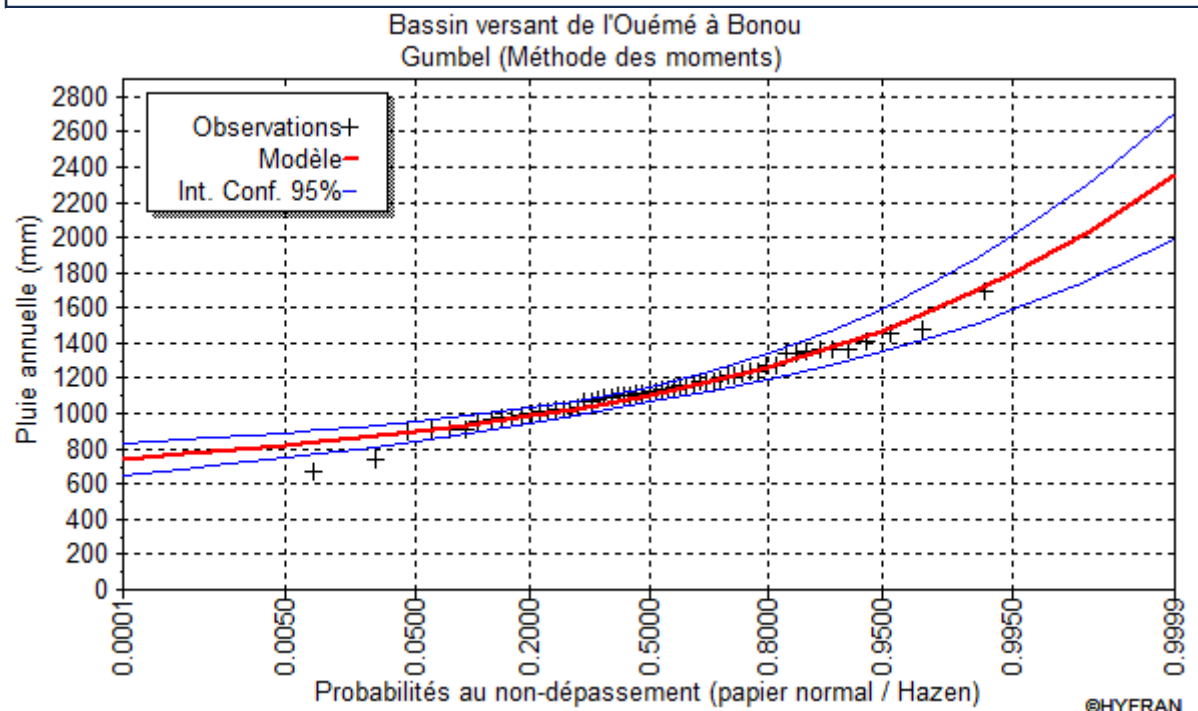


Figure 9 : Ajustement graphique des pluies avec la loi Gumbel

L'ajustement des pluies selon la loi Gumbel, effectué par la méthode des moments (Figure), révèle que ces pluies suivent de près le modèle dans un intervalle de confiance avec une probabilité de non dépassement de 95%. Cela suggère que la loi Gumbel, en utilisant la méthode des moments, offre des ajustements de meilleure qualité, ce qui en fait un modèle particulièrement adapté.

Critère d'ajustement de la loi GEV et Gumbel

Le tableau 6 montre les résultats des tests d'adéquation de Khi carré pour l'ajustement des pluies avec la loi GEV et la loi Gumbel.

Tableau 6 : Test d'adéquation de Khi carré pour l'ajustement des pluies

Pluie	Test d'adéquation et d'ajustement de Khi carré		AIC
	X ²	p-value	
Loi GEV	3,88	0,69	759,28
Loi Gumbel	7,39	0,38	773,12

Les résultats du test d'adéquation d'ajustement de Khi carré montre que l'échantillon provient de la loi GEV et Gumbel. Mais la loi GEV est meilleur car elle a un AIC plus petit que celui de

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

Gumbel. Les tests d'indépendance de Wald-Wolfowitz ont permis de mieux ajuster les pluies avec la loi GEV. Il ressort que les pluies sont indépendantes, homogènes et stationnaires dans le bassin versant de l'Ouémé à Bonou.

Le tableau 7 montre les différentes périodes de retour des pluies maximales annuelles et leurs intervalles de confiance.

Tableau 7 : Estimation des périodes de retour des pluies maximales du risque d'inondation et des intervalles de confiance par la loi GEV

Période de retour	2ans	5ans	10ans	20ans	50ans	100ans
Bassin versant de l'Ouémé à Bonou	1124 [1073,3-1174,7]	1286,1 [1225,2-1346,9]	1376,8 [1305,2-1448,3]	1453,1 [1365,1-1541,1]	1538,5 [1420,2-1656,7]	1593,8 [1447,8-1739,8]

Il ressort de l'analyse du tableau 6 que les maximas annuels journaliers de pluie selon la loi GEV varient de 1073,3mm à 1174,7mm pour les périodes de retour de 2 ans, 1225,2mm à 1346,9mm pour 5 ans, 1305,2mm à 1448,3mm pour 10 ans. Par ailleurs, les hauteurs de pluies maximales comprises entre 1365,1mm à 1541,1mm pour les périodes de retour de 20 ans, 1420,2mm à 1656,7 mm pour 50 ans et 1447,8mm à 1739mm pour 100 ans sont qualifiés d'exceptionnel.

2.5. Ajustement graphique des débits maximaux

2.5.1. Ajustement graphique des débits avec la loi GEV

La figure 10 montre l'ajustement des débits maximaux avec la loi GEV sur le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou.

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

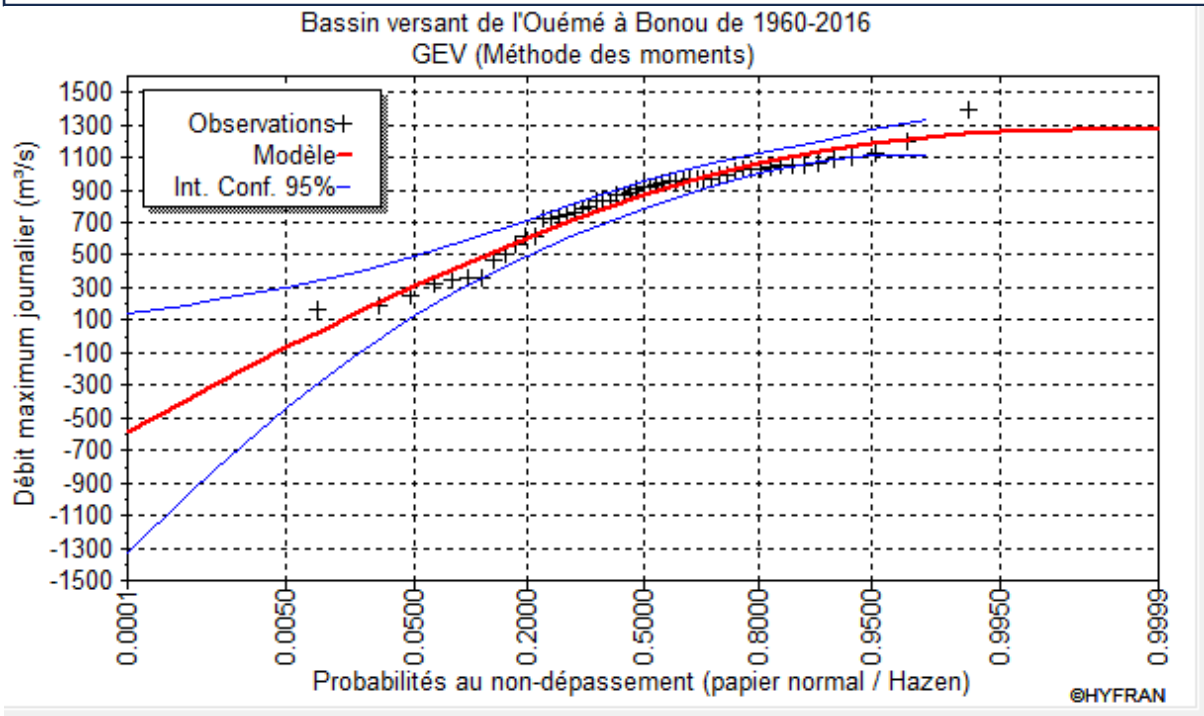


Figure 10 : Ajustement graphique des débits avec la loi GEV

H_0 a été accepté pour la signification 1%. L'échantillon provient d'une loi GEV au risque 1%.

L'analyse de la figure indique que les débits maximaux journaliers à Bonou sont bien ajustés par la loi GEV. Cette observation est confirmée par les données qui suivent les modèles avec une probabilité de non-dépassement de 95%. Ainsi, la loi GEV appliquée avec la méthode des moments, s'avère être un modèle plus précis par l'ajustement des débits maximaux journaliers dans le bassin versant de l'Ouémé à Bonou.

2.5.2. Ajustement graphique des débits avec la loi de Gumbel

La figure 11 montre l'ajustement des débits maximaux avec la loi Gumbel sur le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

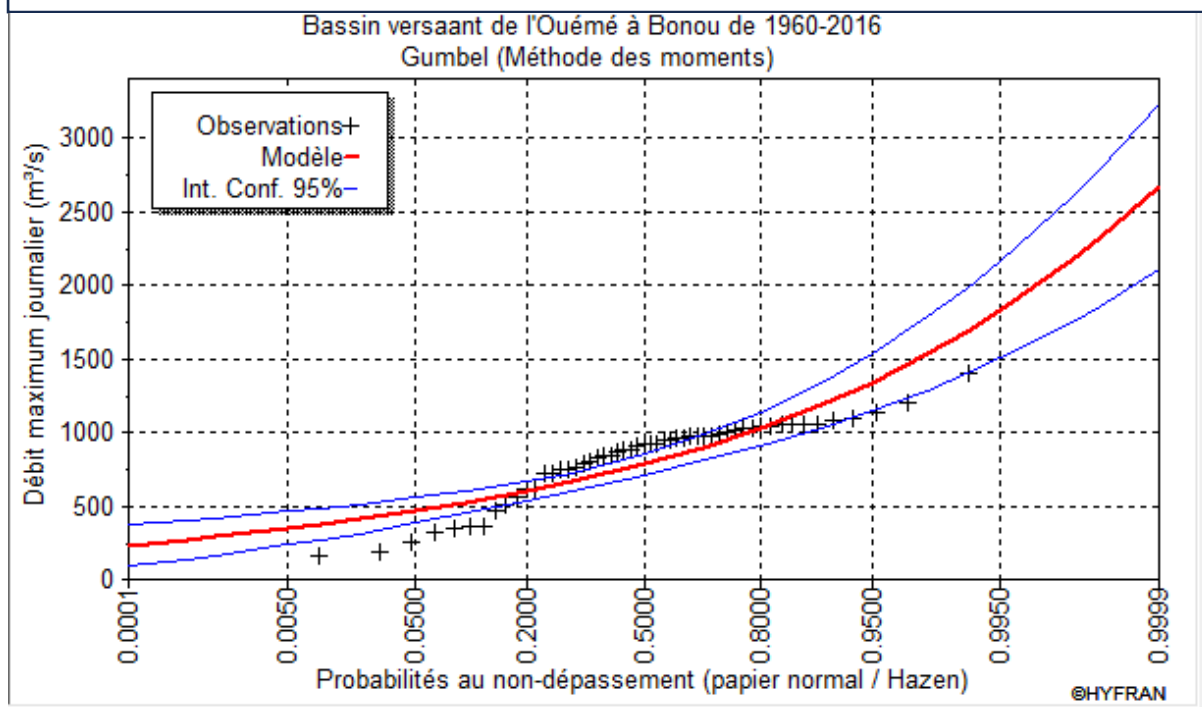


Figure 11 : Ajustement graphique des débits avec la loi Gumbel

H_0 a été rejeté au niveau de la signification 1%. L'échantillon ne provient donc pas de la loi Gumbel.

Critère d'ajustement de la loi GEV et la loi Gumbel

Le tableau 8 montre les résultats des tests d'adéquation de Khi carré ayant permis d'ajuster les débits maximaux avec la loi GEV et la loi Gumbel dans le bassin versant de l'Ouémé à Bonou.

Tableau 8 : Test d'adéquation de Khi carré

Débits	χ^2	p-value
Loi GEV	14,75	0,01
Loi Gumbel	30,72	0,00

Aucun modèle n'a donné de bonnes performances au risque 5%, nous avons donc choisi ce qui ajuste au mieux au risque 1% et c'était la loi GEV.

Période de retour d'aléa hydrométrique extrême du risque d'inondation

Le tableau 9 présente les périodes de retour et les intervalles de confiance permettant d'évaluer l'incertitude associée aux estimations.

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

Tableau 9 : Estimation des périodes de retour des débits maximaux de risque d'inondation et les intervalles de confiance par la loi GEV

Période de retour	2ans	5ans	10ans	20ans	50ans	100ans
Bassin versant à Bonou	868,95 [783,30-954,61]	1067,6 [1007,0-1128,2]	1142,4 [1080,0-1204,9]	1189,1 [1109,1-1269,0]	1226,4 [1119,3-1333,5]	1243,6

D'après l'analyse de ce tableau, les débits de crue ayant une probabilité d'un sur deux de se produire dans le bassin versant de l'Ouémé à Bonou varient entre 783,30m³/s et 954, 61m³/s. Pour le reste des évènements normaux ou extrêmes de fréquence égale ou supérieure à 5 ans, ou 10 ans ou 20 ans, les débits de crue varient respectivement de 1007,0 m³ /s à 1128,2 m³/s, 1080m³/s à 1204,9m³/s et 1109m³/s à 1269 m³/s. Les évènements exceptionnels et très exceptionnels de fréquences rares (≥ 50 ans ou = 100 ans), les débits enregistrés sont respectivement de 1119,3m³/s à 1333,5 m³ /s et 1243,6m³/s à Bonou.

2.4. Discussions

L'analyse des indices pluviométriques et hydrologiques ainsi que la détermination des seuils pluvio-hydrologiques dans le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou révèle plusieurs similitudes par rapport aux travaux antérieurs réalisés au Bénin. Les travaux de Kodja (2018) sur le bassin versant de l'Ouémé à Bonou ont révélé une régression de 49,27 % des débits moyens annuels entre les périodes 1951-1968 et 1969-1987 et une augmentation de 65 % entre les périodes 1969-1987 et 1988-2015. Sur la dernière période (1988-2015), les résultats révèlent aussi une augmentation des indicateurs des évènements hydroclimatiques extrêmes susceptibles d'occasionner les inondations à Bonou. Nos résultats concordent avec les travaux de Kodja dans le sens où il a travaillé sur la période de 1958 à 2015 ; période qui englobe celle de notre travail. Nos résultats sur la variabilité interannuelle des débits sont en accord avec les travaux réalisés par Kodja.

D'autres études comme celle-ci ont été faite en Afrique de l'Ouest principalement sur le bassin versant de l'Oti au Togo par Kougbanane et al (2020). Les seuils pluviométriques journaliers et les débits critiques identifiés dans le bassin de l'Ouémé à Bonou sont significativement plus élevés, ce qui peut s'expliquer par les différences climatiques et hydrologiques entre les deux

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

bassins. Par exemple, le seuil pluviométrique pour un risque critique dans le bassin de l'Ouémé est de 1498,40 mm, bien supérieur aux 104,45 mm observés dans le bassin de l'Oti. Cette variation illustre l'importance d'adapter les seuils d'alerte en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque bassin-versant.

La comparaison avec les travaux de Koumassi et al (2014) sur le bassin de la Sota au Bénin montre également des différences dans les périodes de retour des événements hydrologiques extrêmes. Alors que Koumassi et al ont observé des débits relativement modestes pour des périodes de retour de deux ans, le bassin de l'Ouémé présente des débits bien plus élevés pour des périodes similaires. Ces divergences soulignent la variabilité hydrologique entre les bassins et la nécessité d'une modélisation adaptée à chaque contexte régional.

Enfin, l'ajustement des pluies et des débits maximaux selon la loi GEV, comme cela a été fait dans cette étude, a montré une bonne concordance avec les modèles, confirmée par des tests d'ajustement tels que le Khi-carré et le test de Wald-Wolfowitz. Cela est en accord avec les travaux de Koungbanane et al (2020) et de Koumassi et al (2014), qui ont également trouvé la loi GEV comme étant un modèle approprié pour modéliser les événements extrêmes.

Bien que nos résultats corroborent plusieurs aspects des études antérieures, ils révèlent également des différences importantes, notamment dans la détermination des seuils d'inondation et les périodes de retour des événements extrêmes. Ces différences mettent en évidence la nécessité d'une approche spécifique à chaque bassin pour une gestion efficace des risques d'inondation.

CONCLUSION

Synthèse des principaux résultats

L'objectif de ce travail était d'analyser la variabilité des indices pluviométriques et hydrologiques ainsi que de déterminer les seuils pluviohydrologiques de risques d'inondation dans le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou. Grâce à l'utilisation de données couvrant la période de 1960 à 2016, nous avons pu identifier les phases climatiques distinctes et définir les seuils critiques associés aux risques d'inondation dans cette région.

Les résultats obtenus nous permettent de répondre efficacement aux questions de recherche que nous nous étions posées. Tout d'abord, l'analyse des indices standardisés de précipitation (SPI) et des débits (SFI) a révélé une variabilité marquée dans le bassin de l'Ouémé, avec des périodes alternantes entre anomalies positives et négatives. Cette étude a permis de mieux comprendre les dynamiques climatiques locales, en mettant en évidence l'influence des variations pluviométriques sur les débits hydrologiques.

Ensuite, la détermination des seuils d'inondation, basée sur les analyses fréquentielles, a permis de catégoriser les risques en niveaux limité, modéré, significatif, et critique. Contrairement aux études similaires menées dans d'autres bassins, les seuils identifiés pour le bassin de l'Ouémé sont sensiblement plus élevés, soulignant ainsi les particularités hydrologiques de cette région. L'utilisation de la loi GEV pour ajuster les précipitations et les débits maximaux a confirmé sa pertinence et sa fiabilité, avec des ajustements de haute qualité, validés par des tests d'ajustement rigoureux.

Perspective

Au vu de ces différents résultats, certaines dispositions et pistes de recherche concrètes sont à prendre pour une meilleure connaissance de l'analyse fréquentielle des événements pluviohydrologiques extrêmes associés aux inondations afin d'estimer leur période de retour dans la zone d'étude.

- On pourrait refaire le même exercice sur le bassin versant de l'Ouémé en prenant en compte un autre exutoire.
- Faire l'analyse fréquentielle sur la même zone d'étude en utilisant un autre logiciel.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Adam K. S., Boko M., (1993). Géographie du Bénin, EDICEF Paris, 96 Pages.

Akognongbé A J. S., (2014). Influence de la variabilité climatique et les activités anthropiques sur les eaux de surface dans le bassin de l'Ouémé à Bétérrou au Bénin. Thèse de doctorat Unique, Université d'Abomey-Calavi.

Amoussou E., (2010). Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassinversant du complexe fluvial lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest) Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne.

Atchadé A. A G., Dossou-Yovo E. R., Kodja D. J., Vissin E. W., Boukari M., (2015). Dynamique de l'occupation des terres et ressources en eau du bassin-versant de la rivière du Zou à l'exutoire de Domè au Bénin., XXVIIIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège.

Atchadé A. A. G., (2014). Impacts de la dynamique du climat et de l'occupation des terres sur les ressources en eau du bassin-versant de la rivière zou dans le Bénin méridional, Thèse de Doctorat, EDP/FLASH.

Donou B. T., (2015). Extrêmes hydro-climatiques dans les bassins inférieurs du fleuve Ouémé : Diagnostic, impact agricole et scénario de gestion, Thèse de Doctorat, EDP/FLASH/UAC, 264 pages.

Faure P., (1977). Carte pédologique de reconnaissance de la république Populaire du Bénin à 1/200 000 : Feuille de Djougou. ORSTOM. Notice explicative n°66 (4).

Faure, et al. (1998). Some factors affecting regional differentiation of the soils in the Republic of Benin (West Africa). Catena.

Houngué R., (2020). Climate change impacts on hydrodynamic functioning of oueme delta (Benin), Graduate Research Program on Climate Change and Water Resources (GRP-CCWR)

Kamagaté, B., (2006). « Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassinversant en milieu tropical de socle au Bénin : bassin-versant de la Donga (haute vallée de l'Ouémé) ». Phdthesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc. <https://tel.archivesouvertes.fr/tel-00193895/docum>.

Kamoutchoni B. K., (2020). Etude des sécheresses pluviométriques et hydrologiques sur le bassin de l'Ouémé, Mémoire de fin de formation, Université d'Abomey-Calavi, 63p.

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

- Kodja D. J., Aïna M., Vissin E. W., Amoussou E., (2012). Sensibilité de l'écoulement au forçage pluviométrique dans le bassin-versant du zou à Atchérigbé au Bénin (Afrique de l'Ouest). ISSN0051- 2515 N° 10, Revue de géographie du Laboratoire Leïdi, 262-279.
- Kodja D. J., Septembre (2018). Indicateurs des évènements hydroclimatiques extrêmes dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou en Afrique de l'Ouest
- Kouider A., Août (2003). Analyse fréquentielle locale des crues au Québec, Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maîtrise ès science (M.Sc), Université du Québec.
- Koukponou A. P., (2001). Détermination de ruptures statistiques dans les séries chronologiques de paramètres météorologiques : application aux stations du BURKINA FASO.
- Koumassi et al., (2014). Analyse fréquentielle des évènements hydro-pluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin. Laboratoire Pierre Pagny ''Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement'' (LACEEDE/UAC), BP 922 Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin.
- Koungbanane D. et al., (2020). Analyse fréquentielle et détermination des seuils pluvio-hydrologiques de risques d'inondation dans le bassin-versant de l'Oti au Togo. Centre d'Excellence Africain sur les Changements Climatiques, la Biodiversité et Agriculture Durable (CEA-CCBAD), Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire.
- Lawin A. et al., (2013). Analyse fréquentielle des séries de pluies et débits maximaux de l'Ouémé et estimation des débits de pointe, European Journal of Scientific Research.
- Le Barbé et al., (2002). Rainfall variability in West Africa during the years 1950–90. Journal of climate.
- Moniod. F., (1973). Régime hydrologique de l'Ouémé (Dahomey). Cah. ORSTOM, sbr. Hydrol.
- Ozer, P., (2012). Chapitre 5. Les risques naturels In Articuler risques, planification d'urgence et gestion de crise (pp.77-99). De Boeck Supérieur.
- Nouaceur Z. et al, (2015). Caractérisation des événements pluviométriques extrêmes sur la rive sud du bassin méditerranéen : Études du cas du « quart nord-est » algérien. Projet PHC Maghreb 30254WL, UMR IDÉES CNRS 6226, 1 rue Thomas Becket, 76 821, Mont-Saint-Aignan Cedex, France.

ANALYSE FREQUENTIELLE ET DETERMINATION DES SEUILS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN DE L'OUEME A BONOU

Totin, V.S H., (2012). Analyse de l'existant en matière de systèmes d'alerte et de produits de vigilance face aux risques climatiques en Afrique Subsaherienne, p21.

Vissin E.W., (2007). Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, Dijon, France