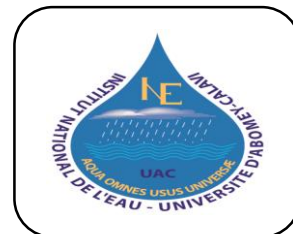




UNIVERSITE D'ABOMEY CALAVI

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

HOUEDOU Fabrice

Pour l'obtention du diplôme de

Licence Professionnelle en Hydrologie

OPTION : Hydrologie Quantitative

**ANALYSE FRÉQUENTIELLE DES PLUIES ET DÉBITS EXTRÊMES À
L'ORIGINE DE L'INONDATION DANS LA BASSE VALLÉE DU MONO**

Sous la supervision de :

Dr. Ir. D. M. Maurice AHOUANSOU (PhD) Maître-Assistant à la FSA/UAC

Maître de Stage :

Dr Razaki SANOUSSEI (PhD) Directeur Exécutif Adjoint de l'ABM



PROMOTION : 2022-2023

Dédicace

Je dédie ce travail à :

- ✓ mon père Albert S. HOUEDOU
- ✓ ma mère Bernadette DANSSOGBE

Remerciements

Ce travail a été possible à travers plusieurs personnes.

Je voudrais adresser mes premiers remerciements à Dieu le tout puissant qui dans Son amour a veillé sur moi pour la réalisation de ce travail ;

Mes remerciements vont également à l'endroit du Docteur Dr. Ir. D. M. Maurice AHOUANSOU (phD) pour sa disposition, son amour, son soutien et pour tous les informations et données fournis pour la réalisation du mémoire ;

Aux Docteurs BONGOU Ernesto et M'PO N'tcha pour leur examinations de notre travail, que Dieu les bénisse

A tous les enseignants de Licence en Hydrologie et Gestion Intégrée des Ressources en Eau à l'Institut National de l'Eau en particulier Dr Olory Audace Amen, recevez ma toute gratitude pour tous vos efforts ;

A mes aînés de la formation Professionnelle en Hydrologie en occurrence Audrey Merveille Sèdo ADANGO j'adresse ma reconnaissance pour son grand amour à m'accompagner dans le travail ;

A mes camarades de promotions pour la convivialité et l'ambiance, la motivation d'étude reçue d'eux, je me permets de citer SALIFOU Samilou Touré et KPOTO Alex Odilon pour leur contribution à l'élaboration de ce document ;

Tous les membres de mes familles biologique et chrétienne qui m'ont soutenu et encouragé par des prières et paroles de motivation durant ma formation en générale et la réalisation de ce document en particulier

Résumé

Plusieurs phénomènes naturels perturbent les conditions de vie des humains, c'est le cas de l'inondation qui devient de plus en plus fréquent. Ce phénomène n'a pas épargné le continent africain en général et la basse vallée du Mono en particulier. Notre étude a pour but de contribuer à une meilleure gestion des eaux fluviales et pluviales dans la basse vallée du Mono en mettant à la disposition des ingénieurs, praticiens et décideurs, des informations techniques pour une meilleure prise de décision. L'objectif de l'étude est donc de faire une analyse fréquentielle des extrêmes de pluies et de débit. A cet effet, les données pluviométriques de 3 stations de la zone d'étude couvrant la période de 1980 à 2017 et de débit de la période de 1950 à 2011 ont été utilisés. Cinq lois statistiques (GEV, Gumbel, Log normale, Pearson type III et Log normale à trois paramètres) ont servi à l'analyse fréquentielle et le modèle le plus approprié a été choisi sur la base des critères de validation d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC). Il ressort de cette étude que trois lois (GEV, Log-normale, Log-normale à trois paramètres) sont adéquates. Ainsi, la présente étude permet de disposer de nouvelles valeurs des maxima annuels de pluies et de débit journalières pour les périodes de retour de 2, 5, 10, 50 et 100 ans dans la basse vallée du Mono. Pour l'ensemble de la zone d'étude, les maximas varient entre 68 mm et 200 mm pour les pluies et 640 à 941m³ pour les débits respectivement pour les périodes de retour de 2 ans et 100 ans. Il est de ce fait constaté que l'évolution des quantiles de pluie calculés est proportionnelle à celle des périodes de retour.

Mots clés : basse vallée du Mono, inondations, pluie et débit, analyse fréquentielle, lois statistique

Abstract

A number of natural phenomena are disrupting human living conditions, such as flooding, which is becoming increasingly frequent. This phenomenon has not spared the African continent in general and the lower Mono valley in particular. The aim of our study is to contribute to better river and rainwater management in the lower Mono valley by providing engineers, practitioners and decision-makers with statistical laws that best describe rainfall and flow extremes and enable their future occurrence probabilities to be deduced. The aim of the study is therefore to carry out a frequency analysis of rainfall and flow extremes. To this end, rainfall data from 3 stations in the study area covering the period from 1980 to 2017 and flow data from 1950 to 2011 were used. Five statistical laws (GEV, Gumbel, Log normal, Pearson type III and Log normal with three parameters) were used for the frequency analysis, and the most appropriate model was chosen on the basis of the Akaike (AIC) and Bayesian (BIC) validation criteria. This study showed that three laws (GEV, Log-normal, Log-normal with three parameters) are appropriate. The present study therefore provides new values for annual rainfall and daily flow maxima for return periods of 2, 5, 10, 50 and 100 years in the lower Mono valley. For the study area as a whole, the maxima vary between 68 mm and 200 mm for rainfall and 640 to 941 for flow for return periods of 2 years and 100 years respectively. It can therefore be seen that the evolution of the rainfall quantiles calculated is proportional to that of the return periods.

Keywords : lower Mono valley, flooding, rainfall and discharge, frequency analysis, statistical laws

Sommaire

Introduction Générale.....	1
1. Contexte et justification.....	1
1. But de la recherche	2
2. Objectif du mémoire	2
3. Hypothèse de travail	3
4. Grande division du mémoire.....	3
Chapitre 1 : Clarification conceptuelle et état de l’art	4
1.1. Introduction.....	4
1.2. Clarification conceptuelle	4
1.3. Synthèse bibliographique.....	8
1.4. Conclusion partielle	12
Chapitre 2 : Données, Matériels et Méthodes.....	13
2.1. Introduction.....	13
2.2. Milieu d’étude	13
2.3. Données utilisées	20
2.4. Matériels utilisé.....	21
2.5. Méthodologie	22
Chapitre 3 : Résultats et Discussion	35
3.1 Résultats.....	35
3.2 Discussion	52
3.3 Conclusion partielle	54
Conclusion Générale et Perspective	55

Liste des Sigles et Acronymes

ABGF	Agence Béninoise de Gestion des Frontières
ABM	Autorité du Bassin du Mono
AIC	Critère d'Information d'Akaike
ANPC	Agence Nationale de la Protection Civile
BIC	Critère d'Information Bayésien
DG-Eau	Direction Général de l'Eau
GEV	Generalized Extreme Value
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
HYFRAN	HYdrological FRequency Analysis
INE	Institut National de l'Eau
INSAE	Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique
RGPH4	4ème Recensement General de la Population et de l'Habitation

Liste des tableaux

Tableau 1 : Série Pluviométriques utilisé.....	20
Tableau 2 : Lois statistiques et fonctions de densité de	29
Tableau 3 : Statistiques descriptives des stations étudiées	35
Tableau 4: Ajustement au test d'indépendance de Wald-Wolfowitz.....	36
Tableau 5 : Ajustement au test de stationnarité de Kendall	37
Tableau 6 : Ajustement au test d'homogénéité de Wilcoxon	38
Tableau 7 : Valeurs des critères d'information bayésien et d'Akaike pour chaque loi	38
Tableau 8: Paramètres estimés pour chaque loi	44
Tableau 9 : Quantiles (mm) des périodes de retour T-2, 5, 10, 50 et 100ans	45
Tableau 10: Caractéristique statistique	46
Tableau 11 : Test de vérification des hypothèses de base.....	47
Tableau 12 : Ajustement aux lois extrêmes	47
Tableau 13 : Quantiles de chaque période de retour de 2, 5, 10, 50 et 100 ans..	49
Tableau 14: Comparaison des quantiles des débits.....	54

Liste des figures

Figure 1 : Carte de la basse vallée du mono.....	14
Figure 2 : Occupation du sol dans la zone d'étude	17
Figure 3: Carte hydrographique de la zone d'étude.....	18
Figure 4: Principales étapes de l'analyse fréquentielle	22
Figure 5 Débits maximales journaliers à Athiémè de 1950 à 2011	21
Figure 6: Graphique d'ajustement avec un intervalle de confiance 95%	43
Figure 7: Ajustement de la loi GEV au débit d'Athiémè.....	49

Introduction Générale

1. Contexte et justification

Après l'inondation mondial appelée déluge, les hommes à la surface de la terre n'échappent plus à ce phénomène naturel dévastateur causé par plusieurs raisons à l'échelle planétaire.

« Le continent africain n'est pas en marge de ce phénomène qui s'amplifie avec la croissance démographique, l'urbanisation incontrôlée et galopante, l'imperméabilisation du sol, etc. Ainsi, dans les années 2007 à 2010, les pays africains comme le Benin, le Togo, le Niger, le Burkina, le Sénégal, ont connu de graves inondations. En Afrique tropicale et dans le golfe de Guinée en particulier, les événements hydro climatiques extrêmes tels que les précipitations violentes, les inondations et les sécheresses ne sont pas sans conséquence sur la population et son environnement socioéconomique » (Amoussou et al 2014).

La mise en évidence du rôle capital de la distribution des pluies dans l'identification et la classification des types de climats aux basses latitudes, ont permis de relever dans la basse vallée du fleuve Mono des éléments probants justificatifs des pluies diluviennes. Parmi ceux-ci figurent la variation spatio-temporelle des précipitations, la distribution fréquentielle des hauteurs de pluies en régimes bimodal et monomodal dont dépend le régime hydrologique du cours d'eau. Dans la basse vallée du Mono, en aval du barrage hydroélectrique de Nangbéto, en périodes de hautes eaux, la survenue des inondations affecte sévèrement les conditions de vie des localités riveraines vulnérables des préfectures de Yoto, du Bas-Mono, des Lacs au Togo et des départements du Couffo et du Mono au Bénin. (Klassou, 1996)

Les inondations par débordement peuvent subvenir sans qu'il y ait un fort évènement pluvieux dans la basse vallée du Mono. Les inondations par ruissellement et celles par débordement sont les plus dévastatrices, qui causent

plus de dégâts dans la basse vallée du Mono. La forte croissance de la population dans les communes riveraines (Aplahoué, Athiémè et Grand Popo) constitue un risque de survenance et d'exposition d'importants enjeux aux inondations. L'évolution horizontale des villes le long des berges du fleuve restent la toute première conséquence de cette croissance. Elle sera source dans un avenir proche des inondations répétées par débordement. Un type d'inondation qui ne laisse rien sur son passage. (Gbèyétin, 2014). En nous mettant dans le même contexte que ces auteurs, nous notons que l'inondation est l'un des grands fléaux qui menacent la vie des humains en générale et dans la basse vallée du mono en particulier. Quelles sont les caractéristiques des extrêmes pluviométriques et hydrométriques dans la zone d'étude ? Quelles sont les meilleures lois qui s'ajustement aux extrêmes pluviométriques et hydrométriques de la zone d'étude ? Quels sont les moyens développés par les communautés de cette basse vallée du Mono pour s'adapter aux inondations ? Ces moyens sont-ils efficace ? Telles sont les questions qui se posent à nous dans le cadre de notre présente étude.

1. But de la recherche

Le but principal de ce travail est de contribuer à une meilleure gestion des inondations dans la basse vallée du Mono en mettant à la disposition des ingénieurs, praticiens et décideurs des informations sur les extrêmes pluviométriques et hydrométriques leur permettant d'anticiper sur leurs apparitions futures.

2. Objectif du mémoire

2.1. Objectif Général

L'objectif général de cette étude est de faire une analyse fréquentielle des extrêmes pluviométriques et hydrométriques dans la basse vallée du Mono

2.2. Objectifs Spécifiques

Spécifiquement, il s'agira de:

- Caractériser les extrêmes pluviométriques et débits dans la zone d'étude ;
- Identifier les meilleures lois d'ajustement aux extrêmes pluviométriques et hydrométriques de la zone d'étude ;
- Connaitre les conséquences et stratégies d'adaptation des communautés riveraines face aux extrêmes pluviométriques et hydrométriques.

3. Hypothèse de travail

En lien avec les objectifs de notre travail, les hypothèses suivantes sont formulées :

- Les séries pluviométriques et de débits vérifient les tests d'hypothèses (condition nécessaire pour l'ajustement aux lois de valeurs extrêmes)
- L'ajustement des lois extrêmes est spécifiques (varient d'une station à une autre) dans notre zone d'étude
- Les stratégies adoptées par les populations ne les préservent pas des risques.

4. Grande division du mémoire

En dehors, d'une introduction générale et d'une conclusion et des perspectives qui se situent respectivement en début du document et à la fin du document, le document comporte trois chapitres :

- chapitre1 Clarification conceptuelle et état de l'art

- Chapitre 2 constitué des données, matériels et méthodes ;
- chapitre 3 résultats et discussions.

Chapitre 1 : Clarification conceptuelle et état de l'art

1.1. Introduction

Cette partie de notre travail consiste à élaborer une définition détaillée et illustrée de certains mots de notre mémoire d'une part et un recueil d'information sur les auteurs ayant fait l'analyse fréquentielle et les lois extrêmes fréquemment utilisées en hydrologie

1.2. Clarification conceptuelle

Dans le but de rendre claire la lecture du document, certains mots et expressions ont besoin d'être clarifiés.

- ***Analyse fréquentielle***

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique qui a comme objectif principal d'utiliser des mesures d'événements passés, caractéristiques d'un processus donné (les précipitations par exemple) pour estimer les probabilités futures d'occurrence (Koudamilo et al, 2017; Meylan et Musy, 1999; St-hilaire, 2007).

En effet, l'étude des phénomènes climatiques et hydrologiques est une tâche assez délicate du fait des fluctuations saisonnières et interannuelles qu'elles peuvent revêtir. Ces phénomènes sont complexes et dépendent d'un certain nombre de paramètres climatiques aléatoires tels que les précipitations (Grimaldi et al, 2011; Koumassi et al, 2014; Ousmane, 1992). La complexité des mécanismes ou processus physiques mis en jeu fait qu'il est très difficile d'étudier ces phénomènes de façon purement hydrodynamique. C'est ainsi que l'approche statistique a été envisagée en vue de répondre à des questions de prévisions et de dimensionnement d'ouvrages hydrauliques (Bois et Obled, 2007; Grimaldi et al,

2011). Cette application de la statistique aux données hydrologiques permet entre autres de trouver un modèle de fréquence des hauteurs de pluies journalières grâce à l'analyse fréquentielle. Ainsi, l'analyse fréquentielle est un des outils de base de l'analyse de l'occurrence d'évènements extrêmes. Elle consiste à rechercher une loi de probabilité qui s'ajuste le mieux aux valeurs observées de la variable aléatoire "pluie maximale journalière" après comparaison de différentes lois de probabilités et méthodes d'estimation à l'aide de tests d'adéquation (Habibi et al. 2013).

- ***Extrêmes pluviométriques***

Il n'y a pas de définition unique de ce qui constitue un événement extrême. Les extrêmes peuvent être quantifiés entre autres sur la base de :

- leur rareté, ce qui implique des notions de fréquence d'occurrence ;
- leur intensité, ce qui implique des notions de dépassement de seuil ; et
- les impacts qu'ils exercent sur les secteurs environnementaux ou économiques, en termes de coûts ou de dégâts par exemple.

La définition appropriée ne peut être choisie qu'en fonction du contexte dans lequel se situe l'étude (Beniston et al, 2004). Un événement climatique extrême est un événement exceptionnel par les valeurs inhabituelles atteintes par un ou plusieurs paramètres (température, force du vent, pluie...) sur un territoire donné (Décamps, 2010). Les événements extrêmes peuvent être considérés comme des maximums observés parmi un ensemble assez large d'événements indépendants (par exemple les débits maximums de rivières et les précipitations maximales observées dans un intervalle de temps donné) (Perreault et al, 1992). Les valeurs extrêmes sont des valeurs maximales ou minimales sélectionnées dans un ensemble de données (Grimaldi et al, 2011)

Mais dans le cadre de cette recherche, nous avons tenu compte uniquement des données maximales.

Ainsi, pour cette étude, il est considéré comme extrêmes pluviométriques et hydrométriques les maximas annuels de pluies et de débits journaliers.

- ***Lois de valeurs extrêmes***

En statistique, une loi de probabilité décrit le comportement aléatoire d'un phénomène dépendant du hasard. Il existe plusieurs lois de probabilité mais certaines en particulier permettent de représenter des phénomènes de valeurs extrêmes (minimum ou maximum). Ce sont les lois de valeur extrêmes. Voici quelques-unes utilisées en hydrologie : la famille des lois d'extrémum généralisée qui comprend la loi Gumbel, la loi de Fréchet et la loi de Weibull (respectivement lois d'extrémum de type I, II et III), la loi de Galton, la loi exponentielle, la loi Pearson type III et la loi log Pearson type III (Grimaldi et al, 2011).

- ***Périodes de retour***

On définit la période de retour T comme étant l'intervalle de temps moyen entre deux événements, dont l'intensité atteint ou dépasse un certain seuil « s ». Cela veut dire que sur un intervalle de temps T , il y a en moyenne un événement d'intensité supérieure ou égale à « s ». T est compté dans une unité de temps arbitraire ; en hydrologie c'est le plus souvent l'année. On cherche à savoir la probabilité pour qu'un événement pluvieux (par exemple une hauteur, une durée ou intensité de pluie) soit atteint ou dépassée. Si par exemple on considère l'intensité de pluie i . Le temps de retour T d'un événement est l'inverse de la fréquence d'apparition de cet événement. (Defrance, 2009 in Hamzaoui, 2016)

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

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

Avec T : temps de retour, i : une variable aléatoire,

$F(\mathbf{x}_i)$: La probabilité appelée fréquence de non dépassement ;

$F(\mathbf{x}_i) = p(i \leq x_i)$ et $1 - F(\mathbf{x}_i)$: est la fréquence d'apparition (ou de non dépassement) donnée par complément de **$F(\mathbf{x}_i)$** à l'unité.

- **Quantiles de pluie**

Gardes (2017) donne la définition qui suit.

Soit F une fonction de répartition. Le quantile d'ordre α de la fonction de répartition F est défini pour $\alpha \in [0, 1]$ par l'équation 3. La fonction quantile correspond donc à l'inverse généralisée de la fonction de répartition F au point α

$$F^{-1}(\alpha) = \inf\{x | F(x) \geq \alpha\} \quad (3)$$

On appellera quantile d'ordre α la quantité suivante (Equation4)

$$q(\alpha) = F^{-1}(1 - \alpha) = \inf\{x | \bar{F}(x) \geq \alpha\} \quad (4)$$

Avec $\bar{F} = 1 - F$

Les quantiles d'une variable aléatoire uni variée sont les valeurs que prenne la variable pour des valeurs de probabilité. Ainsi, les quantiles de pluie sont les hauteurs de pluie qui correspondent à des valeurs de probabilité ou de période de retour donnée.

- **L'inondation**

L'inondation est une submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors de l'eau.

- **Le risque d'inondation**

Le risque d'inondation est la confrontation en un même lieu géographique d'un aléa (une inondation potentiellement dangereuse) avec des enjeux (humains, économiques, ou environnementaux) susceptibles de subir des dommages ou des préjudices. (Gbèyétin, 2014)

- **Localités Riveraines**

Les localités Riveraines sont l'ensemble des personnes qui habitent le long d'un cours d'eau, d'un lac, d'un fleuve, d'une ressource en Eau de surface.

- ***Fleuve***

Le fleuve est un cours d'eau important (remarquable par le nombre de ses affluents, l'importance de son débit, la longueur de son cours) qui se jette dans la mer

- ***Basse Vallée***

La basse vallée est un espace géographique caractérisé par les plaines, l'humidité et susceptible d'être inondée.

1.3. Synthèse bibliographique

Notre synthèse consistera à situer l'état des connaissances sur l'analyse fréquentielle et en matière des lois extrêmes fréquemment utilisés en hydrologie.

1.3.1. Analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle est de nos jours une méthode classique pour l'étude des précipitations comme le témoignent les études sur les pluies extrêmes menées à travers le monde. Par exemple, une analyse statistique de séries annuelles de pluies maximales journalières a été réalisée sur les données de 47 stations météorologiques situées dans le bassin du Guadalhorce en Espagne (Ferrer, 1992). Au Canada, St-hilaire (2007) a effectué l'analyse fréquentielle des données de

pluies maximales horaires d'une station couvrant la période 1964-2006. Aussi, Goubanova et Li (2007) ont estimé les pluies extrêmes sur le bassin Méditerranéen à partir de la loi GEV (Generalized Extreme Value). En France, les valeurs extrêmes de précipitations ont été estimées pour diverses périodes de retour à partir de la loi Gumbel et la loi GEV (Baillon, 2008).

En Afrique, une étude d'ajustement statistique des échantillons de pluies sur le bassin versant de la Falémé au Sénégal a été effectuée par Ousmane (1992). En Côte d'Ivoire, Goula Bi Tie et al. (2010) ont estimé des pluies exceptionnelles par comparaison des lois log normale et Gumbel à partir de l'analyse des pluies maximales journalières annuelles de 34 postes pluviométriques sur la période 1947-1995. En Algérie, une analyse fréquentielle de séries annuelles de pluies maximales journalières a été réalisée sur les données de 27 stations pluviométriques du bassin du Chott Chergui par Habibi et al, 2013). Aussi dans le Nord-Ouest du pays, l'analyse fréquentielle des données climatiques extrêmes a été effectuée par Kouidri et al. (2014). Toujours en Algérie, Hamzaoui (2016) a effectué une modélisation des courbes IDF (Intensité-Durée Fréquence) suite à une étude fréquentielle qui a permis d'estimer les quantiles de pluie extrêmes. Les quantiles de pluies extrêmes ont également été estimés suite à l'analyse fréquentielle des séries annuelles de pluies maximales journalières sur le bassin versant de la rivière Bia en Côte d'Ivoire (Kouassi et al. 2018)

Au Bénin, Koumassi et al. (2014) ont effectué une analyse fréquentielle des pluies maximales journalières sur le bassin versant de la Sota couvrant la période 1965-2008. Il ressort de cette étude que les pluies extrêmes ont tendance à mieux s'ajuster à la loi de Gumbel et la loi log Pearson Type III dans cette région. Amoussou et al. (2014) quant à eux, ont analysé les maximas annuels de pluie en 24 heures de trente-quatre stations qui sont réparties dans le bassin du Mono et sa proche périphérie sur la période de 1988 à 2010. Il a été retenu que l'ajustement de la loi GEV de type Weibull est bien adapté pour la simulation des événements

pluvieux extrêmes. Le bassin de l'Ouémé a fait objet de plusieurs travaux. En effet, Avahounlin et al. (2013) ont effectué l'analyse fréquentielle des séries de maximums annuels de pluies journalières de 18 postes pluviométriques couvrant la période 1960-2010. La distribution de Gumbel a été la plus représentée suivie de celle Log normale. Aussi, Bacharou et al. (2013a, 2015b) ont estimé des pluies exceptionnelles journalières sur le bassin versant de l'Ouémé à partir de l'analyse fréquentielle. Il a été montré, en appliquant différents tests statistiques, que pour les valeurs maximales annuelles des précipitations journalières, la loi GEV conviendrait mieux pour le Sud et la loi de Gumbel pour le nord du bassin. Koudamiloro et al. (2017) ont quant à eux effectué leur étude sur le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou sur la période de 1965 à 2012 et la distribution qui a été retenue est celle de Gumbel. Plus récemment, l'analyse fréquentielle des événements pluvieux extrêmes associés aux inondations dans le bassin-versant de l'Ouémé a été effectuée par Kodja (2018). Il a été retenu la loi de GEV au sud du bassin, et la loi Pearson III au centre et au nord. Ague et Afouda (2015) ont estimé sur la base de l'analyse fréquentielle, les maximas annuels pluies journalières de 35 stations répartis sur tout le Bénin sur la période de 1921 à 2001.

Dans cette étude, l'ajustement a été effectué suivant 4 lois statistiques : GEV, Gumbel, Log normale, Pearson type III et Log-normale à trois paramètres. Il en résulte que malgré la dominance des lois Gumbel et Log normale, les autres lois admettent également des zones de validité

On remarque que la plupart des travaux ont été effectués ne concerne pas notre zone d'étude. Quant aux travaux effectués sur notre zone d'étude, notons que celui d'Amoussou et al. (2014) quant à eux, ont analysé les maximas annuels de pluie en 24 heures de trente-quatre stations qui sont réparties dans le bassin du Mono et sa proche périphérie sur la période de 1988 à 2010. Il a été retenu que l'ajustement de la loi GEV de type Weibull est bien adapté pour la simulation des événements pluvieux extrême. Leur étude portait sur tout le bassin du Mono et

aussi les données utilisées lors de leur étude n'a donc pas pris en compte les données de pluies de la dernière décennie. Nous ne sommes pas sans savoir qu'après l'évènement de 2010 les inondations n'ont pas cessé de perturber les habitants du bassin surtout ceux de la basse vallée. C'est là les points qui font notre intérêt à ladite zone dans le cadre de la présente étude que nous effectuerons dans le but de compléter les travaux existants été effectuée afin de compléter les travaux existants.

1.3.2. Lois de valeurs extrêmes utilisées en hydrologie

La validité de l'analyse fréquentielle repose sur bien d'avantage sur la pertinence de la loi choisie que la technique numérique d'ajustement utilisée (Meylan et Musy, 1999). Pour le choix de la loi, les auteurs se servent des considérations théoriques, du comportement asymptotique des distributions, de la coutume et de l'expérience, des tests d'adéquations, de l'approche régionale, etc. Toutes ces pistes peuvent contribuer à faciliter ce choix mais il n'existe malheureusement pas de méthode universelle et infaillible. En hydrologie, plusieurs lois statistiques sont utilisées pour l'analyse fréquentielle. L'étude statistique des valeurs extrêmes a été menée de façon conventionnelle pendant longtemps qu'à l'aide de la loi de Gumbel. C'est le cas des études menées par Koudamilo et al. (2017) sur le bassin de l'Ouémé à la station de Bétérou et Koumassi et al. (2014) sur le bassin de la Sota à la station de Coubéri. En effet, la manipulation mathématique de la distribution de Gumbel (deux paramètres) est beaucoup plus simple que celle des lois à trois paramètres. Cependant, plusieurs auteurs dont Koutsoyiannis, (2004a) ont remis en question le comportement asymptotique exponentiel de la loi de Gumbel et montré que cette loi sous-estime les plus grandes valeurs extrêmes. Cette hypothèse est confirmée par l'étude de Koutsoyiannis (2004b) sur 169 stations comportant chacune 100-154 ans d'observations situées aux Etats-Unis, en Grande- Bretagne et dans le Sud de la France. Il conseille donc d'utiliser la distribution GEV « Generalized Extreme Value » à trois paramètres. Cette loi a

été reconnue par d'autres auteurs comme étant bien adaptée pour la simulation des événements pluvieux extrêmes (Amoussou et al. (2014); Habibi et al. (2013); Hamzaoui, 2016). St-hilaire, (2007) a utilisé les lois log-normale à deux paramètres, GEV et log-normale à trois paramètres pour l'analyse de données de hauteur de pluie totale de durée 1 h, 2 h, 4 h, 6 h et 24 h sur une période de 43 années de Juin à Septembre à la station d'Assomption au Québec. La loi retenue était la loi GEV. D'après Meylan et Musy (1999), la loi log-normale est jugée très utile en Hydrologie. Ague et Afouda (2015) ont utilisé les cinq lois statistiques suivantes : GEV, Gumbel, Log normale, Pearson type III et Log Pearson type III et ont observé une dominance des lois Gumbel et Log normale.

On remarque que les résultats de ces différents travaux varient d'une série d'étude à une autre. Ainsi nous nous proposons de prendre en compte dans cette étude, les lois extrêmes suivante : la loi Log normal, Gumbel, GEV, Pearson III et Log normale à trois paramètres.

1.4. Conclusion partielle

Le chapitre a résumé la clarification des termes importants de notre travail ainsi que les lois extrêmes de l'analyse fréquentielle. De tout cela, nous avons ressorti les lois prises en compte dans notre travail.

Chapitre 2 : Données, Matériels et Méthodes

2.1. Introduction

Le chapitre 2 présente la zone d'étude, les données et matériaux utilisés, et la méthodologie suivie pour le travail. La bonne connaissance du milieu d'étude facilite la compréhension de l'étude car cette connaissance permet de bien interpréter les résultats de l'étude et d'établir les relations de cause à effet

2.2. Milieu d'étude

Dans cette section est présentée la zone d'étude, sa localisation géographique, son relief, son sol et sa végétation, le climat et hydrographie, l'aspect socio-économique et la population.

2.2.1. Localisation

Située entre les parallèles 6° 25' et 7° 75' de Latitude Nord et le méridien 1°03' et 2°25' de Longitude Est, au Sud -Ouest du Bénin, la basse vallée du Mono est à l'interface de deux systèmes hydrologiques marin et fluvial. Elle reçoit en aval les apports liquide de la mer et en amont ceux du fleuve Mono (Amoussou, 2010). Les limites de la basse vallée sont modifiées suite à la dégradation des berges du fleuve Mono. La figure ci-contre nous présente la situation géographique de la basse vallée du Mono.

Analyse fréquentielle des pluies et débits extrêmes à l'origine des inondations dans la basse vallée du Mono

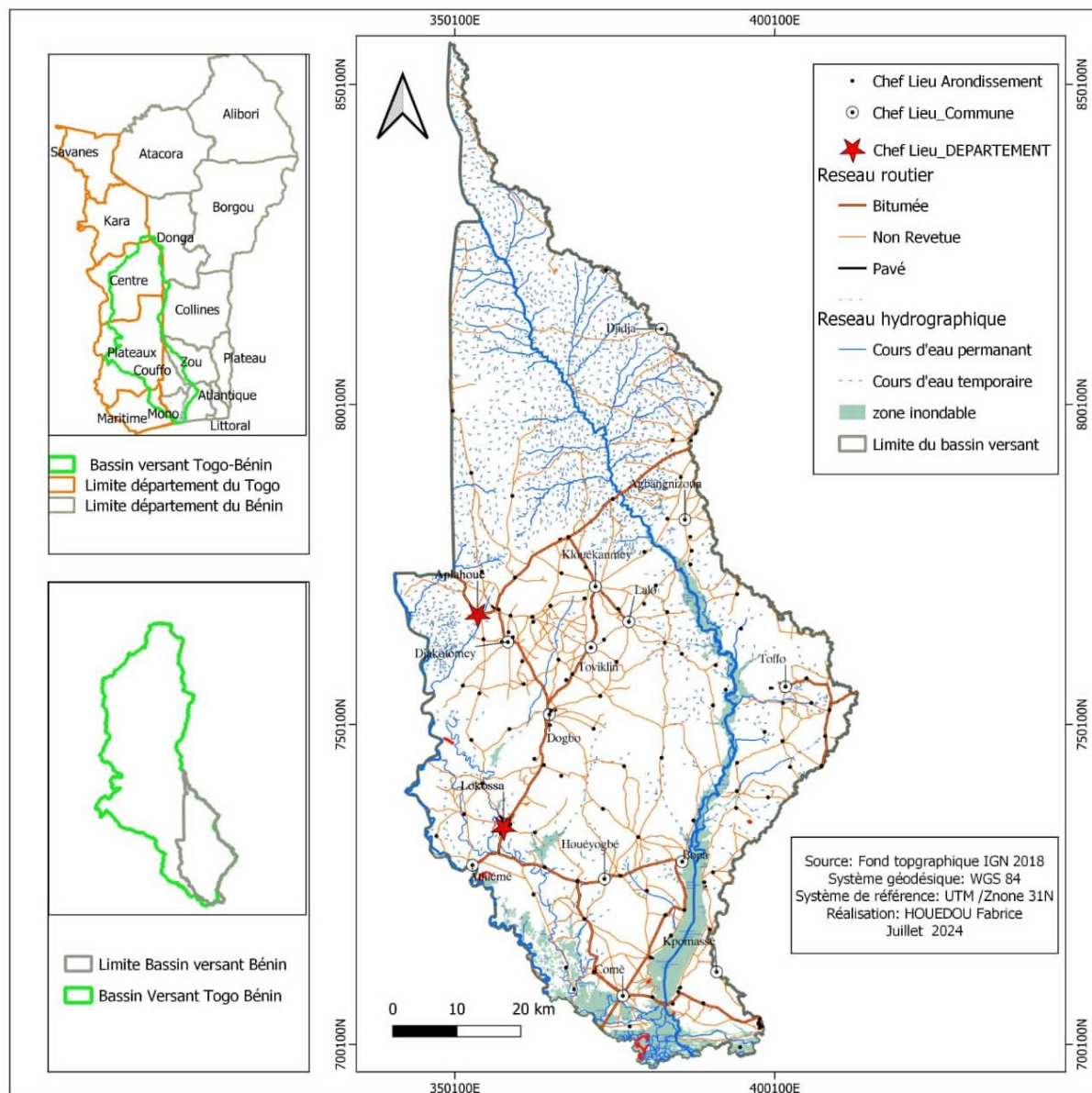


Figure 1 : Carte de la basse vallée du mono

2.2.2. Relief

La basse vallée du Mono est une surface relativement plane. Elle se présente comme une large plaine d'inondation où émergent quelques élévations de surface dont les plus hautes se situent à 10 mètres au-dessus du niveau de la mer (Antheaume, 1978).

Au Sud, on observe un ensemble de cordons littoraux dont l'âge décroît à mesure que l'on approche l'Océan, et dont la largeur croît régulièrement d'Ouest en Est.

Ces cordons isolent derrière eux un système lagunaire dont la profondeur dépasse rarement 3mètres et parallèle à la côte puis communiquant avec la mer par les embouchures. Ainsi, la basse vallée se présente comme « une vallée large ayant les caractères d'une plaine deltaïque qui se remanie sans cesse » (Mondjannagni, 1977).

Il y a une phase de sédimentation jalonnée alternativement de transgression et de régressions dont les plus citées est la régression pré flandrienne et la transgression flandrienne seraient à l'origine de la formation de cette vaste plaine dominée par des dépressions et des marécages (Antheaume, 1978). Ainsi, la dynamique morpho -climatique a abouti tour à tour à l'installation des vallées des cours d'eau actuels et des dépressions, la formation des rias ; la submersion des bas plateaux côtiers et la régularisation de la ligne de côte avec ses cordons et lagunes.

Ce phénomène s'est déroulé entre le Maestrichtien et l'holocène récent. Le modelé actuel est le résultat d'une suite d'accumulation et de remaniement permanent par les agents d'érosion que sont les courants fluviaux, marins et météorologiques ainsi que les actions anthropiques. Ainsi donc, à l'aval de la basse vallée, la morphologie actuelle résulte du remblaiement alluvial de l'ancienne ria par suite de la transgression flandrienne. Alors qu'à partir de la commune de Grand Popo à l'embouchure, on est dans un milieu fluviomarin typique où se confondent les actions fluviales et les actions marines (PNUD-LCHF, 1987).

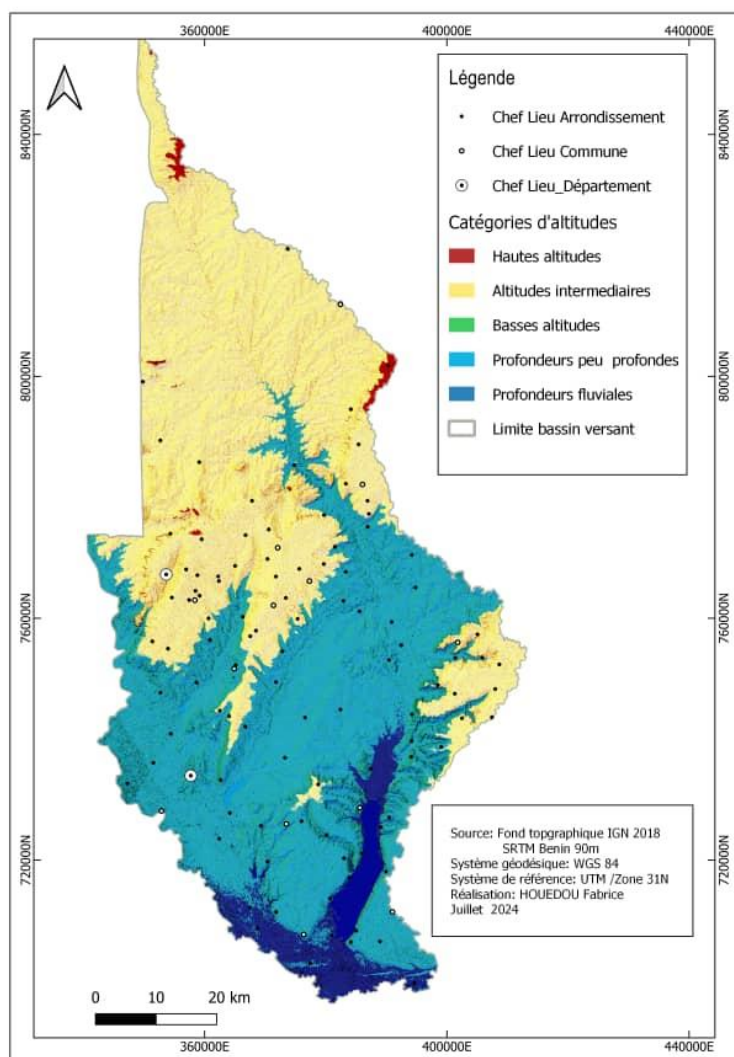


Figure 2 carte relief

2.2.3. Sol et Végétation

La basse vallée du Mono est couverte de formations végétales dont la savane herbeuse, les formations marécageuses et quelques mangroves. La végétation est dominée par le palmier à huile et les graminées mais compte également quelques reliques de forêts galeries. Les sols sont de type alluvial et colluvial des vallées des fleuves et lacs plus ou moins hydromorphes, très riches en matière organique, très fertiles mais inondés de façon saisonnière par les crues du fleuve Mono. Les sédiments sont dans l'ensemble fins; les sables et graviers sont observés dans les chenaux, les limons et vases dans les dépressions et plaines d'inondation. On y

rencontre également des sols de type sableux, peu fertiles et aptes aux cocotiers (Gbèyétin,2014).

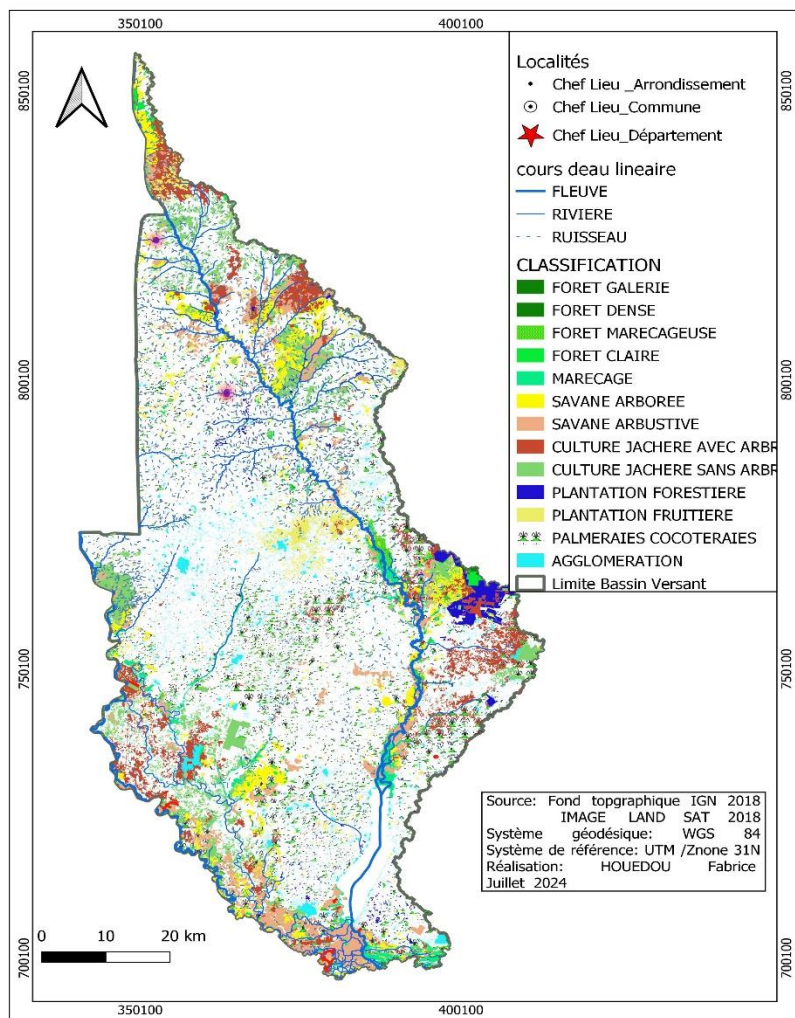


Figure 3 : Occupation du sol dans la zone d'étude

2.2.4. Climat et Hydrographie

Dans la vallée alluviale, il existe un réseau hydrographique dégradé et complexe, avec la présence de mares et de lacs à sa périphérie (lacs de Togbadji et Toho). Seule, la Sazué (63 km) est bien marquée. Elle est formée par la réunion de deux affluents : la Dévédo (22 km) et la Savédo (40 km) (Daïnou, 2000). La basse vallée du Mono est caractérisée par un réseau de chenaux longitudinaux et

Analyse fréquentielle des pluies et débits extrêmes à l'origine des inondations dans la basse vallée du Mono

latéraux bien limités par des bourrelets de berges. Les lits ont une profondeur comprise entre 5 et 7m3 (UICN, 2006). On observe également dans la vallée, une multitude de terrasses fluviales et fluviomarines, ainsi que des dépressions lacustres.

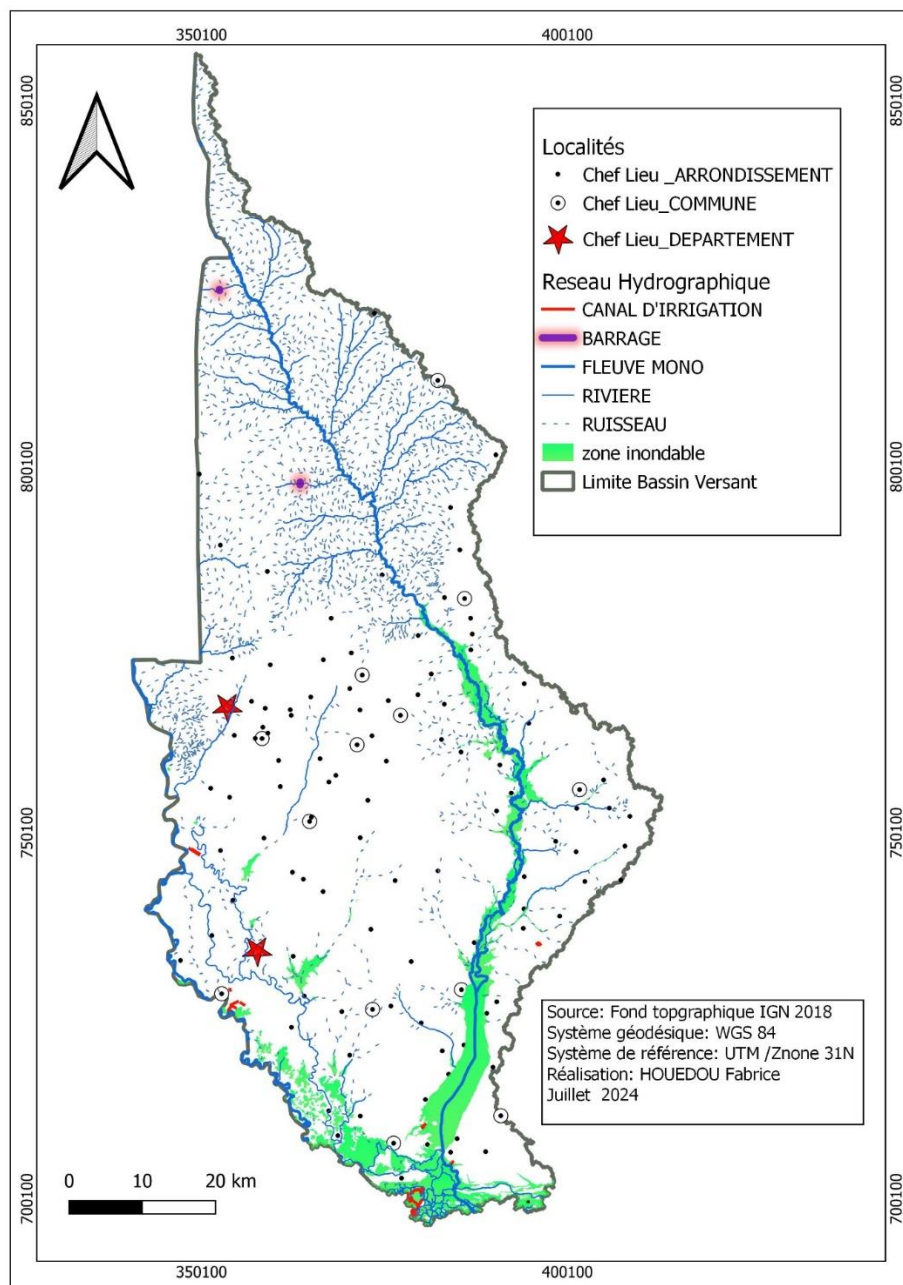


Figure 4: Carte hydrographique de la zone d'étude

2.2.5. Aspect Socio-économique et populations

La basse vallée du Mono couvre dans la partie Bénin les départements du Couffo et du Mono. Selon les données du recensement de la population béninoise de 2013 (RPGH4) élaboré par l'INSAE nous remarquons une croissance démographique soit le double de la population du Mono (281245-497 243 ; de 1992 à 2013) et le triple de la population du Couffo (395132-745328). La croissance démographique, l'évolution horizontale des villes, le manque d'un système urbain de drainage des eaux de pluies, les comblements des marécages et l'ouverture de nouvelles pistes ou dessertes rurales après recharge des espaces humides sont les facteurs humains responsable de la survenance des inondations dans la basse vallée du Mono.

La basse vallée du Mono est essentiellement peuplée d'Ouatchi, Kotafon, Aïzo, Adja, Mina, Xla et quelques étrangers minoritaires comme les Yoruba et Nago

Les activités principales sont l'agriculture, la pêche, l'élevage, la transformation des produits agricoles, l'artisanat et le commerce. On y pratique du petit élevage, une intense activité de commercialisation des produits agricoles, des activités artisanales de transformation des produits agricoles (Guédessou, 2009). En effet, le système de production agricole est essentiellement basé sur la culture du maïs en tête de rotation, le manioc et le maraîchage. Les activités dominantes sont la production du manioc, du riz et du maïs. Pour la contre saison on observe des cultures vivrières et maraîchères telles la tomate, le piment, et les légumes feuilles et enfin la production de manioc en association avec le maïs. La pêche maritime, artisanale et continentale, la pisciculture en enclos ou en étang, le petit élevage, la porciculture, l'aulacodiculture, la commercialisation des produits agricoles et l'artisanat sont autant d'activités qui occupent les populations dans le département.

L'agriculture pluviale reste la principale activité dans le bassin-versant. Elle occupe en effet 77 % des ménages. Ce pourcentage varie de 68 % chez les populations à meilleur revenu à 93 % chez les populations pauvres (Amoussou, 2010) au Bénin. Elle est développée dans toute la basse vallée du bassin versant et les techniques culturales utilisées sont essentiellement traditionnelles. Au fil

Analyse fréquentielle des pluies et débits extrêmes à l'origine des inondations dans la basse vallée du Mono

des années, on assiste à l'extension des superficies emblavées sans que n'augmente la productivité. Notons aussi quelques projets agricoles modernes qui ont permis l'exploitation des eaux du fleuve Mono pour l'agriculture : l'irrigation. C'est le cas du périmètre rizicole de Dédé sur la rive Est du fleuve Mono qui couvre une superficie de près de 150 ha sur les 1 870 ha initialement prévus (CEB, 1992). À ce périmètre s'ajoute celui de Kpinnou sur lequel on a développé aussi l'élevage et la pisciculture. Avec l'appui du Projet d'aménagement hydro-agricole de la Basse Vallée du fleuve Mono (PBVM) deux périmètres irrigués ont été aménagés et sont irrigués par pompage à partir du fleuve Mono sur une superficie totale de 585,5 ha dont 395 ha pour la riziculture (MAPAH, 2018).

2.3. Données utilisées

- Données pluviométriques aux stations d'Aplahoué d'Athiémè et de Lokossa (1980 à 2017) et celles de débit de la station d'Athiémè (1950 à 2011) à la météo Bénin

Tableau 1 : Série Pluviométriques utilisé

Données de pluies	Stations	Type de station	Longitude(°)	Latitude(°)	Période	Nombres d'année
	Aplahoué	Pluvio-métrique	1.666667	6.916667	1980-2017	37
	Athiémè	Hydro-métrique	1.60583	6.895321	1998-2017	19
	Lokossa	Pluvio-métrique	1.716667	6.633333	1980-2017	37
Données de débit	Athiémè	Hydro-métrique	1.60583	6.895321	1950-2011	61

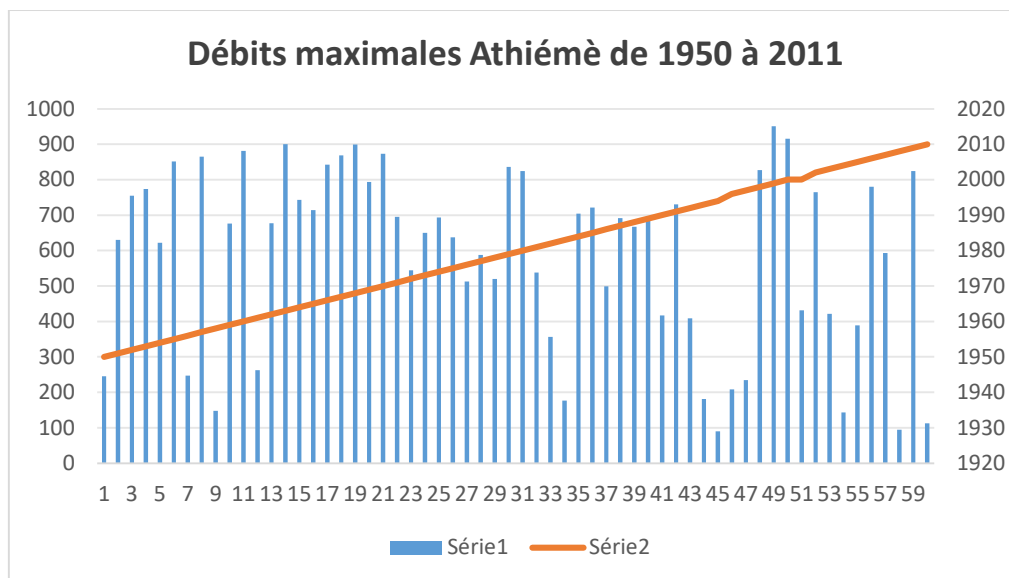


Figure 5 Débits maximaux journaliers à Athiémè de 1950 à 2011

2.4. Matériels utilisés

Comme matériel informatique, un ordinateur a été utilisé avec les logiciels suivants :

- HYFRAN: HYdrological FREquency ANalysis.

Ce logiciel a été conçu pour l'analyse fréquentielle en hydrologie particulièrement pour les valeurs extrêmes. Il est conçu de façon à simplifier les tâches liées à l'ajustement d'une distribution statistique à un échantillon aléatoire. Cependant, il peut être utilisé pour n'importe quelle série de valeurs extrêmes dans d'autres domaines avec différents pas de temps, à conditions que les observations soient indépendantes, stationnaires et homogènes (El Adlouni et Bobée, 2014)

- Microsoft Word 2013 pour rédiger le document de mémoire ;
- Microsoft Excel 2013 pour le comblement des données ;
- Le GoogleScolar pour les recherches sur l'internet et le téléchargement des photos et documents

2.5. Méthodologie

Pour le compte de l'analyse fréquentielle la méthodologie suivante sera adoptée au cours de notre travail

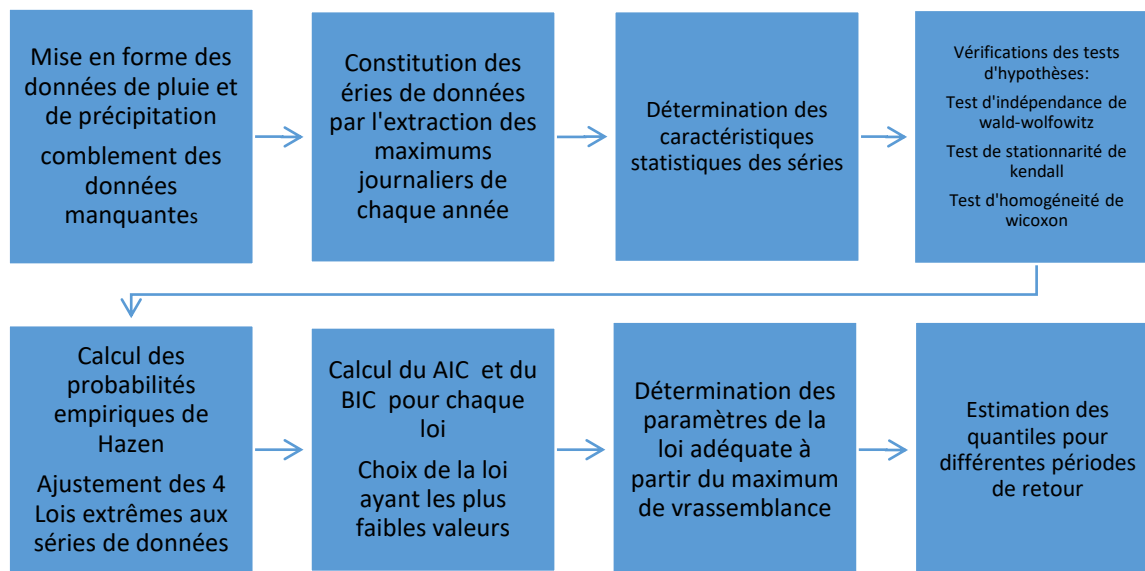


Figure5: Principales étapes de l'analyse fréquentielle

2.5.1. Etape préliminaires

Dans le but d'obtenir les séries de données utilisées dans cette étude nous avons pris par certaines étapes, ce sont les étapes préliminaires qui consistent à la collecte et mise en forme de données de pluies de débits journaliers.

2.5.1.1. Collecte des données

Elle regroupe la recherche documentaire et la collecte des données hydrométriques et pluviométrique de certaines stations installées dans notre zone d'étude à l'Agence Météo-Bénin et à la DG-Eau.

2.5.1.2. Contrôle de la qualité des données

Dans toute analyse statistique, la pertinence des résultats dépend en premièrement de la qualité des données disponibles. C'est dans cette optique que nous avons minutieusement traitées les données hydrométriques collectées.

2.5.2. Etude statistique de base des données (Caractérisation des extrêmes pluviométriques dans la zone d'étude)

Il s'agit de déterminer quelques caractéristiques statistiques de l'échantillon (moyenne, minimum, maximum, écart-type, médiane, coefficient de variation, coefficient d'asymétrie, coefficient d'aplatissement).

- *Moyenne arithmétique*

La moyenne est le premier moment centré par rapport à l'origine. C'est la mesure de tendance centrale la plus utilisée (Meylan et Musy, 1999). La moyenne arithmétique est calculée par la relation suivante :

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Ri \quad (4)$$

Avec $\bar{R}$: Valeur moyenne Ri : Valeur $\langle i \rangle$ dans la série et N : nombre de grandeur de la série

- *Médiane*

C'est la valeur de la série telle que la moitié des observations lui sont inférieures et la moitié lui est supérieures (Meylan et Musy, 1999).

Pour n impair on a $\tilde{x} = x_{[(n+1)/2]}$ (5)

Pour n pair on a $\tilde{x} = \frac{x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}}{2}$ (6)

Avec $\tilde{x}$ la médiane et n le nombre d'observation de la série

- *Ecart-type*

L'écart-type indique la dispersion des observations autour de la moyenne, c'est le paramètre de la dispersion :

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Xi - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (7)$$

Avec S l'écart-type, $\bar{X}$ la moyenne calculée sur l'échantillon, n le nombre d'observation de l'échantillon

- *Coefficient de variation*

Pour obtenir un nombre indépendant des unités de mesure et permettant de comparer les disparitions dans différents séries hydrologiques, on utilise le coefficient de variation qui est représenté par le rapport entre l'écart-type et la moyenne. Il compare la fluctuation à la valeur moyenne (Bois et Obled, 2007)

$$Cv = \frac{S}{\bar{R}} \quad (8)$$

Avec S l'écart-type et $\bar{R}$ la moyenne

- *Coefficient d'asymétrie*

Ce coefficient est le troisième moment centré autour de la moyenne. Comme son nom l'indique, ce coefficient mesure la symétrie de la distribution par rapport à la moyenne :

$$Cs = \frac{N \sum_{i=1}^n (Xi - \bar{X})^3}{(N-1)(N-2)S^3} \quad (9)$$

Ce coefficient est nul pour une distribution parfaitement symétrique. Il est positif ou négatif en fonction de la position de la moyenne par rapport à la pointe de la distribution.

- *Coefficient d'aplatissement*

$$Ck = \frac{N \sum_{i=1}^n (Xi - \bar{X})^4}{(N-2)S^4} \quad (10)$$

-Si Ck est négatif, la distribution est plus aplatie que la distribution normale ; la distribution est dite platycurtique.

-Si Ck est positif, la distribution est moins aplatie que la distribution normale ; la distribution est dite leptocurtique.

-Si $ck = 0$, l'aplatissement est le même que pour la loi normale et la courbe est dite mésocurtique.

2.5.3. Ajustement de cinq lois de valeurs extrêmes aux extrêmes pluviométriques et choix de la meilleure loi

Cette étape du travail consiste à ajuster 5 lois extrêmes aux séries de données pour choisir la loi qui les représente le mieux. Bien avant cela, il faut que les données à ajuster respectent les hypothèses de base et après l'ajustement, la meilleure loi doit être choisie suivant des critères. Nous présenterons ici ces hypothèses de base, les 5 lois retenus dans le cadre de cette étude et les critères de choix de la meilleure loi.

2.5.3.1. Vérification des hypothèses de base

L'analyse fréquentielle passe en premier lieu par l'appréciation de la qualité des séries à posséder une fonction de distribution en utilisant les tests de stationnarité de Kendall, d'indépendance de Wald-Wolfowitz et d'homogénéité de Wilcoxon (El Adlouni et Bobée, 2014).

En effet, l'application des tests statistiques est une démarche consistant à contrôler la validité d'une hypothèse considérée comme vraie a priori, appelée hypothèse nulle et notée H_0 ; à admettre une hypothèse différente lorsque le contrôle se révèle négatif, appelée hypothèse alternative et notée H_1 . Il existe plusieurs tests statistiques mais certains en particulier permettent de vérifier le caractère aléatoire de l'échantillon : tests de stationnarité, d'indépendance et d'homogénéité. Notons que les résultats de ces tests d'hypothèses sont généralement présentés sous forme de couple (statistique des tests, p-value) ; la p-value étant la probabilité au dépassement de la valeur calculée de la statistique du test que l'on compare ensuite avec le niveau de signification.

- **Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz**

L'indépendance suppose qu'aucune observation dans la série de données n'a d'influence sur les observations suivantes. Même si les événements d'une série sont aléatoires, ils peuvent ne pas être indépendants. La dépendance varie en fonction du pas de temps des éléments successifs de la série : elle sera souvent forte entre les valeurs journalières, alors qu'elle sera généralement faible entre les valeurs maximales annuelles (OMM, 2014). Le test d'indépendance utilisé dans cette étude est celui de Wald-Wolfowitz. Son principe est le suivant : Étant donné un échantillon de taille N ($x_1, \dots, x_N$) le test de Wald-Wolfowitz considère la variable statistique R telle que :

$$R = \sum_{i=1}^{N-1} x_i x_{i+1} + x_1 x_N \quad (11)$$

Lorsque les éléments de l'échantillon sont indépendants, R suit asymptotiquement une distribution normale

- **Test de stationnarité de Mann Kendall**

Une série chronologique est dite stationnaire si ses propriétés sont invariantes dans le temps. Dans leurs documents sur les tests de stationnarité, Faucher et al., (1977) et Ondo et al., (1997) considèrent qu'une série de données est dite stationnaire lorsque l'on ne retrouve pas de variations temporelles significatives autres que les fluctuations aléatoires dans les valeurs classées chronologiquement. La littérature hydrologique s'intéresse plus particulièrement à deux formes de non-stationnarité, les tendances et les ruptures (Fabien, 2002). Le test non-paramétrique de Mann-Kendall quant à lui permet d'étudier la présence ou l'absence de tendance dans une série chronologique donnée. Son principe est le suivant :

Si une série $X_1, X_2, \dots, X_n$, la méthode de Mann-Kendall définit la normale U_{MK} Standard multi variable, encore appelé tau de Kendall comme :

$$U_{MK} = \frac{s}{\sqrt{\text{var}(s)}} \quad (12)$$

$$\text{Avec } S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i), \text{sgn}(x) = \begin{cases} -1, x < 0 \\ 0, x = 0 \\ 1, x > 0 \end{cases} \text{ et}$$

$$\text{Var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{n-1} t_{ij}(i-1)(2i+5)}{18}$$

Dans ce test l'hypothèse nulle H_0 « absence de tendance » est acceptée si la p-value est supérieur à 5%. Le sens de la tendance est défini par le coefficient statistique de Mann-Kendall " UU_{MK} ". La tendance est à la hausse pour " U_{MK} " positif, mais si " U_{MK} " est négatif, alors la tendance est à la baisse. (Agon, 2017)

- **Test de Mann-Whitney (Mann-Whitney test, Wilcoxon (1945))**

Le problème d'homogénéité est le suivant : disposant de plusieurs échantillons distincts et indépendants, on veut savoir s'ils sont tirés de la même population. Ainsi, ce test permet de vérifier que les échantillons sont identiquement distribués ou homogènes (Ondo et al, 1997).

D'après (Grimaldi et al, 2011), le Test de Mann-Whitney est utilisé quand une série de données x_t ($t=1, 2, \dots, n$) peut être divisé en deux segments $x_1; x_2; \dots; x_{n_1}$ et $x_{n_1+1}; x_{n_1+2}; \dots; x_n$ tel que: $n_2 = n - n_1$.

L'hypothèse selon laquelle la moyenne du premier segment est égale à celle du second segment est testée par la formule suivante (Equation 11).

$$uc = \frac{\sum_{t=1}^{n_1} R(x_t) - n_1(n_1+n_2+1)/2}{\left[\frac{n_1 n_2 (n_1+n_2+1)}{12} \right]^{1/2}} \quad (13)$$

Où $R(x_t)$ est le rang de l'observation x_t en ordre de sérié t . L'hypothèse de la même moyenne est rejetée à un niveau de signification α quand $|uc| > u(1-\frac{\alpha}{2})$ quand $u(1-\frac{\alpha}{2})$ est le $1-\frac{\alpha}{2}$ quantile de distribution normale.

2.5.3.2. Ajustement aux 5 lois de valeurs extrêmes

Il s'agit à ce niveau d'ajuster les 5 lois extrêmes choisies aux données de pluie journalière et de débit. Ces lois sont entre autre, Log-normale, Gumbel, GEV, Pearson type III et Log normale à trois paramètres

- Loi log-normale

Encore appelée loi de Galton, la loi log-normale a été obtenue par le changement de variable $Y = g(X)$ dans la loi de Gauss. Cette loi peut avoir trois paramètres mais le type que nous avons utilisé dans cette recherche est la loi log-normale à deux paramètres (le paramètre de position μ et le paramètre d'échelle σ).

- Loi de Gumbel (ou Loi des Valeurs Extrêmes de type I)

C'est une loi très importante, qui sert dans l'analyse fréquentielle des valeurs extrêmes et sera notamment l'ingrédient essentiel, en hydrologie opérationnelle, de la méthode du Gradex pour le calcul des crues de projet. (Bois et Obled, 2007) aux séries chronologiques de valeurs extrêmes dans le cadre de nombreuses études. Selon Koutsoyiannis (2004b), sa simplicité et la facilité à déterminer ses deux paramètres (paramètre de position μ et paramètre d'échelle α) justifient en partie son usage commune.

- GEV

La loi GEV (Generalized Extreme Value) c'est-à-dire loi de Valeur Extrême Généralisée a été proposé par Jenkinson et à l'avantage de combiner les trois types de lois des valeurs extrêmes EV1, EV2 et EV3 développées par Fisher et Tippett. (Perreault et Bobée, 1992). Le type utilisé dans cette étude est EV2 à trois paramètres (paramètre de position μ , paramètre d'échelle α et paramètre de forme κ) qui est souvent utilisée pour modéliser les maxima annuels de pluies journalières. Plusieurs auteurs (Amoussou et al, 2014; Habibi et al, 2013; Hamzaoui, 2016; Koutsoyiannis, 2004b) s'en ont servi pour leurs études.

Des auteurs (Brunet-moret, 1969; Koumassi, Tchibozo, Vissin, et al, 2014) ont montré que la distribution Pearson type pouvait bien prendre en compte des événements hydrologiques. Encore appelée loi Gamma incomplète, la loi de Pearson type III a trois paramètres : un paramètre de position m , un paramètre d'échelle α et un paramètre de forme λ .

- Loi Log normale à trois paramètres

La loi log-normale à trois paramètres est une distribution de probabilité utilisée pour modéliser des données qui suivent une distribution log normale avec les paramètres supplémentaires. Elle est caractérisée par trois paramètres : la moyenne logarithmique (μ), l'écart type logarithmique (σ) et un troisième paramètre (τ) qui permet de modéliser des asymétries ou des queues lourdes dans la distribution

Tableau 2 : Lois statistiques et fonctions de densité de

Lois statistiques	Fonction de densité de probabilité	Paramètres
Log normale	$f(x) = \frac{1}{x\delta\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\delta^2}\right\}$	δ, μ
Gumbel	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x - \mu}{\alpha} - \exp\left(\frac{x - \mu}{\alpha}\right)\right]$	α, μ
GEV	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{\kappa}{\alpha}(x - \mu)\right]^{\frac{1}{\kappa}} \exp\left\{1 - \left[1 - \frac{\kappa}{\alpha}(x - \mu)\right]^{\frac{1}{\kappa}}\right\}$	α, μ, κ
Pearson type II	$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{\Gamma(\lambda)} (x - m)^{\lambda-1} e^{-\alpha(x-m)}$	α, λ, m
Log normale à trois paramètres	$f(x; \mu; \tau) \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \frac{1}{\sigma} \phi\left(\tau \frac{\ln(X)-\mu}{\sigma}\right)$	σ, μ, τ

2.5.3.3. Choix de la meilleure distribution

Bertrand et Maumy (2008) ont énuméré plusieurs critères permettant la comparaison entre différentes lois pour en choisir celle qui s'ajuste au mieux à la série étudiée. Il s'agit du coefficient de détermination (R^2), le coefficient de détermination ajusté (R^2), les critères Critère d'Information d'Akaike (AIC) et le critère d'Information Bayésien (BIC). Habibi et al. (2013) dans leurs travaux portant sur l'analyse fréquentielle, ont choisi la meilleure distribution sur la base du critère visuel graphique et du test de khi- deux. (Ague et Afouda, 2015; Ague, 2015; Hounkpè et al. 2015) quant à eux, ont sélectionné la meilleure distribution en comparant les critères AIC et BIC des lois testées. Le critère AIC a été introduit pour retenir des variables pertinentes lors de prévisions, alors que le critère BIC vise la sélection de variables statistiquement significative dans le modèle (Bertrand et Maumy, 2008). Comme ces auteurs, le choix de la meilleure distribution dans cette étude a été effectué sur la base de ces deux critères (AIC et BIC). Ces deux critères permettent de choisir la loi la mieux ajustée en tenant compte de l'erreur d'estimation et du nombre de paramètres à ajuster. La distribution pour laquelle les valeurs des deux critères sont les plus faibles est celle qui est sélectionnée (St-hilaire, 2007).

- *Le critère d'information Akaike (AIC)*

L'AIC représente donc un compromis entre le biais, diminuant avec le nombre de paramètres, et la parcimonie, volonté de décrire les données avec le plus petit nombre de paramètres possibles (Bertrand et Maumy, 2008) L'expression de ce critère est la suivante

$$AIC = -2 \log (L) + 2 K \quad (14)$$

Avec **L** : la vraisemblance et **K** : nombre de paramètres dans le modèle

- *Le critère d'information bayésien (BIC)*

Le critère BIC se place dans un contexte bayésien de sélection de modèles et est une approximation du calcul de la vraisemblance des données conditionnellement au modèle fixé. Il est plus parcimonieux que le critère AIC puisqu'il pénalise plus le nombre de variables présentes dans le modèle. (Lebarbier et Mary-Huard, 2006). Bertrand et Maumy (2008) soulignent que l'AIC a été introduit pour retenir des variables pertinentes lors de prévisions, et que le critère BIC vise la sélection de variables statistiquement significative dans le modèle.

L'expression de ce critère se note :

$$\text{BIC} = -2 \log (L) + 2 k \log (N) \quad (15)$$

Avec **L** : la vraisemblance, **K** : le nombre de paramètres et **N** : la taille de l'échantillon

2.5.4. Estimation des paramètres des lois retenues et des quantiles de pluies extrêmes.

2.5.4.1. Estimation des paramètres des lois retenues

Après avoir supposé qu'une distribution décrit convenablement les événements extrêmes, la tâche suivante consiste à estimer les paramètres de ladite distribution, de manière à pouvoir calculer les quantiles à partir du modèle ajusté. Pour déterminer ces paramètres, plusieurs méthodes sont disponibles : la méthode graphique, la méthode des moments, le maximum de vraisemblance, la minimisation d'un test d'adéquation.

Selon Bobée et Perreault (1992), les méthodes d'estimation des paramètres les plus utilisées sont en pratique la méthode du maximum de vraisemblance et la méthode des moments. La première est employée généralement à cause de ses propriétés asymptotiques fort- intéressantes, la seconde pour sa simplicité. Aussi, Brunet-moret (1969) trouve que la méthode du maximum de vraisemblance conduit à des estimations correctes et efficaces. Bois et Obled (2007) reconnaissent également la simplicité de la méthode des moments mais ils

soulignent qu'elle donne beaucoup de poids aux valeurs extrêmes ; ce qui peut être problématique. Une variante de la méthode des moments qui s'est révélée efficace en hydrologie pour la distribution des valeurs extrêmes généralisée est la méthode des moments pondérés en fonction des probabilités Analyse fréquentielle des pluies extrêmes dans la région septentrionale du Bénin Audrey Merveille Sèdo ADANGO | INE, UAC, République du Bénin 24 ou méthode des L-moments (OMM, 2014). Ainsi, nous avons utilisé dans cette étude la méthode du maximum de vraisemblance car cette méthode présente aussi l'avantage d'être applicable à toutes les distributions statistiques

Maximum de vraisemblance

La méthode du maximum de vraisemblance a des fondements statistiques très solides. Elle permet de choisir les paramètres qui rendent la distribution ajustée aussi cohérente que possible (au sens statistique) avec l'échantillon observé (OMM, 2014).

La probabilité d'avoir eu dans l'échantillon une valeur comprise entre $x_i + dx/2$ et $x_i - dx/2$ est, selon la loi définie par sa fonction densité :

$$F(x_i, \alpha_1, \dots, \alpha_p) dx = \Pr(x_i - dx/2 < X < x_i + dx/2)$$

Si les valeurs x_i sont indépendantes, alors la probabilité d'avoir tiré (dans n'importe quel ordre) les n valeurs $x_1, x_2, \dots, x_n$ (à plus ou moins $dx/2$) est le produit de ces n probabilités; et c'est donc une fonction des p paramètres pour les n valeurs x_i données.

La méthode du maximum de vraisemblance consiste à maximiser cette probabilité, c'est à dire choisir les valeurs des p paramètres qui rendent cet échantillon le plus probable possible, au vu d'une loi choisie préalablement. La résolution analytique de cette maximisation est plus ou moins simple selon les lois. (Bois et Obled, 2007)

1.5.4.2. Estimation des quantiles de pluies L'ajustement d'une loi statistique à une série de précipitation permet de prévoir la probabilité d'apparition d'une hauteur donnée de précipitation à partir de la fonction de répartition ou de la densité de probabilité. On associe à un phénomène hydrologique sa probabilité d'occurrence et inversement. Il faudra donc estimer la probabilité au non dépassement $F(x_i)$ qu'il convient d'attribuer à chaque valeur de x après un tri de la série par valeurs croissantes permettant d'associer à chaque valeur son rang i . Plusieurs formules empiriques existent pour calculer la probabilité au non dépassement des pluies ordonnées. Elles se mettent généralement sous la forme de l'Equation 16

$$F(x_i) = \frac{i-a}{n-2a+1} \quad (16)$$

Avec i le rang des observations, n la taille de l'échantillon, a une constante empirique.

La formule utilisée dans cette étude est celle de Hazen ($a=0,5$). Ainsi, la formule empirique devient

$$F(x_i) = \frac{i-0.5}{n} \quad (17)$$

D'après Ague (2015), pour l'estimation d'un quantile X_T de période de retour T se reportant à une variable aléatoire X à partir d'un échantillon qui suit une loi de probabilité donnée F ayant k paramètre, on utilise l'expression :

$$X_T = F^{-1}(\theta_1, \theta_2 \dots \theta_k, -\frac{1}{T}) \quad (18)$$

Où F^{-1} est la fonction inverse de la fonction de répartition F et $\frac{1}{T}$ est la probabilité de dépassement de cet événement.

2.6. Conclusion partielle

Le chapitre a fait le tour du milieu d'étude et de la méthodologie adoptée dans notre étude. La suivie rigoureuse des facteurs énumérés dans cette méthodologie a permis d'arriver aux résultats du chapitre 2

Chapitre 3 : Résultats et Discussion

3.1 Résultats

3.1.1 Etude statistique de base des données (Caractérisation des extrêmes pluviométriques dans la zone d'étude)

Les caractéristiques statistiques des séries de pluies extrêmes sont consignées dans le Tableau ci-dessous.

Tableau 3 : Statistiques descriptives des stations étudiées

Stations	Min	Max	Moy	Med	Ecart-type	Cv	Cs	Ck
Aplahoué	47.0	158	88.1	86.9	24	0.272	0.568	3.28
Ahiémè	26.5	109	74.2	72.7	21.2	0.285	- 0.135	2.44
Lokossa	12.4	154	75.6	79	30.8	0.407	0.200	3.14

Min : valeur minimale de la série ; **Moy** : valeur moyenne de la série

Max : valeur maximale de la série ; **Cv** : coefficient de variation

Cs : Coefficient d'asymétrie ; **Ck** : Coefficient d'aplatissement

Nous remarquons à partir de ce tableau que les plus grands Max (valeur maximale de la série) sont observés au niveau des Stations d'Aplahoué et de Lokossa

3.1.2 Ajustement de 5 lois de valeurs extrêmes aux extrêmes pluviométriques et choix de la meilleure loi

3.1.2.1 Vérification des hypothèses de base

- *Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz*

Analyse fréquentielle des pluies et débits extrêmes à l'origine des inondations dans la basse vallée du Mono

Pour l'ajustement au test d'indépendance, l'hypothèse H_0 considérée est que les observations sont indépendantes. Le Tableau suivant présente les résultats qui ont été obtenus.

Tableau 4: Ajustement au test d'indépendance de Wald-Wolfowitz

Stations	Test d'Indépendance de Wald-Wolfowitz		Interprétation
	IUI	P	
Aplahoué	0.714	0.475	H_0 valide au niveau de signification 5%
Ahiémè	0.113	0.910	H_0 valide au niveau de signification 5%
Lokossa	0.171	0.864	H_0 valide au niveau de signification 5%

L'application du test de Wald Wolfowitz montre qu'il n'y a pas de relation entre les observations successives au seuil de défaillance de 5% à toutes les stations

- *Test de stationnarité de Kendall*

Analyse fréquentielle des pluies et débits extrêmes à l'origine des inondations dans la basse vallée du Mono

Pour l'ajustement au test de stationnarité, l'hypothèse H_0 considérée est qu'il n'y a aucune tendance dans les observations. Le Tableau ci-contre présente les résultats de l'ajustement au test de stationnarité.

Tableau 5 : Ajustement au test de stationnarité de Kendall

Test de stationnarité de Kendall			
Stations	IKI	P	Interprétation
Aplahoué	0.126	0.900	H_0 valide au niveau de signification 5%
Ahiémè	0.980	0.327	H_0 valide au niveau de signification 5%
Lokossa	0.385	0.700	H_0 valide au niveau de signification 5%

L'application du test de Kendall indique qu'il n'y a aucune tendance dans les observations au seuil de défaillance de 5%

- *Test de Mann-Whitney (Mann-Whitney test, Wilcoxon (1945))*

Nous avons pris soin de subdiviser les observations de chaque station en deux sous échantillons égales pour le test d'homogénéité. L'hypothèse H_0 considérée ici, signifie que : Les moyennes des deux sous-échantillons sont égales. Les

résultats obtenus et les années utilisées pour la séparation des échantillons sont consignés dans le Tableau suivant.

Tableau 6 : Ajustement au test d'homogénéité de Wilcoxon

Test d'homogénéité de Wilcoxon			
Stations	IWI	P	Interprétation
Aplahoué	0.713	0.476	H0 valide au niveau de signification 5%
Ahiémè	0.857	0.391	H0 valide au niveau de signification 5%
Lokossa	0.914	0.361	H0 valide au niveau de signification 5%

3.1.2.2 Ajustement aux 4 Lois de valeurs extrêmes et choix de la meilleure distribution

Le choix de la meilleure distribution s'est fait sur la base des critères d'information bayésien et d'Akaike et la meilleure loi à retenir est celle qui a simultanément les deux critères faibles. Le Tableau suivant présente les valeurs de ces critères de comparaison pour les 5 lois utilisées.

Tableau 7 : Valeurs des critères d'information bayésien et d'Akaike pour chaque loi

**Analyse fréquentielle des pluies et débits extrêmes à l'origine des inondations
dans la basse vallée du Mono**

STATIONS	LOIS	NOMBRE DE PARAMETRE	BIC	AIC
APLAHOUE	Log normale (Maximum de vraisemblance)	2	353.996	350.721
	Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	354.852	351.576
	Pearson type III (Maximum de vraisemblance)	3	357.246	352.333
	Log normale à 3 paramètres (Maximum de vraisemblance)	3	357.337	352.424
	GEV (Maximum de vraisemblance)	3	357.370	352.424
ATHIEME	Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	178.440	176.551
	GEV (Maximum de vraisemblance)	3	177.115	174.282
	Log normale (Maximum de vraisemblance)	2	178.569	176.680

**Analyse fréquentielle des pluies et débits extrêmes à l'origine des inondations
dans la basse vallée du Mono**

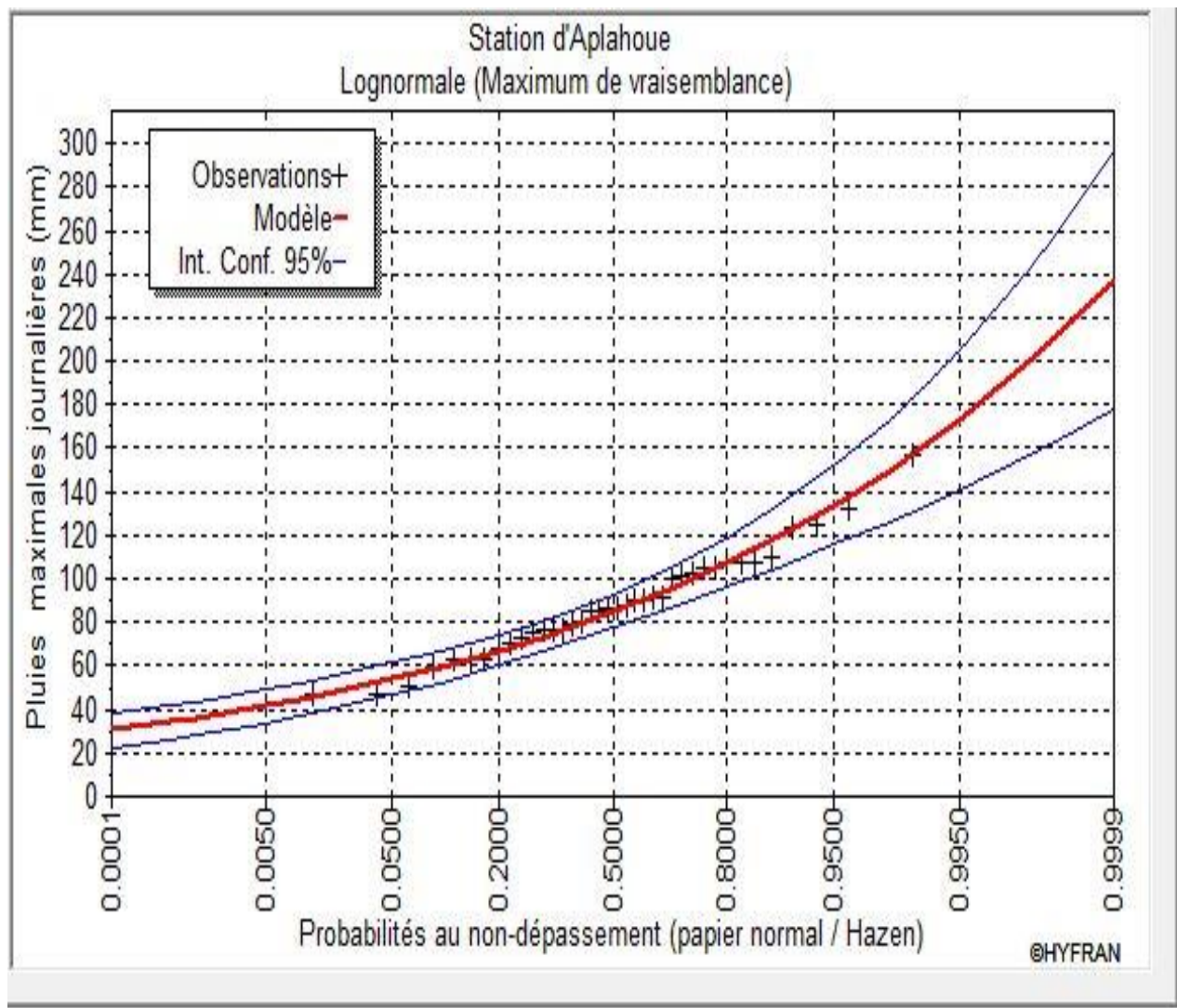
LOKOSSA	Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	339.377	336.324
	Pearson type III (Maximum de vraisemblance)	3	338.938	334.359
	Log normale à 3 paramètres (Maximum de vraisemblance)	3	338.933	334.354
	GEV (Maximum de vraisemblance)	2	339.174	334.595
	Log normale (Maximum de vraisemblance)	2	345.975	342.962

De l'analyse du tableau, il ressort que les valeurs de BIC et AIC sont faibles pour les lois Log normale, GEV et Log normale à 3 paramètres respectivement pour les stations APLAHOUE, ATHIEME et LOKOSSA. On en déduit que les lois Log normale, GEV et Log normale à trois paramètres s'ajustent mieux respectivement aux séries pluviométriques des stations d'APLAHOUE, d'ATHIEME et de LOKOSSA. Donc les meilleurs modèles pour les trois stations sont celui de Log normale, GEV et Log normale à trois paramètres.

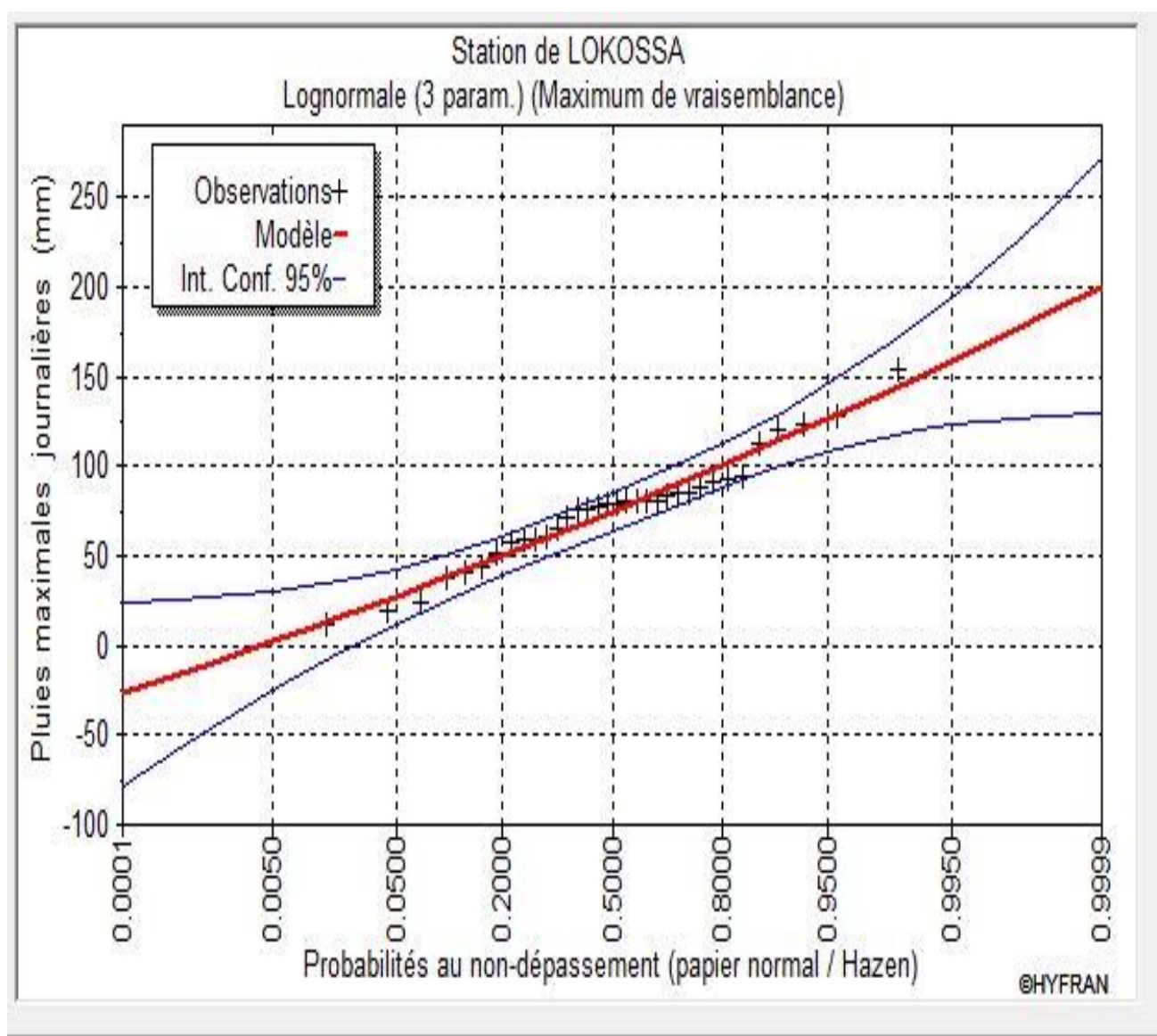
Toutes les observations sont prises en compte par les différents modèles dans un intervalle de confiance égale à 95%.

Analyse fréquentielle des pluies et débits extrêmes à l'origine des inondations dans la basse vallée du Mono

La Figure suivante présente les graphes de représentations des 3 types de lois retenus.



**Analyse fréquentielle des pluies et débits extrêmes à l'origine des inondations
dans la basse vallée du Mono**



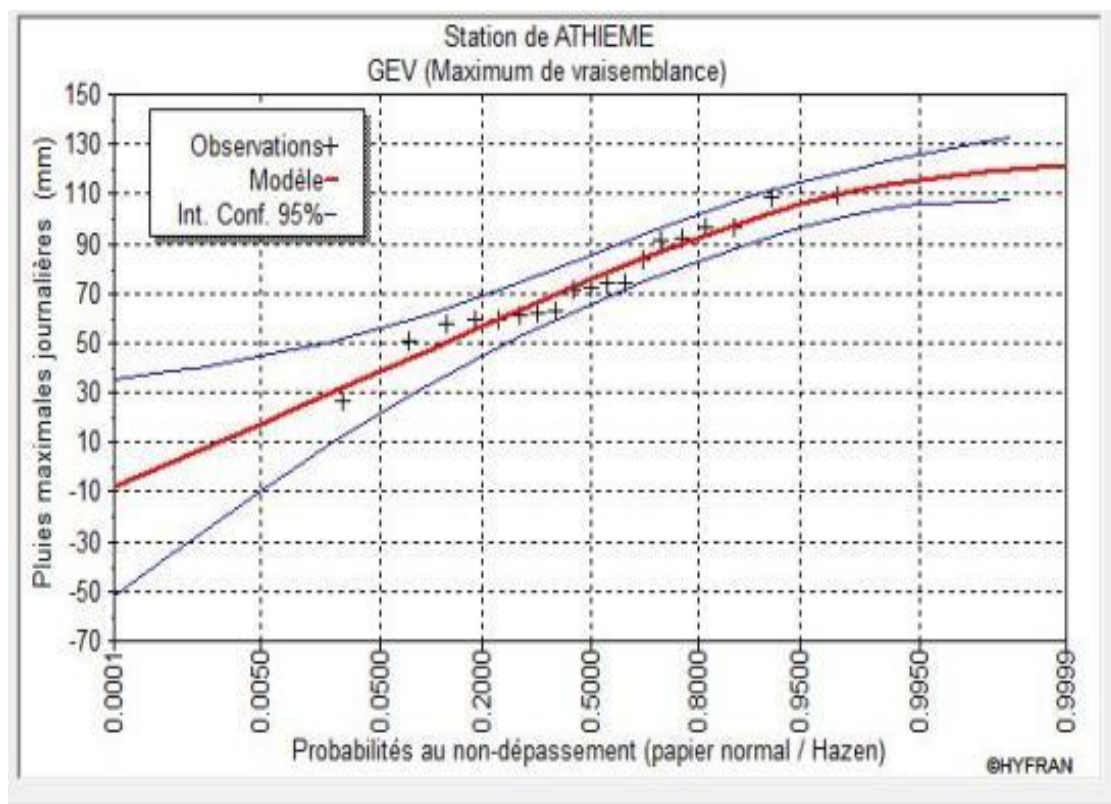


Figure 6: Graphiques d'ajustements avec un intervalle de confiance 95%

3.1.3 Estimation des paramètres des Lois retenues et des quantiles et pluies extrêmes

3.1.3.1 Estimation des paramètres des Lois retenues

A partir de la méthode du maximum de vraisemblance, nous avons déterminés les paramètres des distributions adéquates. Le Tableau ci-dessous présente les paramètres des lois choisies pour chaque station

Tableau 8: Paramètres estimés pour chaque loi

Station Lokossa	Log normale à 3 paramètres		
	M	M	Σ
	-469.332	6.29914	0.055613
Station d'Ahiémè	GEV		
	A	K	U
	21.4821	0.394413	68.0881
Station d'Aplahoué	Log normale		
	M		Σ
	4.44196		0.27667

3.1.3.2 Estimation des quantiles de pluies extrêmes.

Pour le calcul des quantiles, les périodes de retour retenues sont celles de 2 ans, 5 ans, 10 ans, 50ans, et 100 ans. Les quantiles de pluies extrêmes sont estimés à partir des lois choisies au niveau de confiance de 95%. Le Tableau ci-après présente le résultat des différents calculs par station à partir des distributions des maxima annuels de pluies journalières adéquates des 3 stations étudiées. On remarque que sur les quatre (4) lois de probabilité utilisées dans cette étude, trois (3) ont été retenues pour le calcul des quantiles de pluie dans la basse vallée du Mono. Il s'agit des lois Log normal, Gumbel et Log normale à 3 paramètres. En ce qui concerne les quantiles de pluie, on remarque que leur évolution est proportionnelle à celles des périodes de retour puisque ces dernières augmentent avec les quantiles de pluie.

**Analyse fréquentielle des pluies et débits extrêmes à l'origine des inondations
dans la basse vallée du Mono**

Tableau 9 : Quantiles (mm) des périodes de retour T-2, 5, 10, 50 et 100ans

Log normale	T	Q(m ³ /s)	XT	Intervalle de Confiance	STATIONS
	2	0.5	74	63.8-81.8	LOKOSSA
	5	0.8	101	88.4-113	
	10	0.9	115	99.9-130	
	50	0.98	141	116-166	
	100	0.99	150	120-180	
GEV	2	0.5	68	52-84	ATHIEME
	5	0.8	100	79-130	
	10	0.9	130	95-160	
	50	0.98	180	130-230	
	100	0.99	200	140-260	
Log normale à 3 paramètres	2	0.5	85	77-92	APLAHOUE
	5	0.8	110	96-120	
	10	0.9	120	110-140	
	50	0.98	150	130-170	
	100	0.99	160	130-190	

L'analyse de ce tableau nous montre que l'évolution des quantiles de pluie est proportionnelle à celles des périodes de retour, car les périodes de retour augmentent avec les quantiles de pluie. Aussi, pour les faibles périodes de retour (2 ans, 5 ans et 10 ans), les quantiles sont à peu près les mêmes pour les trois stations. Quant aux périodes de retour de 50 ans et 100 ans, les maximums des quantiles sont observés à Athiémè puis les minimums sont enregistrés aux stations de Lokossa et d'Aplahoué.

3.1.4 Etude statistique de base des données (Caractérisation des Débits dans la station d'ATHIEME

Les caractéristiques statistiques de la série de débit d'Athiémè sont consignées dans le Tableau ci-dessous :

Tableau 10: Caractéristique statistique

Station	Min	Max	Moy	Med	Ecart- type	Cv	Cs	Ck
ATHIEME	47.0	158	88.1	86.9	24	0.272	0.568	3.28

Tableau 11 : Test de vérification des hypothèses de base

Station d'ATHIEME	Test d'Indépendance de Wald-Wolfowitz		Interprétation
	IUI	P	H0 valide au niveau de signification 5%
	1.67	0.0942	
	Test de stationnarité de Kendall		
	IKI	P	HO rejeté au niveau de signification 5% et accepté à 1%
	2.12	0.0337	
	Test d'homogénéité de Wilcoxon		
	IWI	P	HO rejeté au niveau de signification 5% et accepté à 1%
	2.49	0.0130	

Il ressort des résultats des tests que les données sont indépendante à 5% et homogène et stationnaire qu'à 1%

Tableau 12 : Ajustement aux lois extrêmes

***Analyse fréquentielle des pluies et débits extrêmes à l'origine des inondations
dans la basse vallée du Mono***

STATIONS	LOIS	NOMBRE DE PARAMETRE	BIC	AIC
ATHIEME	GEV (Maximum de vraisemblance)	3	830.147	823.201
	Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	855.390	851.201
	Log normale (Maximum de vraisemblance)	2	868.917	804.732

De l'analyse du tableau, il ressort que les valeurs de BIC et AIC sont faibles pour la loi GEV. On n'en déduit que la loi GEV s'ajuste mieux à la série de débit observé à la station d'Athiémè. Donc le meilleur modèle pour la station est celui de GEV.

Toutes les observations sont prises en compte par les différents modèles dans un intervalle de confiance égale à 95%.

La Figure suivante présente le graphe de représentation de la loi retenu.

Analyse fréquentielle des pluies et débits extrêmes à l'origine des inondations dans la basse vallée du Mono

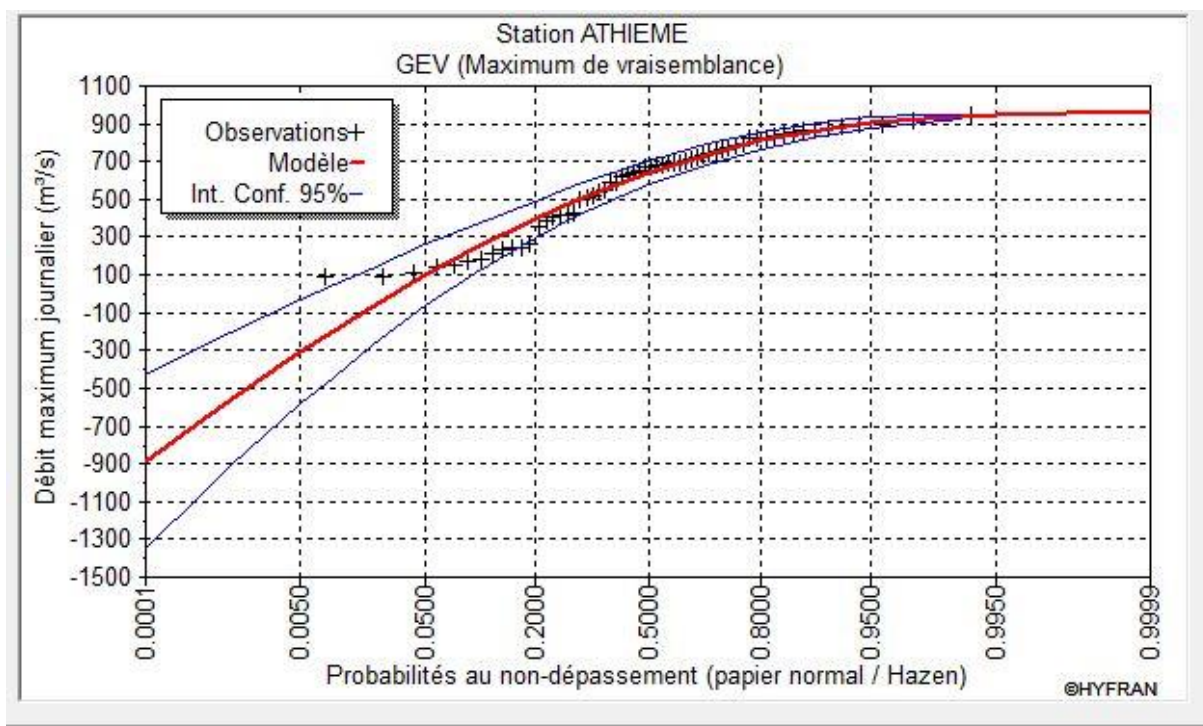


Figure 7: Ajustement de la loi GEV au débit d'Athiémè

Tableau 13 : Quantiles de chaque période de retour de 2, 5, 10, 50 et 100 ans

GEV	T	Q(m ³ /s)	XT	Intervalle de Confiance
	2	0.5	640	579-702
	5	0.8	811	766-857
	10	0.9	905	874-935
	50	0.98	930	900-950
	100	0.99	941	930-950

L'analyse de ce tableau nous montre que l'évolution des quantiles de débit est proportionnelle à celles des périodes de retour, car les périodes de retour augmentent avec les quantiles de débit

3.1.5 Stratégies endogènes d'adaptation

Dans le but de s'adapter aux enjeux de l'inondation, les habitants de notre zone d'étude élaborent à cet effet plusieurs stratégies.

3.1.5.1 Identification des signes annonciateurs

En se servant des expériences acquises à travers plusieurs générations antérieures les producteurs ont développé des méthodes traditionnelles d'observation et de lecture des phénomènes naturels pour savoir l'état de la saison à venir. Ainsi, les producteurs font :

- l'observation des formes de nuages, une formation de cercles blancs dans les nuages noirs annoncent des pluies intenses (excès pluviométrique) ;
- la présence des mousses à la surface du fleuve Mono annonce l'inondation ;
- l'excès de chaleur annonce l'excès pluviométriques ;
- l'épervier qui se déplace sans crier annonce l'arrivée imminente d'une abondante eau (qu'il y aura inondations) ;
- l'épervier qui se déplace avec des cris signale la présence de l'eau (l'inondation) ;
- L'oiseau Woutoutou en langue fon ; qui par ses cris pendant de longue durée annonce de fortes pluies ;
- Trop de rosée la veille annonce la forte chaleur le jour suivant.

Suite à ces observations, les producteurs savent déjà à quoi s'attendre et quels sont les dispositions à prendre pour minimiser les dégâts matériels et immatériels.

A cela s'ajoute l'accompagnement des ATDA, des ONG, l'agence de Nangbéto, de la mairie, de la GIZ et de l'ANPC pour informer les populations de la survenance des risques climatiques à partir de la lecture des

dispositifs d'alerte précoce et la nécessité de prendre des dispositions pour la sauvegarde des biens et la protection des populations.

3.1.5.2 Mesures d'adaptation

Pour mieux s'adapter à la survenance des aléas climatiques, les producteurs :

- abandonnent les champs en cas d'inondation ;
- font une réadaptation du calendrier agricole ;
- dorment à la belle étoile en cas de chaleur intense ;
- sont délocalisés pour les sites aménagés ;
- vendent précocement les animaux à vil prix pour éviter les pertes ;
- abandonnent leurs maisons pour des sites d'accueil ;
- font des récoltes précoces ;
- irriguent leurs champs pour contourner les poches de sécheresse.

3.1.5.3 Au niveau des institutions

Pour mieux s'adapter à la survenance des aléas climatiques:

- la mairie fait appel aux partenaires techniques et financiers ;
- l'intervention de l'Agence Nationale de la Protection Civile (ANPC) pour le secourisme et l'apport des vivres ;
- la mise en place des pères éducateurs qui servent de relais entre les populations et les autorités locales ;
- l'installation d'unité spécialisée (police fluviale) avec des équipements pour la sauvegarde et la délocalisation des gens sinistrés vers des zones d'accueil par l'Agence Béninoise de Gestion des Frontières (ABGF) ;
- la Croix Rouge pour les premiers soins ;
- le Programme Alimentaire Mondial pour l'alimentation

L'ensemble de ces stratégies d'adaptation mises en place présente selon les personnes enquêtées des insuffisances. Pour y remédier quelques suggestions ont été proposées. Il s'agit de:

- mettre à temps l'information requise à la disposition des populations ;
- réactiver les pères éducateurs pour la divulgation de l'information de bouche à oreille ;
- renforcer le système d'alerte mis en place ;
- renforcer les séances de sensibilisation pour aider les populations à toucher du doigt les réalités et à accepter la délocalisation vers les sites appropriés ;
- disposer en cas de secourisme, des barques en tenant compte de l'effectif ;
- tenir compte du niveau de vulnérabilité par personne ;
- aménager des sites d'accueil des sinistrés en tenant compte des besoins ;
- mettre en place une ligne budgétaire au niveau de la mairie pour le secourisme. (Rapport vulnérabilité, 2020)

Les populations du bassin versant du Mono sont très vulnérables aux changements climatiques. Pour réduire leur degré de vulnérabilité, les populations ont développés des stratégies d'adaptations. Ces méthodes traditionnelles n'ont pas abouti à la résolution adéquate du problème d'inondation ce qui donne la main à une gestion d'ordre scientifiques et adéquate.

3.2 Discussion

Dans cette étude, nous avons effectué l'analyse fréquentielle des pluies extrêmes sur trois stations de la basse vallée du Mono à savoir la station pluviométrique d'Aplahoué, d'Ahiémè et celle de Lokossa d'une part et l'analyse fréquentielle des débits de la station d'Ahiémè.

De plus, la vérification des données aux tests d'hypothèses a permis de constater que les échantillons sont stationnaires, indépendantes et homogènes. Ces résultats concordent avec ceux trouvés par Avahounlin et al. (2013) et Koumassi et al.

(2014) respectivement sur le bassin de l'Ouémé et de la Sota. A l'instar des résultats issus de l'ajustement des distributions, nous avons retenues trois des quatre lois statistique ce qui justifie que bien que ces stations soient dans la même zone climatique, elles ne sont pas représentées par une loi unique. Ce résultat concorde avec celui obtenu par Agué et Afouda (2015) qui ont montré que les distributions de probabilité des pluies journalières maximales annuelles n'obéissent pas spécifiquement à un régime pluviométrique donné.

En effet, l'ajustement des lois extrêmes aux pluies maximales journalières des stations choisies montre que les lois Log normale, GEV et Log normale à trois paramètres s'ajustent mieux respectivement aux séries pluviométriques des stations d'Aplahoué, d'Ahiémè et de Lokossa. Nous notons aussi que pour les périodes de retour élevées (50 à 100 ans), les maximums sont observés à la station d'Athiémè. On observe dans cette zone très basse du bassin caractérisé par l'exutoire du bassin une forte variabilité des pluies extrêmes.

L'ajustement des lois extrêmes aux débits du fleuve d'Ahiémè montre que la loi GEV s'ajuste mieux à la série de données considérées. Ces résultats sont conformes aux résultats d'Amoussou en 2015 dans son étude d'Analyse hydrométrique des crues dans le bassin-versant du Mono en Afrique de l'Ouest avec un modèle conceptuel pluie-débit. Le tableau suivant s'en chargera de comparer les quantiles de débits estimés dans cette étude et ceux d'Amoussou.

Tableau 14: Comparaison des quantiles des débits

Période de retour (année)	Quantiles de débit	
	Etude actuelle	Amoussou(2015)
2	640	526.68
5	811	914.53
10	905	1210.55
50	930	1993.82
100	941	2388.69

De l'analyse de ce tableau, il ressort que les quantiles trouvés par Amoussou dépassent nettement les quantiles actuels trouvés dans notre étude. Ceci s'exprime par les paramètres mise en jeu agissant sur la zone d'étude, c'est-à-dire que son étude a porté sur la partie amont du barrage Nagbéto. En effet, en amont du barrage, l'écoulement est naturel et régulier.

Les différentes mesures adoptées par les habitants exposés à ces inondations étant traditionnelles, elles n'ont pas répondu aux besoins et problèmes d'inondation

3.3 Conclusion partielle

A l'issu de notre travail, nous avons ajusté quatre lois de valeurs extrêmes à trois séries de maximum annuels de pluie journalière et à une série de débit maximales annuelles de débits journaliers. Après le choix de la meilleure loi, nous avons remarqué que les lois Log normale, GEV et Log normale à trois paramètres s'ajustent respectivement aux séries pluviométriques des stations d'Aplahoué, d'Ahiémè et de Lokossa d'une part et la loi GEV s'ajuste à la série de débit de la station d'Athiémè d'autre part. En se servant des résultats de cet ajustement statistique, nous avons déterminé les quantiles de pluies de périodes de retour 2ans, 5ans, 10ans, 50ans et 100ans.

Conclusion Générale et Perspective

En dehors des autres zones du Bénin, le Bassin du mono précisément la basse vallée du Mono est exposés aux risques d'inondation dont les raisons ne sont pas unique. L'objectif général de cette étude est de déterminer les lois qui décrivent au mieux le comportement statistique des extrêmes pluviométriques et de débit de cette zone afin d'estimer les quantiles de pluies et de débits journalières associés à différentes périodes de retour.

A cet effet, nous avons effectué une analyse fréquentielle des extrêmes pluviométrique des stations de Lokossa d'Athiémè et d'Aplahoué d'une part et des débits d'Athiémè. Pour ce faire, dans un premier temps, nous avons déterminé les caractéristiques des séries de maximas journaliers annuels de ces stations. Ensuite nous avons vérifié si ces données respectent la condition nécessaire pour l'ajustement aux lois de valeurs extrêmes qui est la conformité aux tests statistiques de base (tests de stationnarité de Kendall, d'indépendance de Wald-Wolfowitz et d'homogénéité de Wilcoxon). L'étape suivante a consisté à ajuster à l'aide du logiciel HYFRAN, 5 lois extrêmes (GEV, Gumbel, Log normale, Pearson type III et Log normale à trois paramètres) aux séries de données et la meilleure loi a été choisi suivant le critère d'information d'Akaike (AIC) et le critère d'information bayésien (BIC). Ensuite, nous avons estimé les paramètres des lois retenues par la méthode du maximum de vraisemblance. Enfin, les quantiles de pluies extrêmes ont été estimés pour chacune des stations pluviométriques et les quantiles des débits pour les périodes de retour de 2, 5, 10, 50 et 100 ans.

Au terme de notre étude, il a été observé une adéquation des séries de maximums journaliers annuelles aux tests d'adéquation confirmant ainsi la première hypothèse formulée.

Cela nous a aidé à effectuer l'ajustement des séries de maxima annuels de pluies et de débits journaliers données aux 5 lois de valeurs extrêmes. D'après les résultats des critères Akaike et Bayésien, trois de ces lois ont été retenus. Il s'agit de la loi Log normale, GEV et Log normale à trois paramètres respectivement aux séries pluviométriques des stations d'Aplahoué, d'Ahiémè et de Lokossa d'une part et la loi GEV pour la série de débit de la station d'Athiémè d'autre part. Il ressort de cette étude qu'à chaque extrême associe sa loi. Ce résultat vient infirmer notre seconde hypothèse. Ces lois retenues ont servi à l'estimation des quantiles de maxima annuels de pluies et de débit journaliers. Pour l'ensemble des stations, ces quantiles varient entre 68 mm et 200 mm respectivement pour les périodes de retour de 2ans et 100ans pour les pluies et varient entre 640 à 941 pour les débits. Ainsi, on remarque que leur évolution est proportionnelle aux périodes de retour puisque ces dernières augmentent avec les quantiles de pluie et de débit.

Les habitants d'eux-mêmes n'ont pas croisés leur bras face aux enjeux d'inondations. A cet effet, plusieurs stratégies traditionnelles sont adoptées pour une adaptation aux manifestations de ces inondations. Néanmoins ces stratégies sont inadéquates pour une meilleure gestion et prévention des inondations. Ceci justifie notre troisième hypothèse

Ce travail constitue un outil pouvant servir aux décideurs notamment dans le processus de la lutte contre les inondations. La basse vallée du Mono est très vulnérable à ces pluies extrêmes car les activités prépondérants que pratiquent les habitants qui vivent là est l'agriculture et d'élevage de bétail. Ainsi les pratiquants de ces activités pour la plupart tombent dans la crise économique lorsque ces inondations surgissent. L'occupation anarchique des terres expose plus ces habitants aux risques d'inondations. Notons aussi la transformation des berges des cours et plan d'eau de ce sous bassin en terre cultivable ce qui favorise le comblement des lits de ces cours et plan d'eau cours d'eau conduisant aux

Analyse fréquentielle des pluies et débits extrêmes à l'origine des inondations dans la basse vallée du Mono

débordements des cours d'eaux en période de crue ou de forte pluie. Aussi les communautés de cette zone sont exposées aux risques sanitaires car, les inondations affectent la qualité de l'eau et induisent une augmentation de la morbidité et de mortalité par les maladies d'origine hydrique. Il urge donc de renforcer les capacités de gestion des pluies extrêmes en vue d'assurer le bien-être des populations. Sensibiliser les habitants vulnérables déjà installé de suivre les instructions des chefs gestion des crises d'inondations

Pour faire avancer cette étude pour répondre aux difficultés liées à l'inondation dans cette zone, d'autres facettes verront le jour. Il s'agit de :

- ❖ L'impact des activités anthropiques sur le changement climatique dans la basse vallée du Mono
- ❖ La modélisation pluie-débit dans la basse vallée du mono
- ❖ L'évaluation des conséquences d'inondation sur la vie des habitants du bassin du Mono

Références Bibliographiques

- Amoussou, E. C. (2014). *Évolution des précipitations extrêmes dans le bassin versant du Mono (Bénin- Togo) en contexte de variabilité / changement climatique.*
- Avahounlin, R. F. (2013). *Analyse Fréquentielle des Séries de Pluies et Débits Maximaux de L'ouémé et Estimation des Débits de Pointe.*
- Beniston, M. &. (2004). *Extreme climatic events and their evolution under.*
- Bois, P. &. (2007). *Traitement de données en Hydrologie.* ENSHMG Poly Version . 3.
- Décamps, H. (2010). *Événements climatiques extrêmes Réduire les vulnérabilités des .*
- El Adlouni, S. &. (2014). *Analyse fréquentielle hydrologique : logiciel HYFRAN.*
- Gardes, L. (2017). *Théorie des valeurs extrêmes.* Université de Strasbourg. .
- GBEYETIN, F. J. (2014). *Inondations dans la basse vallée du Mono: typologie et manifestations .*
- Grimaldi, S. K.-C. (2011). *Statistical Hydrology.*
- Hamzaoui, S. (2016). *Modélisation des courbes IDF à travers des stations pluviométriques de la région de l'Ouest du pays.*
- Koudamiloro, O. V.-M. (2017). *Caractérisation Des Risques Hydroclimatiques Dans Le Bassin Versant De L'Ouéomé A L'exutoire De Bétérou.*
- Perreault, L. &. (1992). *Loi généralisée des valeurs extrêmes Propriétés s Propriétés mathématiques et statistiques Estimation des paramètres et des quantiles XT de période de retour T.* Québec, Canada.

*RAPPORT, ETUDE DE VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAU DANS
LE BASSIN DU MONO. (2020).*

Sélom, K. K. (1996). *Evolution climato-hydrologique récente et conséquences sur
l'environnement : l'exemple du bassin du fleuve Mono (Togo-Bénin), Thèse
de Doctorat de l'Université de Michel de Montaigne-Bordeaux III, Option
Géographie Physique. France.*

**Analyse fréquentielle des pluies et débits extrêmes à l'origine des inondations
dans la basse vallée du Mono**

Annexe

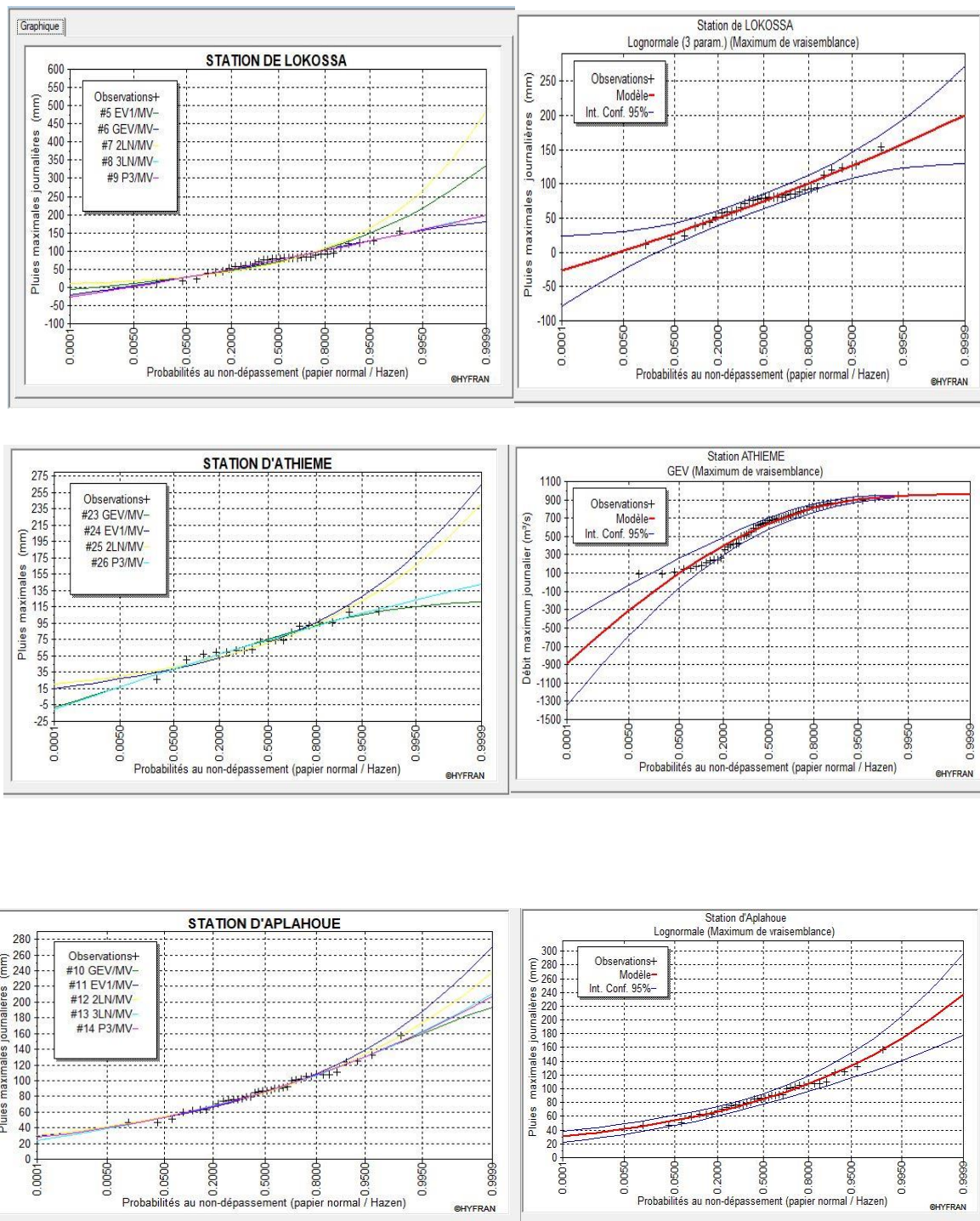
Annexe1 : Résultats du test de Khi carrée pour les distributions

Pluies		Lois	Résultats				Interprétation
	Stations		X ²	P	Degré liberté	M	
	Lokossa	Log normale à trois paramètres	15.88	0.0032	4	8	H0 rejeté au niveau de signification 5% et accepté à 1%
	Athiémè	GEV	5.32	0.0701	2	6	H0 valide au niveau de signification 5%
	Aplahoué	Log normale	7.05	0.2168	5	8	H0 valide au niveau de signification 5%
Débit	Athiémè	GEV	4.67	0.5872	6	10	H0 valide au niveau de signification 5%

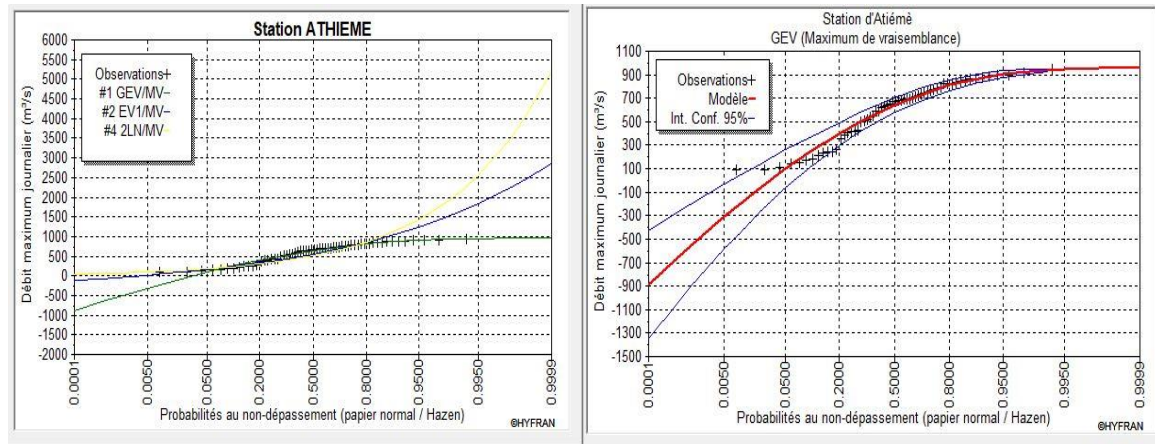
Analyse fréquentielle des pluies et débits extrêmes à l'origine des inondations dans la basse vallée du Mono

Annexe 2 : Comparaison des différents ajustements et distribution adéquate

Les graphiques suivants représentant la comparaison des différents ajustements et la distribution adéquate dans chaque cas.



Analyse fréquentielle des pluies et débits extrêmes à l'origine des inondations dans la basse vallée du Mono



Annexe 3 : Présentation de la structure de stage

Le Bassin du fleuve Mono est l'un des vingt-cinq (25) bassins fluviaux transfrontaliers de l'Afrique de l'Ouest et s'étend sur une superficie de 24.300 km² environ. La population du bassin est de 3 375 759 habitants. Pour une bonne gestion de ce bassin, une autorité a été mise en place : c'est ABM

L'idée de mettre en place l'Autorité du Bassin du Mono (ABM), s'inscrit dans le cadre de la mise en œuvre de la déclaration d'Ouagadougou sur la Gestion Intégrée des Ressources en Eau adoptée en mars 1998. L'Autorité a pour mandat de:

- ✓ Promouvoir la concertation permanente entre les parties prenantes au développement du bassin ;
- ✓ Promouvoir la mise en œuvre de la gestion intégrée des ressources en eau et le partage équitable des bénéfices découlant de leurs différentes utilisations ;
- ✓ Autoriser la réalisation des ouvrages et des projets envisagés par les Etats Parties et pouvant avoir un impact significatif sur les ressources en eau du bassin ;
- ✓ Réaliser des projets et des ouvrages communs ou d'intérêts communs ;

- ✓ Contribuer à la réduction de la pauvreté, au développement durable des Etats Parties et à une meilleure intégration socio-économique sous régionale.

Elle a pour mission :

- ✓ l'échange régulier de données et d'informations entre Etats Parties ;
- ✓ la notification de mesures projetées ;
- ✓ la protection et la préservation des écosystèmes ;
- ✓ la notification des situations d'urgence ;
- ✓ le principe du pollueur-payeur;
- ✓ Le principe du préleveur-payeur.
- ✓ Le principe de durabilité ;
- ✓ Le principe de participation.

Les principaux problèmes du Bassin du Mono sont:

- ✓ La pression anthropique sur les ressources;
- ✓ La dégradation des écosystèmes;
- ✓ La dégradation de la biodiversité;
- ✓ La faible connaissance de ressources;
- ✓ Les inondations récurrentes, et;
- ✓ Le changement climatique

C'est autour de ces problèmes que la Direction Exécutive de l'ABM travaille constamment par la préparation et le développement de projets dans le bassin avec l'appui des Partenaires Techniques et Financiers (PTF). L'engagement de l'ABM à inverser les tendances négatives à la dégradation des écosystèmes et à renforcer les capacités d'adaptation des populations aux impacts du changement climatique ont motivé le choix de l'ABM pour mon stage professionnel.

La Direction Exécutif de cette structure a été mon lieu de stage. Cette Direction est assurée par :

Monsieur Dadja GNAKPAOU, Directeur Exécutif de l'ABM un poste qu'il assure depuis bientôt quatre (04) ans.

Docteur Razaki SANOUSSI, Directeur Exécutif Adjoint, Chargé des Opérations.

Mr ADJAGODO G. Arnauld, Chef Unité Etudes et Planification.

Mr KPAWOL N'lansoho David le Chef Unité Finances et Comptabilité

Table des matières

Dédicace.....	1
Remerciements.....	ii
Sommaire.....	v
Liste des Sigles et Acronymes.....	vi
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Introduction Générale.....	1
1. Contexte et justification.....	1
1. But de la recherche	2
2. Objectif du mémoire	2
2.1. Objectif Général.....	2
2.2. Objectifs Spécifiques	3
3. Hypothèse de travail	3
4. Grande division du mémoire.....	3
Chapitre 1 : Clarification conceptuelle et état de l'art	4
1.1. Introduction.....	4
1.2. Clarification conceptuelle	4
1.3. Synthèse bibliographique.....	8
1.3.1. Analyse fréquentielle.....	8
1.3.2. Lois de valeurs extrêmes utilisées en hydrologie	11
1.4. Conclusion partielle	12
Chapitre 2 : Données, Matériels et Méthodes.....	13
2.1. Introduction.....	13
2.2. Milieu d'étude	13
2.2.1. Localisation	13
2.2.2. Relief	14
2.2.3. Sol et Végétation	16
2.2.4. Climat et Hydrographie.....	17

2.2.5. Aspect Socio-économique et populations	19
2.3. Données utilisées	20
2.4. Matériels utilisé	21
2.5. Méthodologie	22
2.5.1. Etape préliminaires	22
2.5.2. Etude statistique de base des données (Caractérisation des extrêmes pluviométriques dans la zone d'étude)	23
2.5.3. Ajustement de cinq lois de valeurs extrêmes aux extrêmes pluviométriques et choix de la meilleure loi	25
2.5.4. Estimation des paramètres des lois retenues et des quantiles de pluies extrêmes.	31
Chapitre 3 : Résultats et Discussion	35
3.1 Résultats.....	35
3.1.1 Etude statistique de base des données (Caractérisation des extrêmes pluviométriques dans la zone d'étude)	35
3.1.2 Ajustement de 5 lois de valeurs extrêmes aux extrêmes pluviométriques et choix de la meilleure loi	35
3.1.3 Estimation des paramètres des Lois retenues et des quantiles et pluies extrêmes	43
3.1.4 Etude statistique de base des données (Caractérisation des Débits dans la station d'ATHIEME	46
3.1.5 Stratégies endogènes d'adaptation	50
3.2 Discussion	52
3.3 Conclusion partielle	54
Conclusion Générale et Perspective	55
Références Bibliographiques.....	58
Annexe	60