

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=====



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation

Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE Professionnelle en Hydrologie

OPTION : Hydrologie quantitative

=====

**CARACTERISATION DES INDICES DE DEBITS EXTREMES
DANS LA BASSE ET MOYENNE VALLEE DE L'OUEME**

=====

Rédigé et présenté par

M. ACCLOMBESSI Gédéon

Maître de Mémoire

Dr BIAO Eliezer

Maître-Assistant CAMES



PROMOTION : 2023-2024

Dédicace

A ma chère maman Jeannette HESSOU

Honorable aimable, tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de la tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a cessé de m'accompagner depuis tout petit. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour et gratitude.

A mon cher papa Timothée ACCLOMBESSI

Autant de phrases et d'expressions ne sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance, tu as su graver en moi le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en moi. Je te dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain.

Remerciements

J'adresse mes remerciements et ma reconnaissance à Dieu le Tout Puissant et à un certain nombre de personnes sans qui ce travail n'aurait pas été possible :

Prof. Flavien DOVONOU, Chef du Département pour tous les efforts qu'il a fournis pour la formation des étudiants ;

A l'ensemble du corps professoral et administratif de l'INE, plus particulièrement tous ceux qui ont été mes enseignants pour avoir su nous donner le nécessaire pendant ces trois dernières années ; recevez ma profonde gratitude et ma grande satisfaction ;

Aux distingués membres du Jury, qui ont bien voulu examiner et enrichir ce modeste travail : je vous remercie pour le temps et l'énergie consacrés ;

Dr. Eliezer BIAO, mon Maître de mémoire pour m'avoir identifié pour conduire les travaux de recherche dans le cadre du projet intitulé Impact des Changements Climatiques sur les Inondations de la Basse et Moyenne vallée de l'Ouémé au Bénin (ICI-BMVO). Je le remercie également pour ses conseils scientifiques, ses explications et sa disponibilité tout au long de ce travail malgré ses multiples occupations ;

A mon aîné M. Freddy HOUNNONDAHO pour sa plus grande disponibilité, ses apports, ses suggestions, ses aides, ses explications scientifiques et orientations depuis le début de ce travail jusqu'à la fin ;

A mes frères et sœurs Zacharie, Elisabeth et Marina ainsi que membres de ma famille, qui m'ont toujours encouragé dans mes études et grâce à qui j'ai grandi dans un milieu épanouissant ;

Tous mes camarades de l'INE pour l'ambiance et l'entraide qui ont régnées entre nous tout au long de notre formation ;

Enfin un sincère merci à tous ceux qui de près ou de loin m'ont soutenu dans l'aboutissement de ce travail notamment Espérance NADA et Espérance AGBANDJAI.

Résumé

La variabilité de la zone Ouest Africaine observée sur le fleuve Ouémé est la cause des menaces naturelles pesant sur la population béninoise : inondations, crues et sécheresses. Cette étude inscrite dans le cadre du projet ICI-BMVO vise à caractériser l'évolution des indices de débits extrêmes dans la BMVO en utilisant des données de débits (1990-2022) de quatre stations hydrologiques (Ahlan, Atchérigbé, Bonou et Domè) et de MNT (2014, 2018 et 2023). Les centiles 10, 50 et 95 étudiés représentent respectivement les débits minimums, médians et maximums. Trois principales approches méthodologiques ont été employées : l'analyse de la variabilité des tendances et des ruptures (tests de Mann-Kendall et Sen-Theil) ; l'intégration des pentes dérivées des MNT pour relier les extrêmes à la topographie et une analyse fréquentielle basée sur six lois statistiques pour estimer les débits associés aux diverses périodes de retour (Gumbel, Log-normale pour les Q5, Gamma et Gamma Généralisée pour les Q50 ; GEV et Pearson type III pour les Q95).

Les résultats de l'analyse révèlent des tendances à la hausse comme à la baisse statistiquement significative et non significative sur les stations. Les tests de Mann-Kendall et Sen-Theil se sont révélés efficaces pour déterminer de manière fiable la présence ou l'absence de tendances, ainsi que leurs orientations dans la BMVO. L'utilisation de plusieurs tests et méthodes de ruptures nous a permis de considérer la méthode de l'Entropie Croisée comme meilleure dans la détermination de rupture pour les séries de données caractérisées par des variations subtiles. Les résultats obtenus de l'analyse fréquentielle ont permis de choisir les lois Log-normale, Gamma et GEV meilleures lois d'ajustement des extrêmes Q5, Q50 et Q95 dans la BMVO. Une évolution proportionnelle des quantiles calculées avec les périodes de retour a été observée.

Mots clés : indices de débits, débits extrêmes, tendances, ruptures, pente de terrain, tests statistiques, analyse fréquentielle.

Abstract

The variability of the West African zone observed on the Ouémé river is the cause of the natural threats weighing on the population of Benin: floods, floods and droughts. This study, part of the ICI-BMVO project, aims to characterise the evolution of extreme flow indices in the BMVO using flow data (1990-2022) from four stations (Ahlan, Atchérigbé, Bonou and Domè) and DEM data (2014, 2018 and 2023). The 10, 50 and 95 percentiles studied represent the minimum, median and maximum flows respectively. Three main methodological approaches were used: analysis of variability trends and breaks (Mann-Kendall and Sen-Theil tests); integration of slopes derived from DEM to relate extremes to topography and a frequency analysis based on six statistical laws to estimate the flows associated with the various return periods (Gumbel, Log-normal for Q5, Gamma and Generalised Gamma for Q50; GEV and Pearson type III for Q95).

The results of the analysis reveal both statistically significant and non-significant upward and downward trends at the stations. The Mann-Kendall and Sen-Theil tests proved effective in reliably determining the presence or absence of trends, as well as their direction in the BMVO. The use of several breakpoint tests and methods enabled us to consider the Cross Entropy method to be the best in determining breakpoints for data series characterised by subtle variations. The results obtained from the frequency analysis were used to select the Lognormal, Gamma and GEV laws as the best fitting laws for the extremes Q5, Q50 and Q95 in the BMVO. A proportional evolution of the quantiles calculated with the return periods was observed.

Keywords: flow indices, extreme flows, trends, breaks, field slope, statistical tests, frequency analysis.

Sigles et acronymes

ASECNA :	Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et en Madagascar.
BAD :	Banque Africaine de Développement
BMVO :	Basse et Moyenne vallée de l'Ouémé
CE :	Cross Entropy
DGEau :	Direction Générale de l'Eau
HYFRAN :	Hydrological Frequency Analysis.
ICI-BMVO :	Impacts des changements climatiques sur les Inondations de la Basse et Moyenne Vallée de l'Ouémé
INE :	Institut National de l'Eau
INRAE :	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
MNT :	Modèles Numériques de Terrain
NASA :	National Aeronautics and Space Administration
ONERC :	Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique
OXFAM :	Oxford Committee for Relief Famine
Q10	Débits correspondant au 10 ^{ème} centile.
Q50	Débits correspondant au 50 ^{ème} centile.
Q95 :	Débits correspondant au 95 ^{ème} centile.

Liste des figures

Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude.	12
Figure 2: Variabilité mensuelle de la température et de la pluie au sud-Bénin	14
Figure 3: Localisation des stations de l'étude	15
Figure 4: Taux (τ) d'accroissement entre a et $a+h$	23
Figure 5: Principales étapes de l'analyse fréquentielles	24
Figure 6: Variabilité des débits annuels Q10	41
Figure 7: Variabilité des débits annuels Q50	42
Figure 8: Variabilité des débits annuels Q95	43
Figure 9: Tendances des débits annuels Q10 (1990–2022)	44
Figure 10: Tendances des débits annuels Q50 (1990–2022)	45
Figure 11: Tendances des débits annuels Q95 (1990–2022)	46
Figure 12: Evolution de la variable U du test de Pettitt des Q10 du sous bassin de Ahlan et Bonou dans la BMVO	48
Figure 13: Evolution de la variable U du test de Pettitt des Q50 du sous bassin de Ahlan et Atchérigbé dans la BMVO	49
Figure 14: Evolution de la variable U du test de Pettitt des Q95 du sous bassin de Ahlan et Bonou dans la BMVO	50
Figure 15: Evolution de la variable U du test de Pettitt des extrêmes dans la BMVO	I
Figure 16: Résultats du test de BUIHAND	II
Figure 17: Graphes d'ajustement des débits extrêmes Q10 aux lois Gumbel et Log-normale	VI
Figure 18: Graphes d'ajustement des débits extrêmes Q50 aux lois Gamma & et Gamma Généralisée	VII
Figure 19: Graphes d'ajustement des débits extrêmes Q95 aux lois GEV et Pearson type III	VIII

Liste des tableaux

Tableau 1: Les sous bassins versants de l'étude -----	14
Tableau 2: Résultats du test de tendances de Mann-Kendall et de Sen-Theil -----	47
Tableau 3: Valeurs de pente de terrain du lit des sous bassins -----	51
Tableau 4: Evolution du taux d'accroissement en (%) -----	52
Tableau 5: Valeurs des extrêmes de débits des sous bassins de 2014 à 2022 -----	53
Tableau 6: Valeurs des paramètres BIC et AIC -----	56
Tableau 7: Résultats de test de Khi-deux pour les Q10 -----	58
Tableau 8: Résultats de test de Khi-deux pour les Q50 -----	58
Tableau 9: Résultats de test de Khi-deux pour les Q95 -----	58
Tableau 10: Quantiles calculés pour les séries de Q10 -----	59
Tableau 11: Quantiles calculés pour les séries de Q50 -----	60
Tableau 12: Quantiles calculés pour les séries de Q95 -----	61
Tableau 13: Résultats du test de segmentation de Hubert. -----	I
Tableau 14: La méthode de l'Entropie croisée -----	IV
Tableau 15: Caractéristiques statistiques des séries de Q10, Q50 et Q95 -----	IX
Tableau 16: Résultats des Tests pour Q10, Q50 et Q95 -----	IX

Tables des matières

Remerciements-----	ii
Résumé-----	iii
Abstract -----	iv
Sigles et acronymes -----	v
Listes des figures -----	vi
Liste des tableaux-----	vii
Tables des matières-----	viii
CHAPITRE1 : INTRODUCTION GENERALE -----	1
1.1 Introduction-----	2
1.2. Revue de littérature-----	4
1.2.1. Clarifications conceptuelles-----	4
1.2.2. Etat des connaissances -----	6
1.3. But de la recherche -----	7
1.4. Questions de recherches -----	8
1.5. Objectifs du mémoire -----	8
1.5.1. Objectif général -----	8
1.5.2. Objectifs spécifiques -----	8
1.6. Résultats attendus -----	8
CHAPITRE 2 : DONNEES, MATERIELS ET METHODES -----	10
2.1. Introduction-----	11
2.2. Milieu d'étude -----	11
2.2.1. Localisation : Hydrographie et morphologie -----	11

2.2.2. Pédologie et Climat -----	13
2.3. Données utilisées -----	14
2.4. Méthodes -----	16
2.4.1. Collecte des données -----	16
2.4.2. Contrôle de la qualité des données -----	16
2.4.3. Méthodes de traitement des données -----	17
2.5. Conclusion -----	38
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION -----	39
3.1. Introduction -----	40
3.2. Approche statistique des variations et tendances hydrologiques interannuelles -----	40
3.2.1. Variabilité interannuelle des débits extrêmes -----	40
3.2.2. Détection de tendance et pente de tendance au sein des séries de données hydrométriques -----	43
3.2.3. Détection de rupture au sein des séries de données hydrométriques -----	47
3.3. Corrélation Pente de terrain-Débits extrêmes -----	51
3.3.1. Valeurs des pentes calculés -----	51
3.3.2. Taux d'accroissement -----	52
3.3.3. Vérification de l'existence d'une parfaite corrélation -----	52
3.4. Analyse fréquentielle des débits extrêmes -----	54
3.4.1. Caractéristiques statistiques de la série -----	54
3.4.2. Vérification des hypothèses de base dans les débits extrêmes -----	54
3.4.3. Ajustement aux lois des débits extrêmes (Q10, Q50 et Q95) -----	55
3.4.4. Comparaison des critères et adéquation par le test de khi-carré -----	56

3.4.5. Estimation des débits caractéristiques et les intervalles de confiance -----	59
3.6. Discussion-----	62
3.7. Conclusion -----	63
CHAPITRE 4 : CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES -----	64
4.1. Conclusion -----	65
4.2. Perspectives et suggestions -----	66
Références bibliographiques -----	67
Annexe -----	I
Annexe I : Résultats des tests de ruptures-----	I
Annexe II: Graphiques des lois d'ajustement-----	V
Annexe III : Caractéristiques Statistiques des séries -----	IX
Annexe IV : Résultats des tests-----	IX

CHAPITRE1 : INTRODUCTION GENERALE

1.1 Introduction

Depuis la préhistoire, les activités primaires telles que l'agriculture et la pêche ont été plus productives et simples grâce à l'existence des eaux de surfaces (bassins versants). Malheureusement la montée de ces eaux dans leurs lits suivie de l'augmentation de leurs débits d'écoulements crée parfois des inondations, source de plusieurs cas de décès, de détérioration des infrastructures (ponts, habitats ...) dont les coûts ont été estimés à plus de 82 milliards de dollars en l'an 2021 dans le monde (Swiss, 2022), de la destruction des champs de production agricole et aussi de la diminution des rendements de pêche (Grafton, 2011). Au cours de ces dernières décennies, plusieurs pays et nations pour une meilleure productivité agricole, économique ou énergétique se sont davantage intéressés à l'utilisation de ces eaux de surface (Meublat, 2001). Malheureusement c'est au cours de ces dernières décennies que nous assistons plus à une oscillation des débits d'écoulement de ces eaux, ce qui constitue un frein pour l'atteinte de leurs objectifs et nécessite des études hydrologiques poussées pour une meilleure maîtrise. Plusieurs scientifiques et auteurs se sont donc intéressés à ces études dans plusieurs vallées de l'Afrique comme le cas sur d'autres continent dont le Nil en Egypte par (Elfatih, 2015) ; le Falémé au Sénégal par (Faye, 2017) ; l'Ouémé au Bénin par (Lay, 2002) ; (Peugeot et al., 2011) ; (Zannou, 2011) ; (Akognongbé, 2014) ; (Abdoulaye, 2015) et (Fêmi et al., 2019) etc. Ce nombre important d'auteurs ayant travaillé sur des thématiques similaires sur le bassin de l'Ouémé témoigne de l'importance accordée à cette zone d'étude car il est la deuxième vallée la plus riche du monde après le Nil (Fêmi et al, 2019). Elle a été le sujet des dommages estimés à plus de 127 milliards de FCFA et une baisse du taux de croissance du PIB de l'ordre de 0.8 à cause de son débordement au cours des années 1999, 2008, 2009, 2010, 2012, et 2013 (Kodja et al., 2013).

Depuis l'obtention de son indépendance en 1960 et même bien auparavant, cette riche vallée du pays de la côte du Golfe de Guinée a attirer l'attention de plusieurs organisations et institutions dont la BAD (Banque Africaine de Développement), qui depuis 1969 s'intéresse, lance et finance les projets d'étude portant sur ce fleuve. Malgré le nombre d'étude qui s'est déjà porté sur ce bassin, il est difficile d'admettre que chaque année une multitude de gens voisins de la basse et moyenne vallée de ce fleuve continue de se sentir contraint de déloger et même parfois désertent leurs champs abondant de culture prête à moissonner pour les localités hors risques. Ceux qui imaginent incessamment être avisé et capable de récolter pendant ces périodes de crues laissent de temps en temps leurs inestimables vies en échanges (Jules et al., 2016).

La présente étude qui s'inscrit dans le cadre du projet ICI-BMVO viendra compléter les travaux similaires précédents, en s'appuyant sur des données historiques et contemporaines avec des méthodologies innovantes jusqu'ici peu appliquées à ce bassin. En caractérisant les indices de débits extrêmes sur une période de 33 ans (1990-2022) avec plusieurs approches, nous espérons avoir une meilleure compréhension sur leurs évolutions. Notre ambition est de relever le défi d'une caractérisation précise de ces indices afin d'offrir une nouvelle piste pour des travaux d'aménagement et de développement du territoire. Une telle analyse, qui sera rigoureusement menée, s'avère être importante pour appréhender le dynamisme des écoulements, ainsi que les phénomènes de crues et d'inondations.

1.2. Revue de littérature

1.2.1. Clarifications conceptuelles

Pour une meilleure compréhension du sujet, il est vital d'éclaircir certains termes.

- **Indices de débits** : En hydrologie, les indices de débits sont le plus souvent la synthèse des représentations numériques de la vitesse de l'écoulements des eaux d'un point A vers un autre B appelé exutoire par unité de temps sur différentes périodes, calculées à partir des séries de valeurs prélevées sur des stations hydrométriques. Ce sont aussi des paramètres ou indicateurs qui permettent de faire la synthèse de l'évolution des valeurs d'une variable sur une période donnée. Les indices de débits les plus couramment utilisés sont le Q10 et le Q95 qui rendent moins complexes les analyses et robuste les résultats des diverses études menées.

- **Extrêmes** : Dans le rapport de l'ONERC en 2018 sur les « Événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique », on lit que les événements climatiques sont qualifiés d'« extrêmes » lorsqu'une variable météorologique ou climatique prend une valeur située au-dessus (ou en dessous) d'un seuil proche de la limite inférieure (ou supérieure) de la plage des valeurs observés pour cette variable. OXFAM France 2022 qualifie quant à lui l'extrême en se basant sur la définition du climat dans son article « Les événements climatiques : quand la planète s'emballe », d'événements qui peuvent durer plusieurs semaines ou mois, comme une sécheresse par exemple, ou bien, au contraire, se déployer sur un temps très court, quelques heures ou quelques jours, mais marqués par une forte intensité. (Goubanova et Li, 2007), quant à eux qualifie d'« extrêmes », les différents types d'événements climatiques susceptibles de présenter des écarts importants à la normale climatologique. Pour le dictionnaire LAROUSSE, un « extrême » est ce qui dépasse les limites ordinaires, qui est très éloigné du juste milieu, de la moyenne. Cependant la juste définition ne peut être adoptée qu'en fonction du contexte dans lequel se situe l'étude. Enfin, la définition d'« extrêmes » selon (Benjamin, 2006) chargé de recherche à INRAE, fait appel à la notion d'impact et s'appuie sur les dégâts humains et économiques causés par ce phénomène.

Discutant des événements hydrologiques « extrêmes », ce sont particulièrement les crues des cours d'eau suivies des inondations ou des étiages à la suite du changement de certaines caractéristiques du bassin versants. Sur la base de ces découvertes, nous pouvons donc considérer pour cette étude qu'un événement hydrologiques extrêmes est tout événements se référant à des conditions hydrologiques exceptionnelles et pouvant occasionner des dommages

voire impacter les systèmes écologiques et la dynamique sociétale dans le secteur d'étude comme les inondations exceptionnelles (Freddy, 2020).

- **Stationnarité** : En hydrologie on utilise principalement ce terme pour qualifier une série temporelle de données dont les caractéristiques sont indépendantes du temps (D'après l'article du 12/04/2024 « Stationnarité (HU) » de Cerema). Une série de données est dite stationnaire, lorsque l'on ne trouve pas de variations temporelles significatives, autres que les fluctuations aléatoires dans les valeurs classées chronologiquement (Dany et al., 1997).

- **Rupture** : Selon (Lubes et al., 1994), une rupture est un changement brusque survenue dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées.

- **Tendance** : Une tendance représente une modification progressive des caractéristiques d'une variable aléatoire. Ces changements reflètent les fluctuations naturelles observées dans les séries de données liées aux phénomènes hydrologiques et climatiques (Lemoine 2003).

- **Centile** : En statistique descriptive, un centile est chacune des 99 valeurs qui divisent les données triées en 100 parts égales, de sorte que chaque partie représente 1/100 de l'échantillon de population. Le centile est calculé en tant que 100 quantiles donc :

le 1^{er} centile sépare le 1% inférieur des données

le 98^e centile sépare les 98% inférieure des données

Nous pouvons donc définir le i -ème percentile de n valeurs classées par ordre croissant comme étant la valeur de rang k égale à $p(n+1)/100$, arrondi à l'entier le plus proche de la valeur correspondant à ce rang. Une méthode alternative à l'arrondi consiste en l'interpolation numérique linéaire entre ces deux rangs.

- **MNT** : Les modèles numériques de terrain (MNT) parfois appelés modèles numériques d'élévation (MNE), sont des représentations de la topographie (altimétrie et /ou bathymétrie) de la terre nue qui peuvent être manipulés par des programmes informatiques pour obtenir toutes sortes d'indication sur la géométrie du terrain : valeurs de pentes, exposition, surface topographique, etc.

- **Pente** : La pente est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin. Elle est considérée comme une variable indépendante et donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct, donc sur le temps de concentration t_c et influence

directement le débit de pointe lors d'une averse. Plusieurs méthodes ont été développées pour estimer la pente d'un bassin. Toutes se basent sur une lecture d'une carte topographique réelle ou approximative. La méthode proposée par Carlier et Leclerc, 1964 consiste à calculer la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires comprises entre deux altitudes données. Une valeur approchée de la pente est alors donnée par la relation suivante :

$$i = ((D \times L)/A) \quad (1)$$

Où :

- i : pente [m/km ou ‰],
- L : longueur totale de courbes de niveau [km],
- D : équidistance entre deux courbes de niveau [m],
- A : surface du bassin versant [km²].

1.2.2. Etat des connaissances

La présente revue a pour objectif de situer l'état des connaissances sur les processus hydrologiques, dans le contexte de la caractérisation de la variabilité des extrêmes de débits hydrologiques.

Les recherches effectuées par (Fêmi et al., 2019) ont permis de détecter une rupture de stationnarité significative au seuil de 95% en 2007 dans la basse vallée de l'Ouémé après l'application du test de Pettitt. A partir de ce test les auteurs ont pu déterminer deux sous périodes dans la série chronologique. Il s'agit des périodes 1987-2007 déficitaire avec une moyenne du débit égale à 194 m³.s⁻¹ et 2008-2016 excédentaire, caractérisée par une moyenne de 221 m³.s⁻¹.

Les études de (Kodja et al., 2017) sur l'exutoire de Bonou en se basant sur les indices 90^{ème}, 95^{ème} et 99^{ème} percentiles ont permis de caractériser les fortes crues et les crues très extrêmes susceptibles d'occasionner les inondations. Selon ces auteurs, le secteur d'étude a connu trois sous périodes dans la série des débits (1951-1968, 1969-1987 et 1988-2015) dont la première et la troisième sont très humides contrairement à la deuxième où il y a eu une régression de ces débits.

Dans son travail sur la « Variabilité et tendances observés sur les débits moyens mensuels, saisonniers et annuels dans le bassin de la Falémé (Sénégal) », (Faye, 2017) révèle après l'application du test de Mann-Kendall qu'il juge efficace pour identifier les tendances négatives

du débit dans le bassin de la Falémé que sur une série de données de 1954-2014 il y a une tendance à la baisse statistiquement significative dans pratiquement tous les mois et dans les périodes de hauts et de bas débits. Il a aussi observé dans les années une tendance à faible débit durant lesquelles les périodes de hauts et de bas débit étaient moins marquées. Il a également affirmé que plus la station est en aval, plus la variabilité est importante (car l'écoulement y est plus important avec l'augmentation de la taille du bassin).

(Faye, 2018) dans son étude sur « Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : cas du bassin versant de la Gambie » a pu montrer que la pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin. Pour lui de très fortes pentes sont susceptibles de produire des écoulements de nature torrentielle, dans la partie amont du bassin qui sont à l'origine des crues dévastatrices sur la partie aval quand la partie amont est fortement boisée.

(Evi et al.,2018) ont pu déterminer 3.47 jours (300000 secondes) comme le temps maximal de transfert d'une goutte d'eau de l'amont à l'exutoire dans le bassin d'Agbaanh en Côte-d'Ivoire. Cela pourrait s'expliquer par l'occupation du sol représenté par le coefficient de rugosité de Manning, la pente moyenne et la variation des altitudes sur le bassin versant.

Les débits de pointe s'ajustent bien aux lois de Gumbel et Pearson III avec une marge d'erreur de 1 à 5 % écrivent (Koumassi et al.,2014) dans leurs articles « Analyse fréquentielle des événements hydro-pluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin ». Ils estiment que la loi de Gumbel peut être utilisée pour estimer la probabilité d'occurrence des crues et leurs périodes de retour.

(Freddy,2020) après les analyses fréquentielles sur plusieurs stations du Bénin avec plusieurs lois statistiques a conclu que les débits extrêmes minimaux s'ajustent mieux à la loi Log-normale et les débits extrêmes maximaux s'ajustent le mieux à la loi de Pearson type III avec une marge d'erreur de 1 à 5%.

1.3. But de la recherche

Cette recherche a pour but d'étudier la relation entre les fluctuations passées des débits extrêmes et la pente du bassin versant afin d'évaluer les probabilités d'apparition future pour une meilleure adaptation. Elle contribuera ainsi à une meilleure connaissance de l'évolution des débits extrêmes et constituera un outil d'aide de développement au Bénin.

1.4. Questions de recherches

Les questions suivantes ont été formulées :

- Des années de ruptures de stationnarité et des tendances significatives ont-elles été observées dans l'évolution des débits extrêmes (Q10, Q50 et Q95) ?
- Existe-t-il vraiment une corrélation entre la pente des sous bassins et les débits extrêmes observés au cours des années ?
- Quelles sont les lois statistiques qui s'ajustent le mieux aux Q10, Q50 et Q95 des sous bassins versants de l'étude et comment les débits extrêmes varient-ils en fonction des différentes périodes de retour ?

1.5. Objectifs du mémoire

1.5.1. Objectif général

L'objectif principal de notre mémoire est d'analyser l'évolution des données historiques des indices de débits extrêmes, en tenant compte de la pente du terrain tout en réalisant des projections futures sur les extrêmes.

1.5.2. Objectifs spécifiques

L'objectif général sera atteint à travers les trois objectifs spécifiques suivants :

- Analyser la variabilité interannuelle et les changements structurels des débits extrêmes (Q10, Q50 et Q95) des quatre sous bassins de la BMVO (Ahlan, Atchérigbé, Bonou et Domè).
- Déterminer l'existence d'une corrélation entre la pente de chaque sous bassins versant et les débits extrêmes observés.
- Estimer les débits extrêmes (Q10, Q50 et Q95) associés aux diverses périodes de retour (2, 5, 10 et 50 ans).

1.6. Résultats attendus

Les résultats attendus à la suite de cette étude se résument en une meilleure compréhension de l'évolution de la dynamique des débits extrêmes dans la basse et moyenne vallée de l'Ouémé. Il s'agira de trouver l'existence d'une corrélation entre les débits extrêmes et le gradient de terrain, d'avoir une connaissance sur les années de rupture et les tendances

dans les séries. Aussi les débits extrêmes Q10, Q50 et Q95 associés aux périodes de retour 2, 5, 10 et 50 ans seront connus.

Notre étude est répartie en quatre (04) chapitres :

Le premier volet est le présent chapitre intitulé « introduction générale ». Le second chapitre présentera les données, les matériels et méthodes utilisées, alors que le troisième chapitre sera réservé à la présentation des résultats. Pour finir, le quatrième chapitre portera sur la conclusion générale, les perspectives ainsi que les suggestions.

CHAPITRE 2 : DONNEES, MATERIELS ET METHODES

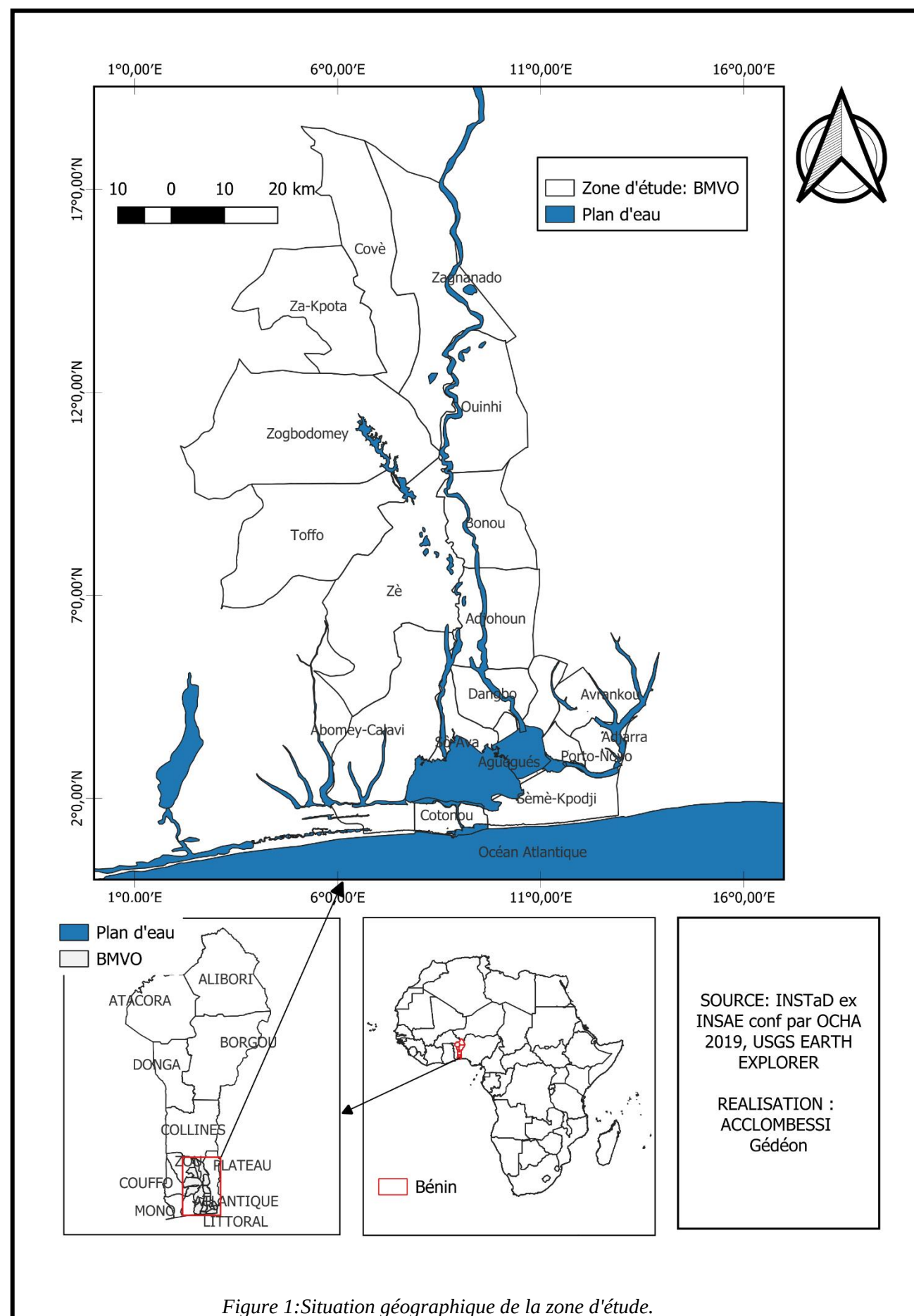
2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons le milieu d'étude (situation géographique, hydrographique, morphologique, climatique et pédologique). Nous exposerons ensuite les données et les méthodes utilisées pour analyser les tendances, identifier les ruptures, examiner la relation entre les débits extrêmes et la pente du terrain, et réaliser l'analyse fréquentielle.

2.2. Milieu d'étude

2.2.1. Localisation : Hydrographie et morphologie

Notre zone d'étude, est localisée dans la basse et moyenne vallée de l'ouémé en république du Bénin, un pays situé sur la côte ouest-africaine entre 6°17'0'' et 12°30' 00'' de longitude est et entre 1° et 3°40' de latitude nord . La zone d'influence directe de notre milieu d'étude est constituée de 19 différentes communes qui couvrent une superficie de 5 732.04 km² et est comprise entre 1°97'48'' et 2°57'24'' de latitude nord et entre 6°33'40'' et 7°52'0'' de longitude est (Figure 1).



La basse et moyenne vallée, objet de notre étude, est une partie du fleuve ouémé qui prend sa genèse dans la chaîne de l'Atacora. Ce fleuve se déploie sur un total d'environ 500 kilomètres puis change de direction vers le sud, orientation qu'il maintient tout au long de son parcours. En fin de parcours, il se sectionne en deux ramifications : l'une s'expulsant dans le lac Nokoué près de Cotonou et l'autre dans la Lagune de Porto-Novo.

2.2.2. Pédologie et Climat

▪ Pédologie

“Sols ferrugineux tropicaux, peu ferrugineux sur embouchure et granite” observés dans la commune de Zagnanado ; “sols ferrallitiques tropicaux, lessivés sans concrétion sur granite acide” dans la commune de Djidja, “sols hydromorphes moyennement organiques” dans la commune de Bonou ; “Vertisols sur roche basique” à covè. Les données de la base Bénin UTM 2018 nous a permis de constater que la pédologie de la basse et moyenne vallée de l'ouémé est constituée de 4 types de sols (Ferrallitiques, Ferrugineux, Hydromorphes et Vertisols) qui présentent diverses caractéristiques géologiques et minéralogiques. La variété de ces terres reste l'un des premiers facteurs de la diversification de l'agriculture dans le sud Bénin.

▪ Climat

Les 19 communes constituant la basse et moyenne vallée de l'ouémé sont toutes localisées dans le sud du Bénin (Figure 1), ce qui assujettit notre zone d'étude à un climat de type subéquatorial qui se résume à deux saisons sèches (de décembre à mars et de mi-juillet à mi-septembre) et deux saisons pluvieuses (d'avril à juillet et d'août à septembre) (Adam et Boko, 1993). D'après la classification de Köppen-Geiger il s'agit plus précisément, d'un climat tropical de savane à hiver sec (Aw). Globalement, la température maximale est au minimum de 28°C (en juillet) et au maximum de 32°C (en janvier) (METEO- BENIN, 2020). Les précipitations mensuelles vont de 58 mm à environ 300 mm avec des maxima de pluies obtenus en juin pour la grande saison des pluies et en octobre pour la petite saison des pluies (ASECNA, 2004) (Figure 2).

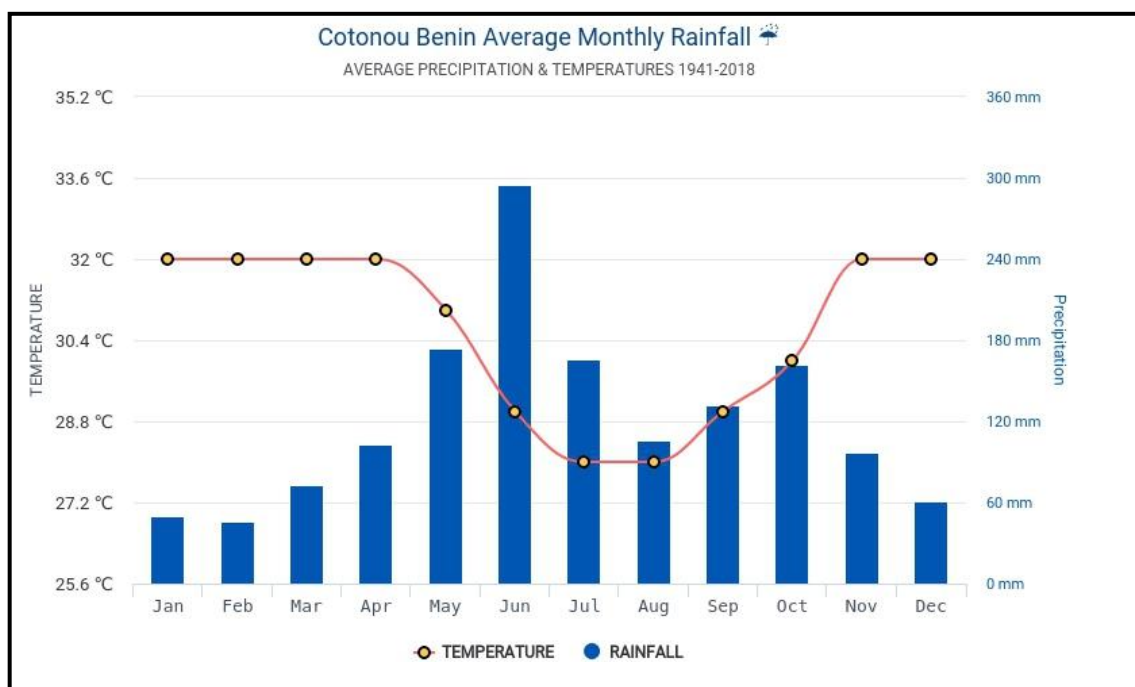


Figure 2: Variabilité mensuelle de la température et de la pluie au sud-Bénin

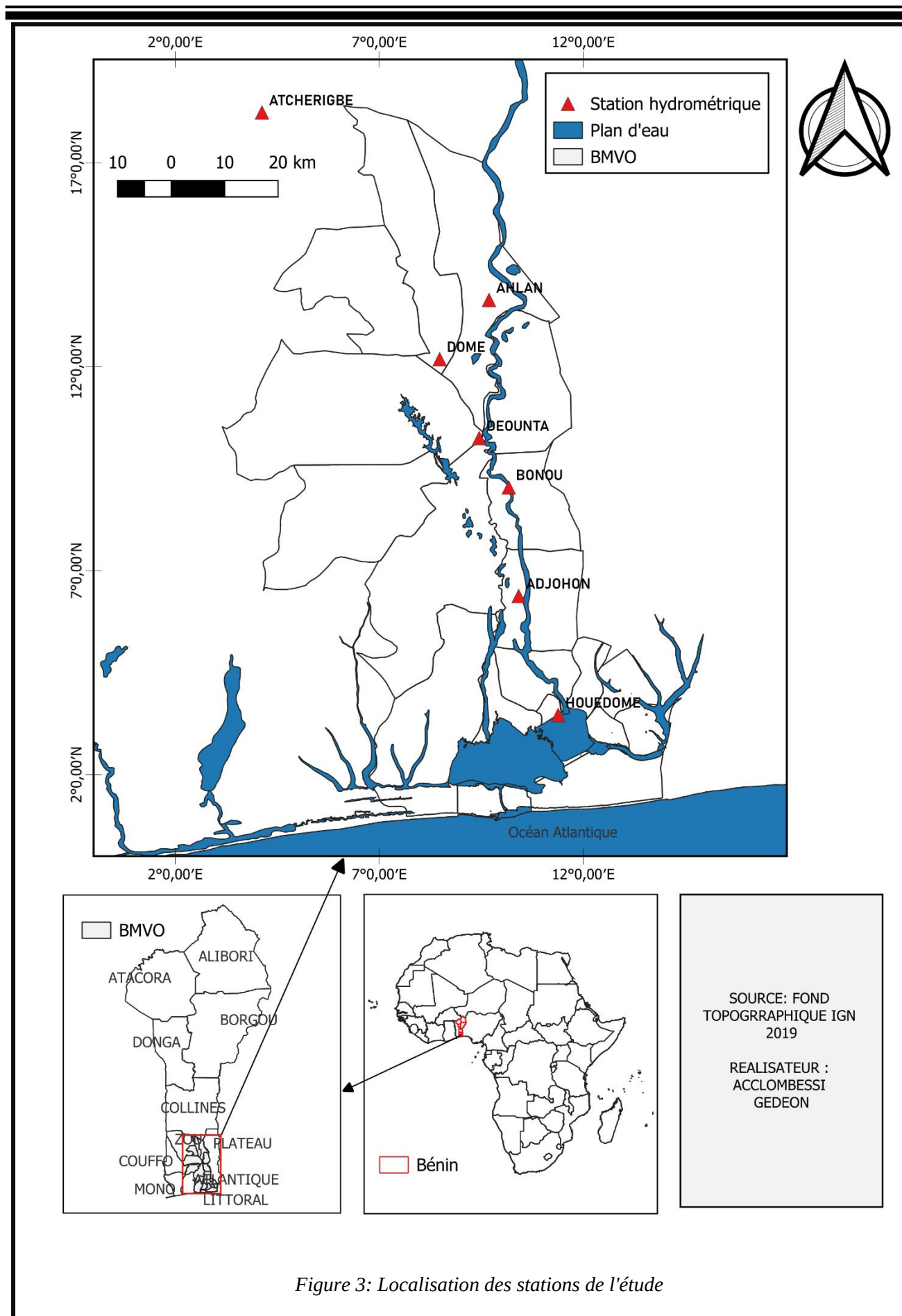
2.3. Données utilisées

Nous avons obtenu des données de débits journaliers à la Direction Générale de l'Eau (DGEau). Ces données proviennent des stations hydrométriques et s'étendent sur la période de 1990 à 2022 (Tableau 1). Notre étude traite des données hydrométriques sur une période de 33 ans (1990 à 2022) parce que l'étude des débits extrêmes nécessite une grande série de données pour une meilleure caractérisation et pour une meilleure description. De plus, cette série de données est la plus longue et contient moins de lacune sur l'ensemble des quatre sous bassins versants (Ahlan, Atchéribé, Bonou et Domè) de l'étude.

Tableau 1: Les sous bassins versants de l'étude

NOM	LONGITUDE	LATITUDE	PERIODE
Ahlan	7,21° E	2,46° N	1990 – 2022
Atchéribé	7,53° E	2,03° N	1990 – 2022
Bonou	6,9° E	2,45° N	1990 – 2022
Domè	7,11° E	2,33° N	1990 – 2022

Les MNT (Modèles Numériques de Terrain) de la basse et moyenne vallée de l'ouémé téléchargés directement sur le site Earthdata de la NASA avec une résolution spatiale de 30 mètres sur trois différentes années (2014, 2018 et 2023).



2.4. Méthodes

2.4.1. Collecte des données

Elle inclut en premier lieu la recherche des documents scientifiques et généraux ayant abordé des thématiques similaires, ce qui nous a permis d'avoir une meilleure compréhension des aspects clés à aborder au cours de notre étude et comment y procéder. Après, nous avons collecté des données hydrométriques et cartographiques pour mener à bien notre recherche.

2.4.2. Contrôle de la qualité des données

▪ Données hydrométriques

Un soin particulier a été apporté à la qualité des données pour garantir la précision de l'analyse. Les données des quatre stations hydrométriques, disponibles de 1990 à 2022, sont relevées au pas de temps journalier et présentent des lacunes sous formes de données manquantes pour certains jours. Pour le prétraitement, plusieurs analyses ont été réalisées, parmi lesquelles :

- **Calcul du pourcentage de lacunes** : Les cellules contenant des données manquantes ont été signalées par la notation NA, facilitant ainsi l'identification des positions exactes des lacunes dans les ensembles de données. La gestion des données hydrométriques nécessite une prise en charge précise des valeurs manquantes pour garantir la fiabilité des analyses. Dans ce contexte, l'exclusion des années présentant plus de 25% de lacunes a été retenue comme critère. Si une année présente plus de 20-25% de données manquantes, l'imputation devient risquée. Au-delà de ce seuil, les résultats risquent d'être biaisés ou peu représentatifs des conditions réelles (Little et Rubin, 2002). L'adoption d'un seuil de 25% nous permettra de maintenir l'équilibre entre la qualité des données et la robustesse des résultats.
- **Gestion des lacunes dans les séries hydrométriques et imputations** : Au niveau des différentes années de la première décennie de Atchérigbé, nous avons obtenu une marge de données manquantes comprise entre 11,23% et 24,93%. Concernant les autres stations ainsi que la suite des données de Atchérigbé hormis la première décennie, nous avons obtenu une marge de données manquantes comprise entre 0,27% et 6,02%. Ces données manquantes restantes dans les séries hydrologiques considérées ont été imputées à l'aide du package Zoo du langage de programmation R. La fonction “na.approx” a été utilisée pour cette imputation, une méthode basée sur l'interpolation

linéaire. Elle estime les valeurs manquantes en calculant des valeurs intermédiaires proportionnelles aux observations adjacentes, supposant une évolution linéaire des débits entre deux points connus. Cette approche nous a permis de constituer une série chronologique complète et plus fiable, dépourvue d'une grande marge d'incertitudes sur les résultats..

2.4.3. Méthodes de traitement des données

2.4.3.1. Variabilité interannuelle des débits extrêmes : indices révélateurs des fluctuations et tendances hydrologiques.

L'analyse de la variabilité des débits extrêmes nécessite une étude de stationnarité de ces dernières après leur détermination dans la série chronologique complète. Ces indices (Q10, Q50 et Q95) traduisent la fréquence, l'intensité et les tendances des événements hydrologiques extrêmes.

2.4.3.1.1. Détermination des valeurs des quantiles

Calcul des centiles 10, 50 et 95

Le calcul des percentiles a été fait grâce à Excel 2019.

- Pour calculer le 10^e centile, nous avons utilisé la fonction Excel CENTILE (*plage des données ; 0,10*)
- Pour calculer le 50^e centile, nous avons utilisé la fonction Excel CENTILE (*plage des données ; 0,50*)
- Pour calculer le 95^e centile, nous avons utilisé la fonction Excel CENTILE (*plage des données ; 0,95*)

2.4.3.1.2. Détection de tendance et de rupture au sein des séries hydrométriques

❖ Tendence

▪ Test de Mann-Kendall (Mann, 1945 ; Kendall, 1975)

L'étude de la tendance est un outil capital pour une meilleure caractérisation de l'évolution d'un phénomène naturel ou d'un paramètre donné. Généralement, cette tendance est souvent analysée par le test de Mann-Kendall pour étudier sa présence ou son absence dans une série chronologique donnée.

Le test de Mann-Kendall, d'abord étudié par Mann (1945) puis repris par Kendall (1975), et par la suite améliorée par Hirsch et al. (1982, 1984), qui ont permis de prendre en compte une composante saisonnière à partir de la variabilité mensuelle des données est un test statistique non paramétrique pour détecter la présence d'une tendance monotone au sein d'une série chronologique en absence de toute saisonnalité ou autres cycles.

La statistique de Mann-Kendall s'exprime comme suit :

$$S_n = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (2)$$

Où n est la longueur de la série ; x_i et x_j sont des valeurs génériques de données séquentielles, et la fonction $\text{Sgn}(x_i - x_j)$ est défini par :

$$\text{Sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_i - x_j) > 0 \\ 0 & \text{si } (x_i - x_j) = 0 \\ -1 & \text{si } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Dans cette hypothèse, S est approximativement une distribution normale avec la moyenne $E(S)$ et la variance $\text{var}(S)$ définies respectivement par les équations suivantes :

$$E(S) = 0 \quad (4)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q tp(tp-1)(2tp+5)] \quad (5)$$

Où n est le nombre de données non manquantes nombres de valeurs dans le groupe p , et q le nombre de rang *ex aequo*. Le second terme de l'équation (4) représente un ajustement de données liées ou censurées. Les valeurs de S et de $\text{var}(S)$ servent au calcul du test statistique standardisé Z qui s'écrit sous la formule suivante :

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{Si } S > 0 \\ 0 & \text{Si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{Si } S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

La présence d'une tendance statistiquement significative est évaluée en étudiant la valeur de Z .

$$\begin{cases} Z > 0 & \text{tendance monotone croissante} \\ Z < 0 & \text{tendance monotonne décroissante} \end{cases}$$

Le test de tendance de Mann-Kendall requiert que les observations soient indépendantes. Dans le cas où il y a une autocorrélation dans la série, on montre que la variance peut être sous-estimée. Pour y remédier, plusieurs améliorations ont été suggérées.

Le logiciel d'analyse de données, de statistiques et de modélisation, Xlstat offre de très nombreuses fonctionnalités spécifiques et propose deux méthodes alternatives. La première publiée par Hamed et Rao (1998) fonctionne bien dans le cas d'absence de tendance dans la série et permet d'éviter de conclure qu'il y a une tendance lorsque cela est en fait dû à l'autocorrélation. La seconde publiée par Yue et Wang (2004) présente l'avantage d'être plus fiable lorsqu'il y a bien une tendance et une autocorrélation.

Le langage de programmation Python a été utilisé pour l'application du test de tendance de Mann-Kendall dans le cas de notre étude.

▪ Test de Sen-Theil

Le test de Sein-Theil développé par Henri Theil en 1950 et Pranab K. Sen en 1968 et connu pour sa robustesse face aux distributions non normales et aux valeurs aberrantes est un test non paramétrique utilisé pour estimer la pente de tendance d'une série temporelle. Dans le test de Sen, un ensemble de pentes Q_{jk} est estimée pour chacune des $n(n-1)/2$ paires de données de la manière suivante :

$$\forall k \in [1, n-1], \forall j \in [k+1, n], Q_{jk} = \frac{x_j - x_k}{j - k} (j > k) \quad (7)$$

La pente de Sen est alors la médiane de l'ensemble des pentes Q_{jk} estimées. Elle s'exprime en unité de concentration par an ou en pourcentage par an. Elle peut être assortie d'un intervalle de confiance (en général 95%).

Le langage de programmation python a été utilisé pour l'application du test de Sen-Theil.

❖ Ruptures

Le logiciel Khronostat 1.01 a été utilisé pour l'application des divers tests de déterminations de ruptures dans la série chronologique d'extrêmes considérés.

Parmi ces tests, nous avons :

▪ Le test de Pettitt

Le fondement de Mann-Whitney a été repris et modifié par Pettitt (1979). Le test de Pettitt est un test sur le rang : il est donc non paramétrique et libre. Ce test est réputé robuste et ses performances en termes de puissance sont supérieures à celles de Wilcoxon et de sa version adaptée à l'étude de la stationnarité.

Statistique du test :

$$U(t) = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{signe}(x_i - x_j) \quad (8)$$

$$T = \max\{|U(t)|, t = 1 \dots n\} \quad (9)$$

Variante :

$$K = \max \left\{ \left| \frac{U(t)}{\sqrt{nt-t^2}} \right|, t = 1 \dots n \right\} \quad (10)$$

Notations :

Signe : $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$

$\forall x \in \mathbb{R} \rightarrow \text{signe de } (x)$

$$\text{Telle que : } \begin{cases} \forall x > 0, \text{signe}(x) = 1 \\ \forall x = 0, \text{signe}(x) = 0 \\ \forall x < 0, \text{signe}(x) = -1 \end{cases} \quad (11)$$

Calcul de la probabilité p, probabilité de dépassement de la valeur k prise par la statistique T du test sur la série observée.

$$P = P(T \geq k) = 2 \exp \left(\frac{-6k^2}{r^2 + r'^2} \right) \quad (12)$$

Si $p < \alpha$ alors l'hypothèse nulle est rejetée

En ce qui concerne la statistique K, $\ll p \gg$ peut être calculée à l'aide de la méthode du Bootstrap.

▪ **La procédure de segmentations de Hubert**

Hubert (1989) a développé une procédure de segmentation de série temporelle adaptée à la recherche d'une ou plusieurs ruptures. Celle-ci décompose la série initiale en un certain nombre de sous-séries selon une technique des moindres carrés. Le test de Scheffe (1959) permet ensuite de s'assurer que la différence entre les moyennes de deux sous-séries consécutives n'est pas négligeable.

La condition d'application est la normalité des données (application du test de Scheffe).

Notations :

Considérons une série temporelle de n observations notée $\{x_i, i = 1 \dots n\}$ divisée en m segments ($m \in [1 ; n]$). Pour tout k compris entre 1 et m , soit i_k le rang dans la série initiale du dernier élément du $k^{\text{ième}}$ segment. Posons, de plus, $i_0 = 0$. Pour tout k , nous noterons X_k la moyenne des termes de la $k^{\text{ième}}$ sous-série et n_k le nombre d'éléments qu'elle contient.

Soit :

$$d_k = \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i_k} (x_i - X_k)^2 \text{ et} \quad (13)$$

$$D_m = D(i_1, i_2, \dots, i_m) = \sum_{k=1}^m \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i_k} (x_i - X_k)^2 = \sum_{k=1}^m d_k \quad (14)$$

L'élément d_k représente l'écart quadratique entre le segment k et les éléments associés de la série initiale. D_m représente l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée. (Laib Rahma 2019) ; (Freddy 2020)

Le test de Pettitt (Pettitt, 1979) a été utilisé pour détecter les ruptures uniques tandis que la recherche des ruptures multiples s'est faite avec la procédure de segmentation de Hubert. L'applicabilité de ces deux méthodes a été vérifiée avec beaucoup de succès dans de nombreuses études en Afrique de l'ouest (Paturel et al., 1998 ; Lubes-Niel et al., 1998).

▪ La statistique de Buishand (BUISHAND, 1982,1984)

La statistique de Buishand est dérivée d'une formulation originale donnée par GADNER (1969). La statistique de Gardner utilisée pour un test bilatéral de rupture en moyenne à un instant inconnu s'écrit

$$G = \sum_{k=1}^{N-1} P_k \left\{ \frac{S_k}{\sigma_x} \right\}^2 \text{ avec } S_k = \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X}) \quad (15)$$

P_k désigne la probabilité a priori que la rupture survienne juste après la $K^{\text{ième}}$ observation.

Cette formulation suppose que la variance σ_x^2 est connue. Si elle est inconnue, elle peut être remplacée par la variance de l'échantillon D^2_x et si P_k est choisie uniforme, on obtient finalement la statistique U définie par

$$U = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} \left(\frac{S_k}{D_x} \right)^2}{N(N+1)} \text{ avec } D^2_x = \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 / N \text{ (Lubes-Niel et al, 2024)} \quad (16)$$

Des valeurs critiques de la statistique U ont été d'abord données par BUISHAND (1982) à partir d'une procédure de Monte Carlo (BUISHAND, 1984).

Toutefois, il n'arrive qu'aucun de ces tests ne détecte de rupture. Pour ce fait une autre méthode a été explorée dans cette étude : celle de l'Entropie-Croisée.

- **La méthode de l'entropie-croisée**

La méthode de l'Entropie-croisée appelée en anglais Cross-Entropy (CE) est l'un des plus importants développements en optimisation stochastique et la simulation au cours de ces dernières années (Morio, Rudy et François, 2011). Proposée par Rubinstein et Kroese en 2004, elle est une méthode générale d'optimisation de type Monte Carlo, combinatoire ou continue et d'échantillonnage préférentiel. La méthode a été conçue à l'origine pour la simulation d'événements rares, où des densités de probabilité très faibles doivent être estimées correctement.

Elle est de plus en plus utilisée dans divers domaines. Récemment, la méthode de la CE a été appliquée avec succès à l'estimation des probabilités d'événements rares dans les modèles dynamiques, en particulier les modèles de files d'attente impliquant à la fois lourdes distributions d'entrée de la lumière et de queue (Rubinstein, 2002, 2004). En plus de simulation d'événements rares et optimisation combinatoire, le procédé de la CE peut être efficacement appliqué pour analyser la série chronologique des données de débits pour l'identification d'éventuelles ruptures. La méthode CE est implémentée sous le logiciel R avec le package « breakpoint ». Elle est utilisable sous la version 4.4.1 de R.

2.4.3.2. Corrélation gradients-terrain et débits extrêmes

La corrélation entre les gradients topographiques et les débits extrêmes est un facteur important dans l'hydrologie des bassins. En effet, les pentes abruptes accélèrent le mouvement des eaux des bassins, entraînant un ruissellement rapide et une réponse hydrologique plus directe en cas d'un événement pluvieux. Cette dynamique affecte particulièrement les crues et les débits extrêmes, comme le montre l'étude d'El Garouani (2009), où le ruissellement des eaux augmente rapidement dans les zones à forte pente et amplifie le risque d'inondation. De plus, les pentes modulent le débit dans les zones à faible pente où l'eau s'écoule plus lentement, modifiant ainsi la réponse hydrologique et les niveaux d'inondation.

Cette relation souligne l'importance de prendre en compte la morphologie du terrain pour évaluer l'évolution des événements hydrologiques extrêmes.

▪ Taux d'accroissements

Le taux d'accroissement est en fait la dérivée de la pente par rapport à la distance. Il permet d'évaluer si le terrain devient plus pentu (convexité positive), moins pentu (convexité négative) ou si la pente reste constante (convexité nulle) au fil des ans sur la période de référence considérés (Andrés, 2007)

Soit f une fonction définie sur un intervalle I de $\mathbb{R}$ et $a \in I$. Soit h un nombre réel non nul, proche de Zéro, tel que $a + h \in I$. Alors le taux d'accroissement de la fonction f entre a et $a + h$, est le nombre réel :

$$r(a; a + h) = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(a+h) - f(a)}{h} \quad (17)$$

C'est le coefficient directeur de la droite (AM) où $A(a; f(a))$ et $M(a + h; f(a + h))$

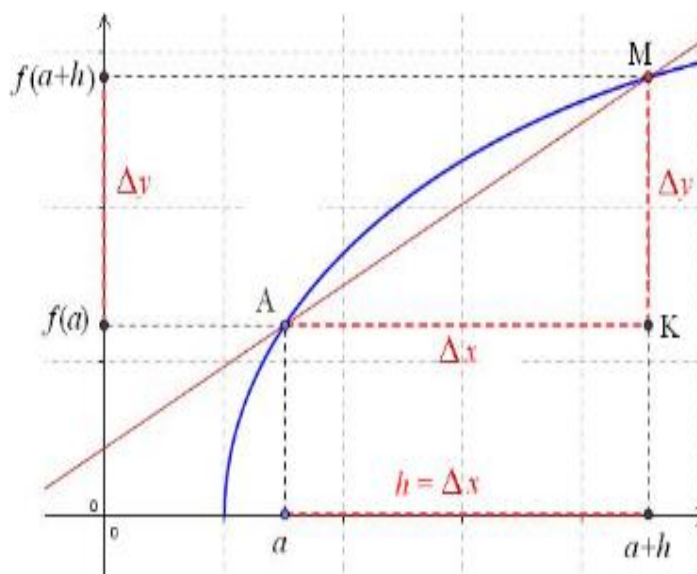


Figure 4: Taux (τ) d'accroissement entre a et $a+h$

Le langage R peut être utilisé pour approximer cette dérivée avec des fonctionnalités de calcul de taux d'accroissement plus avancés et sophistiqués afin de pouvoir confirmer l'existence d'une corrélation ou non entre le gradient de terrain – débits extrêmes.

2.4.3.3. Analyse fréquentielle des débits extrêmes

En analyse de données on parle d'analyse fréquentielle pour désigner un ensemble de méthodes statistiques qui a pour objectif la détermination des probabilités d'occurrence d'un événement spécifique et par conséquent les périodes de retour ou les fréquences d'apparition

d'un ensemble d'événements. En hydrologie ce traitement concerne les données de pluies, de débits, etc. (Article du 16/04/2024 « Analyse fréquentielle » de Wikihydro).

L'analyse fréquentielle fait appel à diverses techniques statistiques de prédiction qui se repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel, qui est une équation décrivant le comportement statistique d'un processus et constitue une filière complexe qu'il convient de traiter avec beaucoup de rigueur.

Ces principales étapes peuvent être schématisées très simplement selon le diagramme ci-dessous (Meylan et al.,1999) :

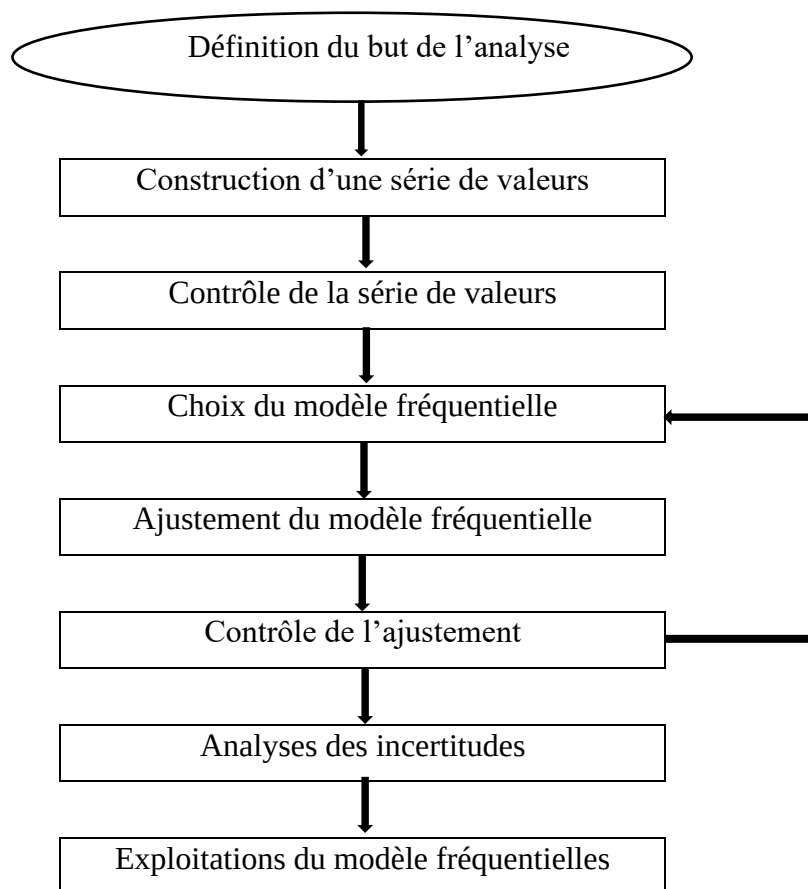


Figure 5: Principales étapes de l'analyse fréquentielles

2.4.3.3.1. Définition du but de l'analyse

Le but de cette analyse statistique est de décrire l'évolution des débits extrêmes pour déterminer leur probabilité d'occurrence sur les sous bassins versants étudiés.

2.4.3.3.2. Construction d'une série de valeurs

Cette partie s'est intéressée à la constitution des données hydrométriques annuelles. La disponibilité des séries de données de débits sur les différentes zones d'étude, ont permis d'extraire les données essentielles pour la constitution du répertoire de données d'étude sur une période de 33 ans (1990 à 2022).

2.4.3.3.3. Contrôle de la série de valeurs

– Test d'indépendance (Wald-Wolfowitz)

Le test de Wald-Wolfowitz permet de vérifier l'indépendance mutuelle des données. Etant donné un échantillon de taille $N(x_1, \dots, x_N)$, le test de Wald-Wolfowitz considère la variable statistique R telle que :

$$R = \sum_{i=1}^{N-1} x_i x_{i+1} + x_1 x_N \quad (18)$$

Lorsque les éléments de l'échantillon sont indépendants, R suit asymptotiquement une distribution normale dont la moyenne et la variance peuvent être déduites des équations suivantes :

$$\bar{R} = \frac{s_2^2 - s_4}{N-1} - \bar{R}^2 + \frac{s_1^4 - 4s_1^2 s_2 + 4s_1 s_3 + s_2^2 - 2s_4}{(N-1)(N-2)} \quad (19)$$

Où $s_r = Nm', m'_r$ étant le $r^{ième}$ moment de l'échantillon autour de l'origine.

La quantité $(R - \bar{R})/(\text{Var}(R))^{1/2}$ suit une distribution normale standardisée (de moyenne 0 et de variance 1) et peut être utilisée pour tester au niveau α l'hypothèse d'indépendance en comparant $|n|$ avec la variable normale standard $u_{\alpha/2}$ correspondant à la probabilité de dépassement $\alpha/2$.

– Test de stationnarité (Kendall)

C'est un test de rang non paramétrique permettant de jauger l'importance d'une tendance.

– Test d'homogénéité (Wilcoxon)

Le contrôle de la série de valeurs permet de discerner l'hétérogénéité de la série à étudier. Il est relaté que l'ajustement d'une distribution à un échantillon requiert que les observations soient identiquement distribuées. Cette hypothèse peut être examinée à l'aide de tests statistiques. Nombreux tests statistiques sont utilisés pour vérifier l'homogénéité d'une série statistique, et dans le cas de notre étude, le test de Wilcoxon a été retenu.

– **Représentation du test de Wilcoxon :**

C'est un test non paramétrique qui utilise la série des rangs des observations, au lieu de la série de leurs valeurs. Le test de Wilcoxon se base sur le principe suivant :

Si l'échantillon X est issu d'une même population Y, l'échantillon X U Y (union de X et de Y) en est également issu.

On procède ainsi :

Soit une série d'observations de longueur N à partir de laquelle on tire deux échantillons X et Y : N1 et N2 sont respectivement les tailles de ces échantillons, avec $N = N1 + N2$ et $N1 \leq N2$

On classe ensuite les valeurs de notre série par ordre croissant. Par la suite, nous ne nous intéresserons qu'au rang de chacun des éléments des deux échantillons dans cette série, si une valeur se répète plusieurs fois, on lui associe le rang moyen correspondant.

On calcul ensuite la somme W_x des rangs des éléments du premier échantillon dans la série commune :

$$W_x = \sum RangX \quad (20)$$

Wilcoxon a montré que, dans le cas où les deux échantillons X et Y constituent une série homogène, la quantité W_x est comprise entre deux bornes W_{max} et W_{min} données par les formules suivantes :

$$W_{min} = \frac{(N_1 + N_2) \cdot (N_1 - 1)}{2} - Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{N_1 \cdot N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12}} \quad (21)$$

$$W_{max} = (N1 + N2 + 1) \cdot N1 - W_{min} \quad (22)$$

$Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$: représente la valeur de la variable centrée réduite de la loi normale correspondant à $1 - \frac{\alpha}{2}$ (au seuil de confiance de 95% nous avons $Z_{1-\frac{\alpha}{2}} = 1.96$ (Sari A., 2002).

La série est homogène si la condition $W_{min} < W_x < W_{max}$ est vérifiée.

2.4.3.3.4. Choix du modèle fréquentiel

Il n'existe pas de méthode universelle et infaillible pour l'analyse fréquentielle. La validité des résultats d'une analyse fréquentielle dépend du choix du modèle fréquentielle et énormément de son type (Meylan et Musy, 1999) effectué à partir de divers pistes, contributeur et facilitateur de l'adoption d'un meilleur choix.

Il existe une multitude de lois mathématiques dans le monde utilisées en hydrologie fréquentielle relative à l'étude des événements extrêmes. En Afrique de l'Ouest, et en particulier au Bénin dans le bassin de l'Ouémé, plusieurs lois ont fait l'objet de plusieurs travaux (Amoussou et al., 2014 ; Le Barbé et al., 1993 ; Ringo et al 2013 ; Bacharou et al., 2015 ; Koumassi et al., 2014).

En hydrologie, le choix du modèle probabiliste est fréquemment influencé par les méthodes utilisées localement, lesquelles finissent par devenir des références établies.

Pour cette étude, les modèles probabilistes choisis sont ceux qui offrent la meilleure adéquation statistique et un ajustement optimal. Les six lois citées ci-dessous sont réparties respectivement par paire pour les trois différents extrêmes Q10, Q50 et Q95 :

- **La loi doublement exponentielle (Loi de Gumbel)** (Kouassi et al., 2019 ; Ngoundjou et al., 2012)
- **La loi log normale (Galton)** (Zoungrana et al., 2015 ; Freddy, 2019)
- **La loi Gamma** (Kouassi et al., 2019 ; Adjomayi et al., 2013)
- **La loi Gamma généralisée** (Abiodun et al., 2009)
- **La loi du Pearson type III** (Bacharou et al., 2015 ; Freddy, 2019)
- **La loi Généralisée des Valeurs Extrêmes (GEV)** (Koumassi et al., 2014 ; Amani et al., 2018)

2.4.3.3.5. Ajustement du modèle fréquentiel

Etude des propriétés statistiques d'une série :

- **La moyenne arithmétique**

La moyenne est le premier moment centré par rapport à l'origine. C'est la valeur la plus utilisée en pratique pour caractériser l'ordre de grandeur des observations (Bennis S., 2004).

La moyenne arithmétique est calculée par la relation suivant :

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Ri \quad (23)$$

$\bar{R}$: Valeur moyenne

Ri : Valeur « i » dans la série

N : nombre de la grandeur de la série

– L'écart-type

L'écart-type indique la dispersion des observations autour de la moyenne, c'est le paramètre de dispersion (Samokhin et al., 1980) :

Pour $N > 30$:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (24)$$

Pour $N < 30$:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (25)$$

– Le coefficient de variation

Pour obtenir un nombre abstrait indépendant des unités de mesure et permettant de comparer les dispersions dans différentes séries hydrologiques, on utilise le coefficient de variation qui est représenté par le rapport entre l'écart-type et la moyenne.

On définit aussi :

$$Cv = \frac{S}{R} \quad (26)$$

Qui compare donc la fluctuation à la valeur moyenne (Bois et al., 2007)

– Le 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 :

$$C_s = \frac{N \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{(N-1)(N-2)s^3} \quad (27)$$

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.

– Le coefficient d'aplatissement

$$c_k = \frac{m_4}{m_2^2} \quad (28)$$

Avec :

m_4 : moment centré d'ordre 4

m_2 : le moment centré d'ordre 2. Il se confond avec la variance $m_2 = S^2$ (Lang et Lavabre, 2007).

Il peut être calculé aussi par :

$$ck = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{(N-1)S^4} \quad (29)$$

Si ck est négatif, la distribution est plus aplatie que la distribution normale ; la distribution est dite platikurtique.

Si ck est positif, la distribution est moins aplatie que la distribution normale ; la distribution est dite leptokurtique.

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

– Fréquence expérimentale

En hydrologie statistique, l'ensemble des observations de débits d'un cours d'eau sur une année forment une série de données annuelles, à partir desquelles divers paramètres sont extraits pour divers calculs dont le module annuel.

L'ensemble des modules annuels (moyennes des débits) obtenus à partir de toutes les observations possibles forme une population hypothétique de modules notée M . Cette population est théoriquement infinie, mais en pratique, on n'en observe qu'une petite partie, représentée par un échantillon E , qui correspond aux modules calculés sur une période déterminée de N années. On appelle

Fréquence expérimentale de r dans l'échantillon E :

$$F = \frac{n}{N} \quad (30)$$

Probabilité de r dans la population M :

$$Prob\left(\frac{r}{M}\right) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n}{N} \quad (31)$$

La réalisation est représentée par une valeur numérique, variable aléatoire X dont la fonction de répartition est :

$$F(x) = prob(X \leq x) \quad (32)$$

La dérivée de $F(x)$ est la densité de probabilité $f(x)$ de la variable aléatoire, et l'on peut écrire :

$$prob(b \leq x \leq a) = F(a) - F(b) = \int_b^a f(x)dx \quad (33)$$

Ceci représente l'analogie existant entre courbe de densité de probabilité et polygone des fréquences, entre fréquence expérimentale et probabilité théorique.

Pour la pratique des calculs de la fréquence expérimentale, on parle :

De fréquence au non-dépassement :

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad (34)$$

De fréquence au dépassement :

$$F(x) = \int_x^{+\infty} f(x)dx \quad (35)$$

La somme de ces fréquences $F(x) + F_1(x)$ est évidemment égale à 1 (Dubreuil A.,1974).

$$F_i = \frac{i-b}{n+1-2b} \quad (36)$$

est une formule empirique généralisée de la fréquence expérimentale où b est un paramètre quelconque fixe.

La formule de Hazen où $b=0.5$ est utilisée dans le cadre de notre étude.

La formule généralisée devient donc :

$$F_i = \frac{i-0.5}{n} \quad (37)$$

HYFRAN est le logiciel utilisé pour l'ajustement des lois statistiques.

C'est un logiciel d'ajustement de lois statistiques développé par l'équipe du Dr. B. Bobée et son groupe de recherche à l'Institut National de la Recherche Scientifique - Eau Terre et Environnement (INRS-ETE) de l'Université du Québec avec le parrainage d'Hydro-Québec, téléchargeable sur internet, qui possède les fonctionnalités suivantes :

- Vérification des hypothèses d'indépendance, d'homogénéité, de présence de tendances ou de valeurs singulières, d'adéquation des lois théoriques aux données observées.
- 16 lois d'ajustement : Exponentielle, GEV, Gumbel, Normale, Log-Normal, (deux ou trois paramètres), Weibull, Gamma (ou Pearson, deux ou trois paramètres), Gamma généralisée, Gamma inverse, Log-Pearson type 3, Halphen (type A, B et B-1) par trois méthodes (maximum de vraisemblance, moments, moments pondérés ;
- Calcul de quantiles avec intervalle confiance (avec les quantiles de loi Normal, ou par Bootstrap paramétrique) ;

- Interaction avec tableurs.
- **Présentation des lois choisies et la technique d'ajustement :**
- **La loi doublement exponentielle (Loi de Gumbel)**

La loi double exponentielle, ou loi de Gumbel, est la forme limite de la distribution de la valeur maximale d'un échantillon de n valeurs. Le maximum annuel d'une variable étant considéré comme le maximum de 365 valeurs journalières, cette loi doit ainsi être capable de décrire les séries de maxima annuels.

La fonction de répartition de la loi de Gumbel est la suivante :

$$F(X) = e^{-\alpha(x-x_0)} \quad (38)$$

$F(X)$: Fréquence au non dépassement (F.N.D)

α, x_0 coefficient d'ajustement

Y : Variable réduite de Gumbel, Liée à la probabilité attachée à la valeur X

$F(Y)$: fréquence au non dépassement de la variable réduite de Gumbel.

L'équation $Y = \alpha(x-x_0)$ peut être présenté par la forme suivant :

$$X = \frac{1}{\alpha}Y + x_0 \quad (39)$$

La technique d'ajustement est la méthode des moments qui conduit à des estimations de calcul particulièrement simples et d'emploi très fréquents.

L'expression (37) est la droite d'ajustement de Gumbel et les paramètres de cette droite sont liées entre eux par des relations suivantes :

$$\frac{1}{\alpha} = 0.780\delta \quad (40)$$

$$x_0 + \bar{x} - \frac{0.577}{\alpha} \quad (41)$$

$\bar{x}$: la moyenne de la série

δ : l'écart-type de la série

x_0 et α sont les coefficients d'ajustement.

– La loi log normale (Galton)

La loi Log-normale est utilisée dans de nombreux domaines. En hydrologie on l'utilise pour modéliser les lames d'eau écoulées ou précipitées en climats méditerranéens, arides et semi-arides (régimes irréguliers). Elle est également utilisée pour les débits de pointe et les courbes intensité-durée de précipitations.

La fonction de répartition de la loi log-normal est le suivant :

$$F(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{Z^2}{2}} dZ \quad (42)$$

Avec :

$$Z = \frac{\log Xi - \log \bar{X}}{\sigma \log Xi} \quad (43)$$

Les valeurs de $F(X)$ sont fournies par la table de l'intervalle de gauss en fonction de la variable réduite de gauss. La technique d'ajustement est la méthode du maximum de vraisemblance.

– La loi Gamma

Soit $\lambda > 0$, $a > 0$. La loi Γ est une loi de probabilité de densité

On dit que X suit la loi gamma de paramètres $p > 0$ et $\lambda > 0$, notée $\Gamma(p, \lambda)$, si elle admet pour densité

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\lambda^p}{\Gamma(p)} e^{-\lambda x} (\lambda x)^{p-1} & \text{Si } x > 0 \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (44)$$

Une telle variable aléatoire X admet alors une espérance et une variance donnés par

$$E(X) = \frac{p}{\lambda} \text{ et } V(X) = \frac{p}{\lambda^2} \quad (45)$$

Tandis que sa fonction caractéristique est

$$\phi_X(t) = \left(\frac{\lambda}{\lambda - it} \right)^p \quad (46)$$

Lorsque p est un entier, la loi gamma s'appelle encore loi d'Erlang. La loi d'Erlang de paramètre p et λ est la loi de la somme de p variables aléatoires indépendantes suivant une même loi exponentielle de paramètre λ . A ce titre, elle est la loi du temps d'attente séparant la survenue des événements k et $k + p$ dans un processus poissonien. (Pierron Théo, 2014)

– La loi Gamma généralisée

La loi Gamma généralisée est une extension de la loi Gamma introduisant un paramètre supplémentaire pour une flexibilité accrue dans l'ajustement des données. La densité de probabilité de la loi Gamma généralisée s'exprime sous la forme de :

$$f(x; k; \theta, c) = \frac{c}{\theta^k \Gamma(k/c)} x^{k-1} e^{-(x/\theta)^c} \quad (47)$$

Avec :

x : est la variable aléatoire,

k : est le paramètre de forme

θ : est le paramètre d'échelle

c : est le paramètre de forme supplémentaire qui permet d'ajuster la distribution

$\Gamma(k/c)$: est la fonction Gamma évaluée en (k/c)

– Loi de Pearson type III

Elle est régulièrement utilisée pour l'analyse fréquentielle des volumes correspondant aux crues maximales annuelles. Son intérêt majeur est une grande flexibilité de forme, qui en fait un outil susceptible de s'adapter à des histogrammes très variés. Cette méthode donne des estimateurs corrects et efficaces (Laborde, 2000 ; Soro et al., 2008). Elle peut même entrer en compétition avec les lois normales et log-normales.

La forme standardisée de la loi Pearson III est une transformation linéaire de la fonction gamma, La densité de probabilité de Pearson III est donné par :

$$P(X = x) = f(x) = \frac{|\alpha|}{\Gamma(v)} \exp[-\alpha(x - m)] [\alpha(x - m)]^{v-1} \quad (48)$$

Où :

$\Gamma(v)$ c'est la fonction Gamma,

α : est le paramètre d'échelle,

m : le paramètre de position et

v : le paramètre de forme.

– **La loi Généralisée des valeurs Extrêmes (GEV)**

La loi des extrêmes généralisée (GEV) représente dans le contexte asymptotique, la distribution du maximum de n variables aléatoires. Elle est une loi à trois paramètres représentés comme une généralisation de la loi de Gumbel.

La densité de probabilité est donnée par :

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{k}{\alpha} (x - u) \right]^{(1/k-1)} \exp \left\{ - \left[1 - \frac{k}{\alpha} (x - u) \right]^{1/k} \right\} \quad (49)$$

Les techniques d'ajustement utilisées est la méthode du maximum de vraisemblance qui consiste à considérer que les paramètres inconnus de la loi à ajuster doivent être tels qu'ils maximisent la probabilité d'apparition de l'échantillon observé.

Cette méthode est consistante et conduit à une autre estimation de l'écart-type :

$$\delta(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (50)$$

Les techniques d'ajustement utilisés sont : la méthode du maximum de vraisemblance et / ou la méthode des moments.

– **La méthode du maximum de vraisemblance :**

Cette méthode offre une approche générale à l'estimation de paramètres inconnus à l'aide de données. Soit $x_1, x_2, \dots, x_n$ un échantillon provenant d'une loi $F\theta(x)$, où θ est un paramètre inconnu qui peut être réel ou multivarié.

La fonction de vraisemblance, qu'il s'agit de maximiser, s'écrit :

$$V = \prod_{i=1}^n f\theta(x_i) \quad (51)$$

Où f est la densité de probabilité.

– **La méthode des moments :**

La méthode des moments consiste à évaluer les moments échantillonnés et les moments théoriques de la loi choisie. Soit $x_1, x_2, \dots, x_n$ l'échantillon de données à disposition.

Posons :

$$\mu = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (52)$$

Et

$$\sigma^2 = s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2 \quad (53)$$

Les estimateurs standard de la moyenne et de la variance.

On obtient donc les formules suivantes pour l'estimation par la méthode des moments :

$$\begin{cases} \hat{b} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \hat{\sigma} \\ \hat{a} = \hat{\mu} - \hat{b}\gamma \end{cases} \quad (54)$$

2.4.3.3.6. Contrôle de l'ajustement

- **Critères de comparaison des lois :**

Le meilleur modèle sera choisi sur la base de la comparaison numérique avec les critères Bayésien et d'Akaike. Ces deux critères permettent de choisir la loi la mieux ajustée en tenant compte de l'erreur d'estimation et de la parcimonie (nombre de paramètres à ajuster). La distribution pour laquelle les valeurs des deux critères sont les plus faibles est celle qui est sélectionnée.

- *Critère d'information Bayésien (BIC)*

En statistique, le critère d'information bayésien (BIC) ou critère de Schwarz (1978) est un critère destiné à la sélection du meilleur modèle (parmi un ensemble de modèles) d'ajustement de séries de données (Meddi et al., 2013). Il se note :

$$BIC = -2 \log(L) + 2\log(N) \quad (55)$$

Où:

L : la vraisemblance (la vraisemblance d'un échantillon est définie comme la probabilité de l'observer, c'est le produit des densités de probabilité des différentes valeurs (Djerboua, 2001))

K : le nombre de paramètres,

N : la taille de l'échantillon.

- *Critère d'information d'Akaike (AIC)*

Le critère d'information d'Akaike mesure la qualité de l'ajustement d'un modèle statistique. Il a été développé par Hirotugu Akaike en 1974 (Meddi et al., 2013).

L'expression de ce critère est la suivante :

$$AIC = -2 \log(L) - 2K \quad (56)$$

Avec :

L : la vraisemblance,

K : nombre de paramètres.

▪ Adéquation par le test de khi-carré (χ^2)

Pour faire le choix d'une loi de probabilité, il faut faire des tests d'adéquation (après avoir fait l'ajustement) de cette loi, à la variation donnée. Souvent des tests paramétriques sont utilisés pour permettre de tester la valeur des paramètres caractéristiques de la loi, et les tests non paramétriques sont utilisés pour permettre de déterminer le comportement de l'ensemble de la loi par rapport à l'échantillon observé.

On a plusieurs méthodes dont la méthode du test de khi-carré utilisé pour cette étude.

Le test du χ^2 prononcer « khi-deux » ou « khi carré » permet, partant d'une hypothèse et d'un risque supposé au départ, de rejeter l'hypothèse si la distance entre deux ensembles d'informations est jugée excessive.

Il est particulièrement utilisé comme test d'adéquation d'une loi de probabilité à un échantillon d'observations supposées indépendantes et de même loi de probabilité. Un test d'homogénéité concerne un problème voisin, la comparaison d'échantillons issus de populations différentes. De manière assez différente, un test d'indépendance porte sur des données qualitatives.

À la base d'un test statistique il y a la formulation d'une hypothèse appelée hypothèse zéro (H_0). Dans le cas présent, elle suppose que toutes les données considérées dérivent de la même loi de probabilité.

Ces données ayant été réparties en classes, il faut :

- déterminer le nombre de degrés de liberté du problème à partir du nombre de classes
- se donner a priori un risque de se tromper (la valeur 5 % est souvent choisie par défaut, mais il s'agit plus souvent d'une coutume que du résultat d'une réflexion)
- à l'aide d'une table de χ^2 , déduire en tenant compte du nombre de degrés de liberté la distance critique qui a une probabilité de dépassement égale à ce risque
- calculer algébriquement la distance entre les ensembles d'informations à comparer.

Comme critère de comparaison, la variable χ^2 est utilisée pour un risque $\alpha = 5 \%$ et un nombre de degré de liberté $V = k - 1 - m$,

K = nombre de classe

m = nombre de paramètres de la loi

$$\chi^2_{cal} = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i} \quad (57)$$

Où :

n_i : Nombre d'observations contenues dans la classe i

e_i : Nombre d'observations théoriques calculés dans la classe i

Ce nombre doit être supérieur ou égal à 5.

χ^2 est une variable aléatoire qui peut varier de 0 à ∞ .

L'hypothèse nulle H_0 est : la loi de distribution de fréquence théorique P ajuste la courbe ou droite expérimentale F ?

$H_0: P = F$ contre $H_1 : P \neq F$

Pour que $P = F$ soit vérifiée, il faut que :

$\chi^2_{calculée} \leq \chi^2_{théorique}$

Soit :

$\chi^2_{calculée} \leq \chi^2_{0.05}$

Une autre interprétation du $\chi^2_{calculée}$ 2 peut être faite :

Si $\chi^2_{calculée} = 0$ c'est-à-dire si le nombre de valeurs observées est égal au nombre de valeurs théoriques, l'ajustement est parfait et la loi théorique suit exactement la répartition des fréquences.

Si $P(\chi^2_{calculée}) > 5\%$, l'ajustement est à considérer.

Si $P(\chi^2_{calculée}) < 1\%$, l'ajustement est à rejeter, la loi considérée n'est pas adéquate.

Si $1\% < P(\chi^2_{calculée}) < 5\%$, on ne peut rien conclure, il faut refaire le calcul en modifiant le nombre de classes.

2.4.3.3.7. Analyse des incertitudes

- Intervalle de confiance :

C'est l'intervalle à l'intérieur duquel on peut trouver la vraie valeur du paramètre recherché.

L'intervalle de confiance possède trois propriétés. Son amplitude est d'autant plus grande que :

- Le degré de confiance (probabilité pour que la vraie valeur se trouve à l'intérieur de l'intervalle) est grand.
- La dispersion (c'est-à-dire l'écart quadratique moyen σ) est grande.
- La taille N de l'échantillon est réduite.

Il est bien de signaler que pour le dimensionnement des ouvrages, c'est-à-dire là où on considère les valeurs extrêmes, on adopte la borne supérieure de l'intervalle de confiance, alors que dans le cas des valeurs moyennes, on adopte la borne inférieure.

Pour un quantile x_p de probabilité p :

$$X_p - \frac{Z_{1-\alpha S}}{Z} \sqrt{\frac{2+Z^2 p}{2N}} < X_p < X_p + \frac{Z_{1-\alpha S}}{2} \sqrt{\frac{2+Z^2 p}{2N}} \quad (58)$$

Pour notre cas, on calcule l'intervalle de confiance à 95 %.

2.5. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de détailler les caractéristiques géographiques et environnementales de la zone d'étude, notamment sa localisation, son hydrographie, sa morphologie, son climat et sa pédologie. De plus, une méthodologie précise a été développée, dont l'application nous permettra de caractériser de manière rigoureuse l'évolution des indices de débits extrêmes au sein de la zone d'étude, en tenant compte des facteurs influents.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Introduction

Cette partie présente les résultats de l'évaluation issus de l'application des méthodologies développées dans le chapitre précédent, visant à répondre aux trois grandes questions qui découlent de nos trois principaux objectifs. Ces questions se concentrent sur les tendances et rupture en premier lieu ; de la dépendance des débits extrêmes du gradient de terrain et enfin de la meilleure loi statistique d'ajustement. Une application de ces approches méthodologiques à notre zone d'étude analyse en détail les résultats obtenus et leurs significations hydrologiques. Chaque sous partie de ce chapitre est dédiée à un objectif spécifique, suivie d'une discussion des résultats obtenus, afin de mieux comprendre l'évolution des débits. Cette partie nous permettra non seulement de valider les hypothèses formulées, mais aussi d'explorer les implications pratiques de ces résultats.

3.2. Approche statistique des variations et tendances hydrologiques interannuelles

3.2. 1. Variabilité interannuelle des débits extrêmes

L'étude de l'évolution d'un phénomène suggère d'abord l'analyse de son comportement à partir des informations recueillies sur son passé.

▪ Q10

La figure 6 nous présente la variabilité des débits annuels Q10 des quatre sous bassins de notre étude. De l'analyse des différents graphiques on constate que les Q10 au niveau du sous bassin de Ahlan ont une variabilité significative de $1,48 \text{ m}^3/\text{s}$ à $17 \text{ m}^3/\text{s}$ avec une moyenne de $4,98 \text{ m}^3/\text{s}$. A Atchérigbé les débits ont été quasi nuls sur une période de 25 ans , de 1990-2014, avant d'augmenter brusquement pour atteindre un pic de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2015. Par la suite, ils ont diminué progressivement jusqu'en 2022, où ils ont retrouvé une valeur nulle. Quant à Bonou et Domè, ils affichent également des variabilités importantes. Au niveau de Bonou, les débits ont varié de $0,70 \text{ m}^3/\text{s}$ à $23 \text{ m}^3/\text{s}$ avec une moyenne de $7,76 \text{ m}^3/\text{s}$ alors qu'à Domè ceux-ci ont une variation comprise entre $1,65 \text{ m}^3/\text{s}$ et $6,52 \text{ m}^3/\text{s}$ avec une moyenne de $2,72 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette variabilité observée aux stations de Ahlan, de Bonou et Domè pourrait être attribuée à un changement dans le régime des précipitations avec une alternance de périodes humides et sèches affectant les écoulements. Quant à la station de Atchérigbé où les débits ont été quasi nuls de 1990 à 2014, cela pourrait suggérer une situation de sécheresse prolongée, une

végétation dense favorisant l'absorption de l'eau, ou une intervention humaine telle que le captage de l'eau.

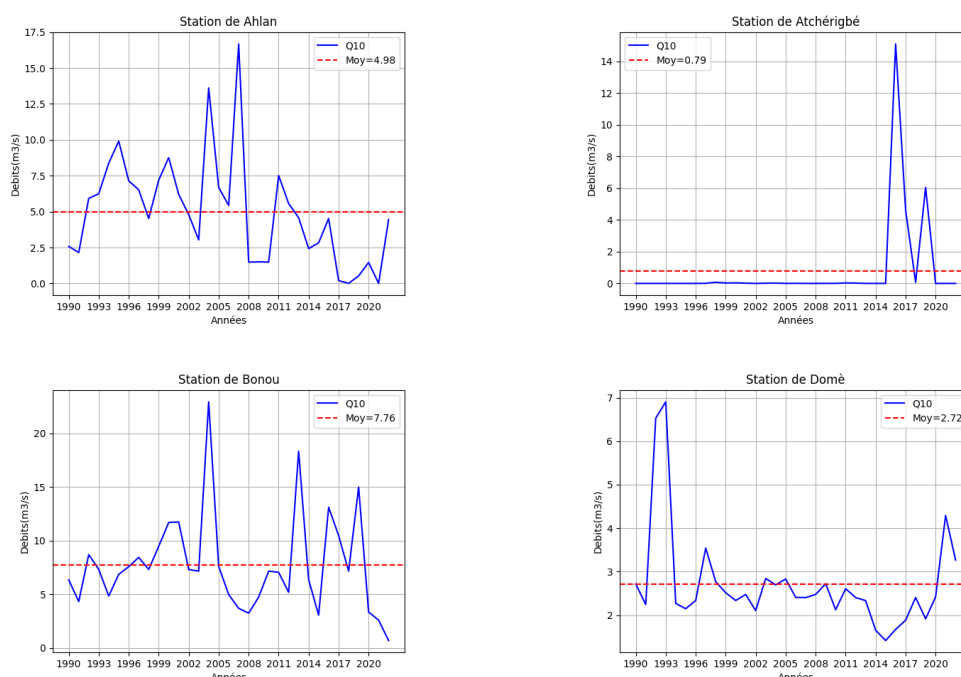


Figure 6: Variabilité des débits annuels Q10

■ Q50

L'analyse des quatre graphiques de la figure 7 présentant la variabilité des débits annuels Q50 donne des aperçus divergents pour les quatre stations de notre étude. La station de Ahlan et de Atchérigbé sont caractérisées par une forte variabilité, qui comprend des fluctuations brusques et progressives, notamment entre 1996 et 1997. Les débits varient entre 0,46 m³/s à 46 m³/s avec une moyenne de 17,63 m³/s à Ahlan tandis qu'à Atchérigbé celui-ci oscillent autour de 0,18 m³/s et 27 m³/s avec une moyenne de 4,91 m³/s. Toutefois, Bonou et Domè présentent une faible variabilité, y compris des réductions remarquables entre 1991 et 1993 suivies par des rebonds, qui ont abouti à des augmentations brusques en 2013 et 2009. En particulier, à Bonou, le débit entre 1990 et 2022 a une moyenne de 36,68 m³/s tandis que celui de Domè est de 7,86 m³/s. Cette variabilité observée au niveau des Q50 peut être liée à l'urbanisation ; à une stabilité des conditions climatiques à long terme ou à une influence de changements climatiques à moyen terme.

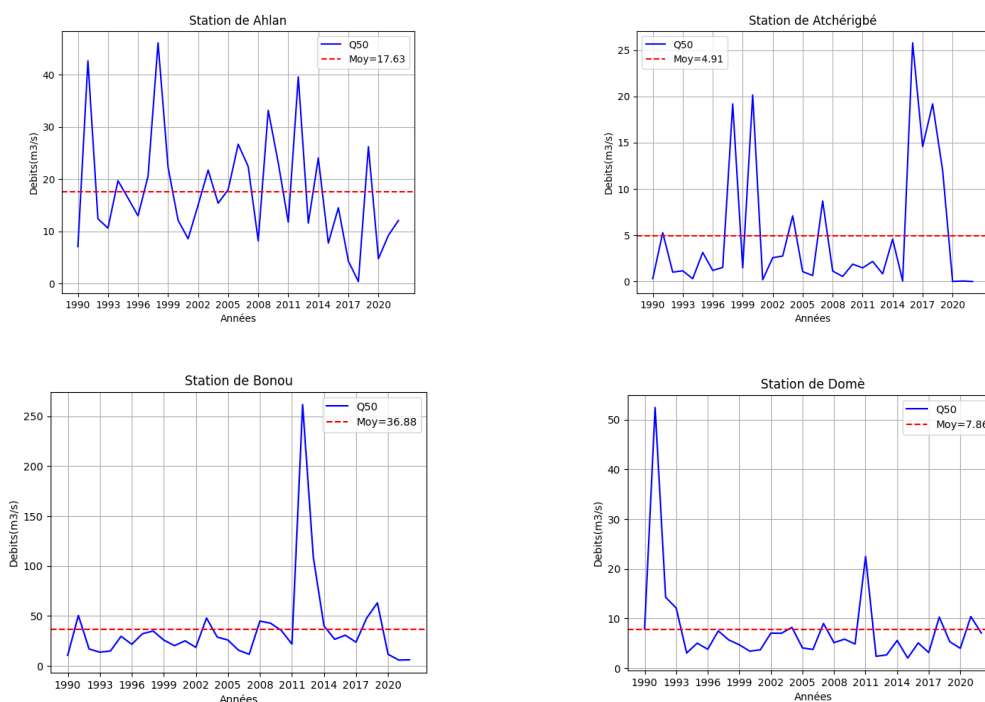


Figure 7: Variabilité des débits annuels Q50

■ Q95

Les graphiques de la figure 8 présentant la variabilité des débits annuels Q95 montrent une forte fluctuation des Q95 dans les sous bassins de Ahlan, Atchérigbé et Bonou contrairement à Domè qui connaît une forte baisse après 1991. Les Q95 pour Ahlan sont compris entre 67 m³/s et 1188 m³/s, pour une moyenne de 755,80 m³/s et ceux de Bonou sont compris entre 248 m³/s et 1034 m³/s avec une moyenne de 790,34 m³/s. Quant à Atchérigbé, il a une forte variabilité avec des valeurs atteignant de 571 m³/s en 1998 et une moyenne de 224,31 m³/s. En revanche, après la cascade rapide de Domè en 1994, il est resté en dessous de sa moyenne de 194,77 m³/s. cette variabilité observée peut être associée aux changements environnementaux affectant la capacité de rétention et d'écoulement de l'eau dans le bassin versant.

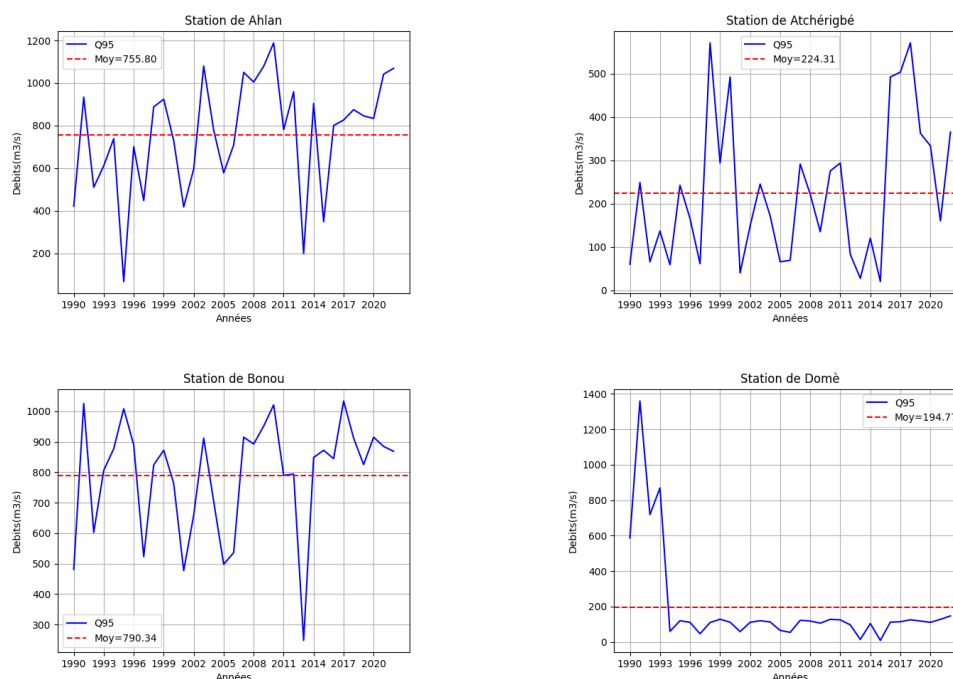


Figure 8: Variabilité des débits annuels Q95

L'analyse des variabilités nous a permis de comprendre que la dynamique hydrologique des débits est spécifique à chaque sous bassins. Cette complexité souligne une interaction dynamique climatiques, écologiques et humaines influençant les débits extrêmes.

3.2.2. Détection de tendance et pente de tendance au sein des séries de données hydrométriques

▪ Q10

L'analyse des résultats du test de Mann-Kendall présentés dans le tableau 2 (Résultats du test de tendance de Mann-Kendall et de Sen-Theil) en rapport avec la figure 9 ci-dessous présentant les tendances des débits annuels Q10 montre qu'à l'exception de Ahlan qui présente une tendance significative négative au seuil de 5%, les trois autres sous bassins présente des tendances non significatives négative (Bonou et Domè) et positive (Atchérigbé). L'analyse des résultats de la méthode de Sen-Theil présentés dans ce même tableau, ne valide que le sens de tendances de la station de Ahlan présenté par Mann-Kendall, et remet en cause celui des autres sous bassins (Car les limites inférieures et supérieures suggèrent différents sens de tendances à partir de leurs valeurs, et 0 est inclus dans l'intervalle de confiance ; ce qui signifie qu'il existe aussi une probabilité que la pente soit nulle).

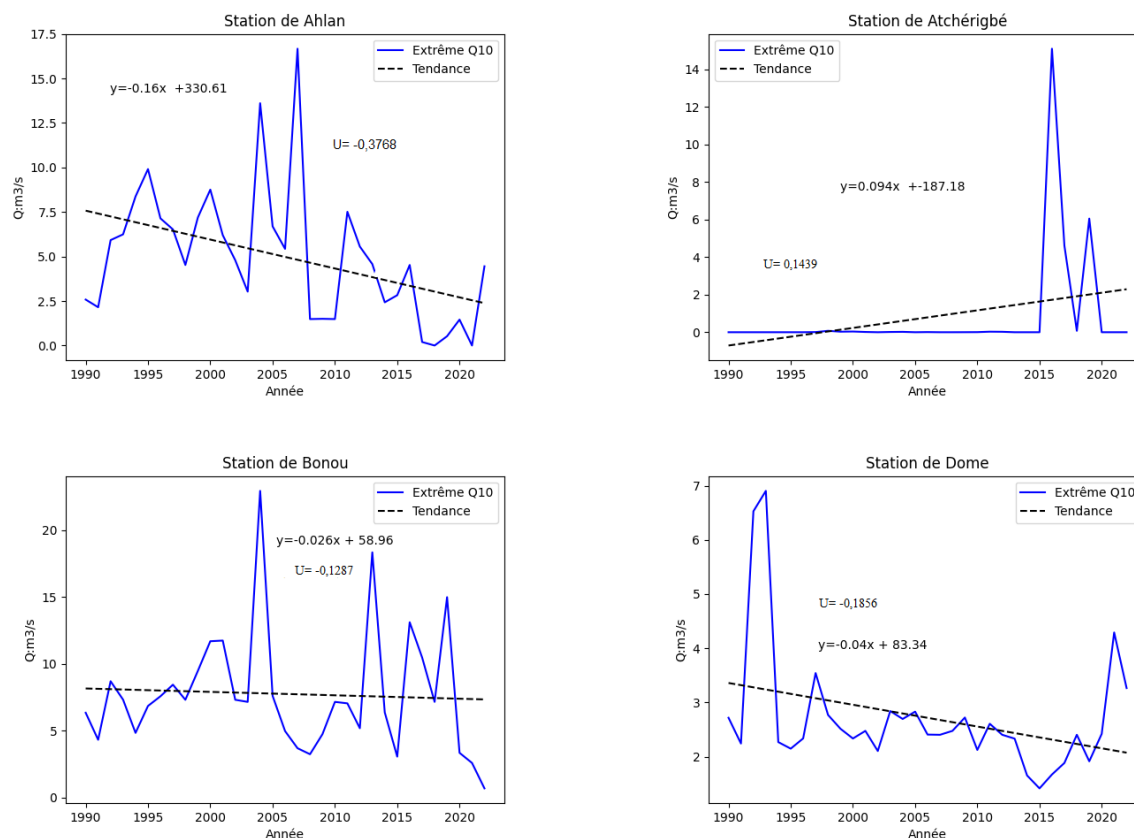


Figure 9: Tendances des débits annuels Q10 (1990–2022)

Q50

Les résultats du test de tendance de Mann-Kendall présentés dans le tableau 2 (Résultats du test de tendance de Mann-Kendall et de Sen-Theil) en relation avec les graphiques de la figure 10 présentant les tendances des débits annuels Q50 signale des tendances non significatives négatives (Ahlan, Atchérigbé et Domè) et positives (Bonou) au seuil de 5%. De l'analyse du test de Sen-Theil, un complémentaire du test de Mann-Kendall présenté dans le tableau 2, on constate une incertitude sur le sens de la tendance présenté par Man-Kendall. La méthode de Sen-Theil suggère qu'il n'y a pas de sens de tendance clairement définie, car les limites inférieures sont négatives et celles supérieures sont positives.

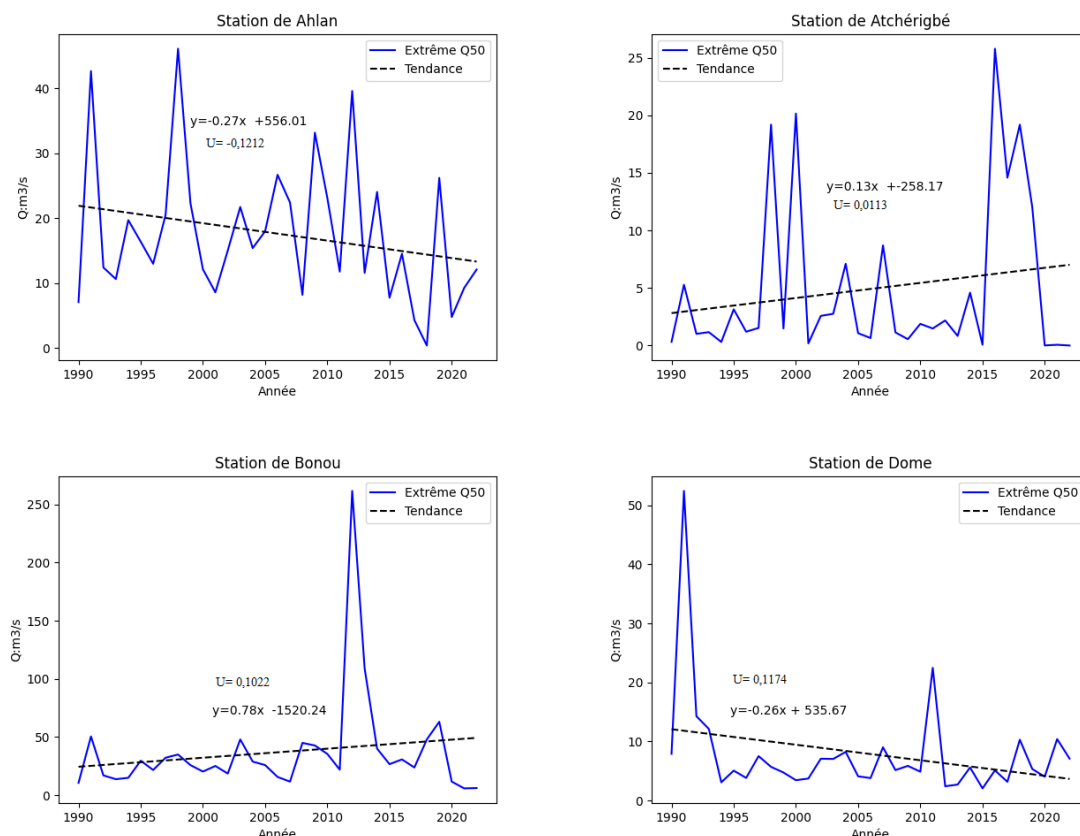


Figure 10: Tendances des débits annuels Q50 (1990–2022)

▪ Q95

De l'analyse du tableau 2 en relation avec la figure 11 ci-dessous présentant les tendances des débits annuels Q95, on constate que parmi les quatre stations étudiées, seule la station de Ahlan présente une tendance significative et positive, tandis que les stations de Atchérigbé et Bonou affichent des tendances non significatives mais positives, et la station de Domè une tendance non significative négative. L'analyse des résultats de la méthode de Sen-Theil présentée dans ce même tableau, ne valide que le sens de tendances de la station de Ahlan présenté par Mann-Kendall. Il remet en cause celui des autres stations car leurs limites inférieures sont négatives et celles supérieures sont positives.

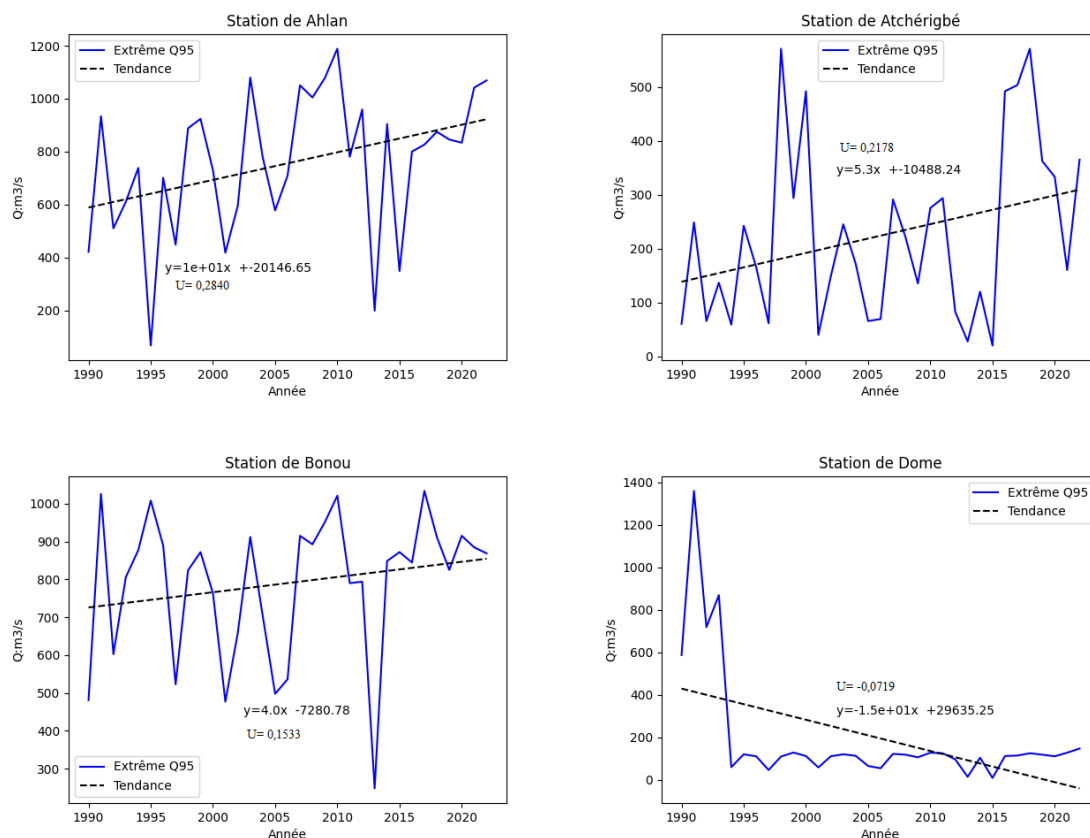


Figure 11: Tendances des débits annuels Q95 (1990–2022)

L'analyse des résultats des tests de tendances de Mann-Kendall et d'estimation de pente de tendance de Sen-Theil nous ont permis de réaliser une analyse approfondie et rigoureuse des tendances au sein des données hydrologiques étudiées. Le test de Mann-Kendall a révélé la présence de tendances significatives ou non dans la série chronologique, tandis que la méthode de Sen-Theil a offert une quantification précise de l'ampleur de ces tendances par l'estimation de la pente. La complémentarité de ces deux outils a non seulement permis de confirmer avec certitude le sens des tendances observés (Positif ou négatif), mais a également permis d'évaluer sa robustesse.

Tableau 2: Résultats du test de tendances de Mann-Kendall et de Sen-Theil

Station	Test de Mann-Kendall				Méthode de Sen-Theil		
	Pvalue	U (Tau de Kendall)	Tendance au seuil de 5%	Sens de la tendance	LI de la pente	Pente de la tendance	LS de la pente
Q10							
Ahlan	0,0021	-0,3768	Signif	Négatif	-0,2741	-0,1696	-0,0618
Atchéribé	0,2096	0,1439	Non signif	Positif	0,0000	0,0000	0,0010
Bonou	0,2989	-0,1287	Non signif	Négatif	-0,1807	-0,0585	0,0808
Domè	0,1326	-0,1856	Non signif	Négatif	-0,0403	-0,0152	0,0053
Q50							
Ahlan	0,3289	-0,1212	Non signif	Négatif	-0,5597	-0,1727	0,2067
Atchéribé	0,9382	0,0113	Non signif	Positif	-0,0610	0,0017	0,159
Bonou	0,4114	0,1022	Non signif	Positif	-0,3850	0,3177	1,1008
Domè	0,3445	-0,1174	Non signif	Négatif	-0,1934	-0,0687	0,0657
Q95							
Ahlan	0,0209	0,2840	Signif	Positif	3,4141	11,7094	20,0161
Atchéribé	0,0772	0,2178	Non signif	Positif	-0,3125	4,5984	11,1110
Bonou	0,2093	0,1553	Non signif	Positif	-2,0125	3,0971	10,9050
Domè	0,5663	-0,0719	Non Signif	Négatif	-2,6469	-0,3422	0,7361

Signif : Significative ; seuil de 5% : Seuil de significativité de 5%

3.2.3. Détection de rupture au sein des séries de données hydrométriques

Les différents tests statistiques appliqués aux débits extrêmes (Q10, Q50 et Q95) des différents sous bassins sur la période d'étude (1990-2022), ont permis de détecter des changements appelés ruptures au sein de la série de données.

▪ Q10

– Sous bassin de Ahlan et de Bonou

La figure 12 présentant l'évolution de la variable U du test de Pettitt des Q10 du sous bassin de Ahlan et Bonou dans la BMVO ainsi que la figure 16 de l'annexe I présentant les résultats du test de Buishand notifie que seul sur le sous bassin de Ahlan les résultats permettent de rejeter l'hypothèse nulle (absence de rupture) au seuil de 90%, 95% et 99% pour les deux tests ; ce qui confirme la présence de rupture de stationnarité dans la série étudiée. Cette rupture

est observée en 2007 avec les deux premiers tests provoquant une diminution des débits. Celle-ci est confirmée par la méthode de segmentation de Hubert qui le prouve avec un changement brusque de la moyenne en 2007 (Tableau 13 Annexe I). Malgré que trois tests s'accordent sur une même année de ruptures, la méthode de l'entropie croisée illustrée dans le tableau 14 en Annexe I (plus sensibles aux variations) a identifié une autre rupture en 2003 engendrant une augmentation de la croissance des débits extrêmes. Cette divergence indique que les changements dans la série ne sont peut-être pas limités à une seule période, et pourraient refléter plusieurs phases de transition ascendante ou descendante.

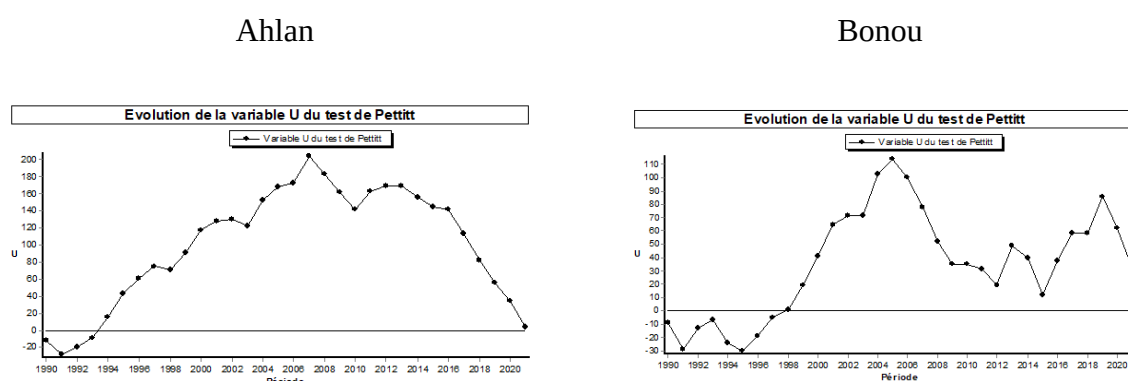


Figure 12: Evolution de la variable U du test de Pettitt des Q10 du sous bassin de Ahlan et Bonou dans la BMVO

– Sous bassin de Atchérigbé et Domè

La figure 16 de l'annexe I présentant les résultats du test de Buishand montre en premier lieu la non pertinence du test de Buishand au niveau des sous bassins de Atchérigbé et Domè. La figure 15 présentant l'évolution de la variable U du test de Pettitt des extrêmes dans la BMVO (Annexe I) quant à lui montre que les résultats du test de Pettitt au niveau de ces deux sous bassins ne fournissent pas suffisamment de preuve pour rejeter l'hypothèse H_0 (absence de rupture) au seuil de 90%, 95% et 99% ; ce qui confirme l'absence de rupture dans la série étudiée. Seule la méthode de segmentation de Hubert (Tableau 13 Annexe I) confirme les résultats du test de Pettitt ; contrairement à Entropie croisée (Tableau 14 Annexe I) qui en a déterminé une dans les deux sous bassins respectivement en 2015 et 1993 suivie directement d'une décroissance de la valeur des débits.

Q50

Sous bassins de Ahlan et de Atchérigbé

L'analyse des Q50 présentés au niveau de la figure 13 ci-dessous et de la figure 16 situé en Annexe I présentant les résultats de Buishand montre que les résultats des tests de Pettitt et de Buishand pour les stations de Ahlan et de Atchérigbé ne permettent pas de rejeter l'hypothèse nulle sur n'importe quel intervalle de confiance ; ce qui garantit qu'il n'y a pas de rupture de stationnarité dans les séries étudiées. La méthode de segmentation de Hubert et de l'Entropie Croisée a confirmé les résultats de ces deux tests (Pettitt et Buishand), augmentant la robustesse des résultats obtenus.

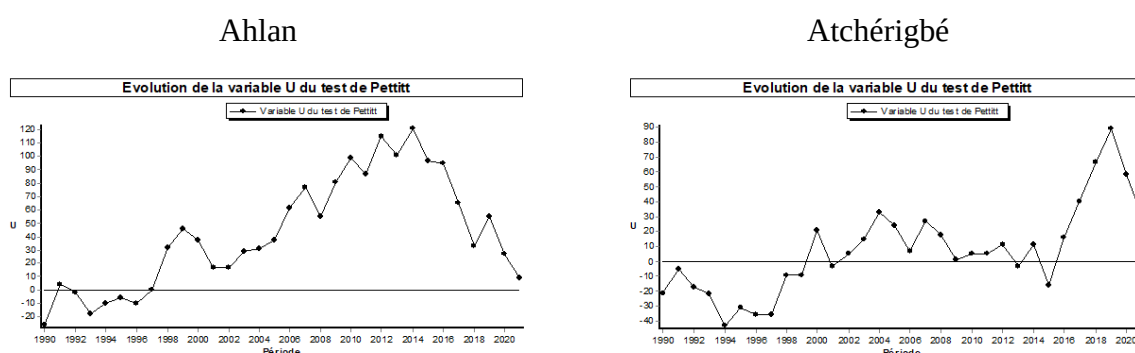


Figure 13: Evolution de la variable U du test de Pettitt des Q50 du sous bassin de Ahlan et Atchérigbé dans la BMVO

Sous bassins de Bonou et Domè

Au seuil de confiance 90%, 95% et 99%, les résultats de la figure 15 présentant l'évolution de la variable U du test de Pettitt des extrêmes dans la BMVO et de la figure 16 présentant les résultats du test de Buishand ne fournissent pas suffisamment de preuve pour rejeter l'hypothèse H_0 (absence de rupture). Ainsi nous pouvons déduire une absence de rupture de stationnarité. Cependant la méthode de l'Entropie Croisée exposé dans le tableau 14 en Annexe I détecte une rupture en 1991 au niveau de Domè soutenant les résultats de Hubert (Tableau 13 Annexe I) puis deux ruptures au niveau de Bonou (2011 et 2015). Les ruptures observées au niveau des stations (1991 à Domè et 2011 à Bonou) ont entraîné une diminution des débits. En revanche, celle identifiée en 2015 à la station de Bonou s'est traduite par une chute abrupte des débits. Ces petites divergences sont peut-être considérables car ils ont été déterminés par des méthodes plus sensibles aux variations hydrologiques.

Q95

Sous bassin de Ahlan et Bonou

Les graphiques de la figure 14 nous présentent l'évolution de la variable U du test de Pettitt des extrêmes Q95 des sous bassins de Ahlan et de Bonou dans la BMVO. L'analyse des Q95 présentés au niveau de cette figure ainsi qu'au niveau de la figure 16 en Annexe I présentant les résultats du test de Buishand montre qu'à la station de Ahlan, les résultats des tests obtenus ne présentent aucune preuve pour rejeter l'hypothèse nulle au seuil de confiance 95% et 99% pour Pettitt et 99% pour Buishand. On en déduit donc qu'il y a une rupture de stationnarité entraînant une augmentation de la moyenne des débits, produite en 2006 et remettant en question les résultats de la méthode de segmentation de Hubert et de l'Entropie Croisée. Quant aux résultats de la station de Bonou, on constate qu'il ne révèle pas de preuve suffisante pour invalider l'hypothèse H_0 (absence de rupture) avec le test de Pettitt et de Buishand soutenant ainsi les résultats de la méthode de segmentation de Hubert et de l'Entropie Croisée

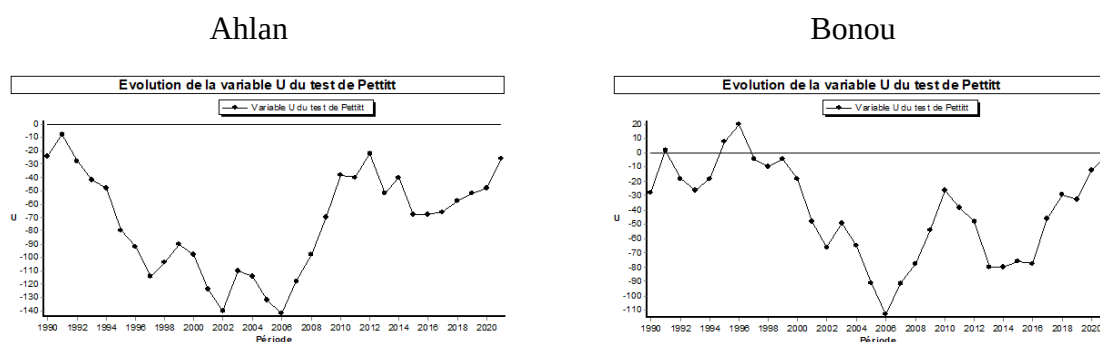


Figure 14: Evolution de la variable U du test de Pettitt des Q95 du sous bassin de Ahlan et Bonou dans la BMVO

– Sous bassin de Atchérigbé et Domè

La figure 15 nous présente l'évolution de la variable U du test de Pettitt des extrêmes dans la BMVO. Tant pour cette analyse Q95 que pour celle du test de Buishand présentés au niveau de la figure 16 (Annexe I), il ressort qu'au niveau du sous bassin de Atchérigbé, l'hypothèse H_0 (absence de rupture) n'a pas pu être rejeté à chaque niveau de confiance habituels, bien que Pettitt l'ai rejetée à 90% confirmant un point de rupture accentuant la croissance des débits en 2015. Ce résultat soutient les résultats de Hubert et d'Entropie Croisée (Tableau 13 et 14 Annexe I). Pour le sous-bassin de Domè, seules les méthodes de segmentation de Hubert et d'Entropie croisée ont pu déterminer une rupture provoquant la diminution des valeurs de débits en 1993 contredisant le résultat du test de Pettitt.

L'utilisation de plusieurs tests et méthodes de ruptures plus sensibles aux variations de séries hydrologiques dans cette étude nous a permis d'augmenter la robustesse de nos résultats

tout en déterminant les implications induites par chaque rupture dans la série autres fois non perçu par les anciennes méthodes de détection de ruptures.

3.3. Corrélation Pente de terrain-Débits extrêmes

3.3.1. Valeurs des pentes calculés

La pente du terrain dans le bassin versant est un paramètre fondamental qui affecte le dynamisme des eaux de surface. Elle peut affecter les extrêmes de débits tels que les Q10, Q50 et Q95 en modifiant la vitesse et la rétention des eaux de surface.

Cette partie du mémoire présente et analyse les résultats issus des calculs de pentes de terrain des sous bassins versants de l'étude faite à Partir des MNT de trois années distinctes (2014, 2018 et 2023) espacées de 4 et 5 années (Voir tableau 3 ci-dessous)

De l'analyse du tableau ci-dessous, on constate qu'entre 2014 et 2018, les pentes maximales ont diminué dans tous les sous bassins . Par exemple, à Atchérigbé, la pente est passée de 19.48% en 2014 à 10.53% en 2018, soit une baisse significative. A Bonou, elle est passée de 26.55% à 17.71%. En 2023, une remontée générale est observée : les pentes de Bonou et Domè retrouvent leurs valeurs de 2014 (respectivement 26.55% et 14,27%), tandis que celle de Atchérigbé remonte à 19.39%, presque au niveau initial. Ces fluctuations pourraient bien suggérer des influences environnementales ou anthropiques marquant la période 2014-2023.

Tableau 3: Valeurs de pente de terrain du lit des sous bassins

Années	Sous bassins	Pente Maximale (%)
2014	Ahlan	21,49
	Atchérigbé	19,48
	Bonou	26,55
	Domè	14,27
2018	Ahlan	19,53
	Atchérigbé	10,53
	Bonou	17,71
	Domè	7,96
2023	Ahlan	21,49
	Atchérigbé	19,39
	Bonou	26,55
	Domè	14,27

3.3.2. Taux d'accroissement

A ce niveau, 2018 sert d'année intermédiaire ou de comparaison entre les deux périodes (2014-2018 et 2018-2023). L'observation du taux d'accroissement autour de 2018 permet de vérifier de combien de valeur en pourcentage il y a eu une diminution ou augmentation de la pente en 4 et 5 années respective.

Le taux d'accroissement indiquant de combien la pente a changé en pourcentage sur cette période de quatre ans et cinq ans (2014-2018 et 2018-2023) présentés dans le tableau 4 ci-dessus sont significatifs. Ces taux d'accroissements sont décroissants entre 2014-2018 puis croissants entre 2018-2023 sur les quatre sous bassins de l'étude. Nous pouvons donc conclure qu'il y a une légère convexité négative entre l'année 2014 et 2018 et positive entre 2018-2023.

Cette tendance négative observée sur tous les sous bassins entre 2014 et 2018 confirme la diminution des valeurs de pentes qui peut être attribuée à des processus de sédimentation ou d'activité humaine qui modifient le terrain. A l'inverse, entre 2018 et 2023 les taux d'accroissements positifs peuvent être attribués à une intensification des processus d'érosion ou autres changements environnementaux. Ces fluctuations présentent une dynamique complexe et nécessitent une analyse détaillée pour comprendre leurs impacts sur les extrêmes de débits.

Tableau 4: Evolution du taux d'accroissement en (%)

Sous bassins	2014-2018	2018-2023
Ahlan	-9,12	10,04
Atchérigbé	-45,94	84,14
Bonou	-33,29	49,91
Domè	-44,21	79,27

3.3.3. Vérification de l'existence d'une parfaite corrélation

Une comparaison des valeurs extrêmes de débits Q10, Q50 et Q95 de 2014 à 2022 avec le taux d'accroissement est capitale pour trouver une réponse à notre question suivante : "Existe-t-il vraiment une corrélation entre la pente des sous bassins et les débits extrêmes observés au cours des années ?" Les valeurs des extrêmes d'indices de débits (Q10, Q50 et Q95) de 2014-2022 sont présentés dans le tableau...ci-dessous avec les valeurs de la première période présentés en vert, ceux de la deuxième période en rouge et pour l'année de comparaison en noir.

L'analyse des valeurs extrêmes de débits Q10, Q50 et Q95, présentées dans le tableau, révèle des variations intéressantes en lien avec les changements de pente observés dans les sous bassins. Pour le sous bassin de Ahlan, une diminution de la pente entre 2014 et 2018 s'accompagne également d'une réduction significative des débits extrêmes. Par exemple, le Q10 passe de 2,42 m³/s en 2014 à 0 m³/s en 2018, le Q50 diminue de 24,05 m³/s à 0,41 m³/s et le Q95 chute de 904,3 m³/s à 874,9 m³/s sur la même période. Cela suggère une corrélation directe entre la diminution de pente et la baisse des débits extrêmes dans ce sous-bassin.

En revanche, dans la deuxième sous période (2018-2022), marquée par une augmentation de la pente, une hausse des débits extrêmes est observée uniquement dans les sous bassins de Ahlan et de Domè. Pour Ahlan, le Q10 passe de 0 m³/s en 2018 à 4,450 m³/s en 2022, le Q50 de 0,410 m³/s à 12,10 m³/s, et le Q95 de 874,9 m³/s à 1069 m³/s. Pour Domè, le Q10 augmente de 2,4 m³/s en 2018 à 3,27 m³/s en 2022 et le Q95 de 125,2 m³/s à 147,3 m³/s.

Ces variations confirment que la diminution de la pente entre 2014 et 2018 n'a significativement affecté que le sous bassin de Ahlan, tandis que l'augmentation de pente après 2018 semble avoir eu un effet sur les débits extrêmes des sous bassins de Ahlan et de Domè. Les autres sous bassins (Atchérigbé et Bonou) montrent une absence de sensibilité aux variations de pente, comme en témoignent leurs valeurs relativement stables ou peu influencées dans les deux périodes.

Tableau 5: Valeurs des extrêmes de débits des sous bassins de 2014 à 2022

Année Stations	Ahlan			Atchérigbé			Bonou			Domè		
	Q10	Q50	Q95	Q10	Q50	Q95	Q10	Q50	Q95	Q10	Q50	Q95
Extrêmes	Q10	Q50	Q95	Q10	Q50	Q95	Q10	Q50	Q95	Q10	Q50	Q95
2014	2,42	24,05	904,3	0	4,59	120,48	6,38	40,05	848,8	1,65	5,59	104,2
2015	2,82	7,769	348,8	0	0,072	20,57	3,07	26,69	872,2	1,41	2,05	9,0
2016	4,52	14,52	800,4	15,1	25,78	492,30	13,12	30,73	844,7	1,67	5,10	111,9
2017	0,196	4,316	826,4	4,61	14,57	503,65	10,48	23,82	1034	1,88	3,16	114,4
2018	0	0,410	874,9	0,07	19,18	571,07	7,17	47,94	912,2	2,40	10,29	125,2
2019	0,523	26,21	845,92	6,05	12,01	362,45	14,99	63,12	825,2	1,91	5,33	118,5
2020	1,45	4,78	833,5	0	0,007	333,52	3,36	11,68	915,3	2,42	4,02	111,0
2021	0	9,26	1041,7	0	0,06	160,50	2,60	5,86	884,8	4,29	10,39	128,0
2022	4,450	12,10	1069	0	0	365,42	0,70	6,14	868,9	3,27	7,08	147,3

La mise en relation des résultats issues des tableaux 4 et 5 montre une légère corrélation entre la pente de terrain et les débits extrêmes au niveau de la station de Ahlan et Domè contrairement à la station de Atchérigbé et Bonou. Ces résultats obtenus remettent en question la corrélation parfaite attendue sur les quatre sous bassins de l'étude et montrent indirectement que la variabilité des débits observés au niveau des quatre sous bassins de la BMVO soit influencée par d'autres facteurs. Nous pouvons donc conclure que la variation des extrêmes de débits ne dépend pas intégralement que de la variation des pentes de terrain des sous bassins mais aussi en partie des précipitations qui ont eu lieu sur le bassin ; du type de sol qui est le lit des sous bassins ; l'urbanisation et les activités humaines (Agriculture, réalisation des infrastructures...).

3.4. Analyse fréquentielle des débits extrêmes

3.4.1. Caractéristiques statistiques de la série

Les valeurs des paramètres statistiques ont été déterminées et enregistrées dans le tableau 15 en Annexe III. L'analyse de ce tableau nous permet de parvenir à ces déductions :

- Le coefficient d'asymétrie des extrêmes Q10 et Q50 est totalement positif sur l'ensemble des 4 sous bassins de l'étude, ce qui signifie que la distribution est étalée sur la droite.
- Pour les Q95, les sous bassins montrent une asymétrie positive à l'exception de Ahlan et Bonou.
- Le coefficient d'aplatissement est totalement positif, la distribution est donc moins aplatie que la distribution normale, pour cela la distribution est leptokurtique.

3.4.2. Vérification des hypothèses de base dans les débits extrêmes

- **Homogénéité :**

L'application du test de Wilcoxon-Mann Whitney a montré que les moyennes des trois sous échantillons sont égales au seuil de 5% pour les Q10, Q50 et Q95 de toutes les stations à l'exception de Ahlan et Bonou pour les Q10 et Ahlan pour les Q95 où le test n'a pas été concluant. Par conséquent, pour toutes les stations où les données sont supérieures à 5%, il y a homogénéité, ce qui signifie que les données proviennent de la même distribution. (Annexe IV Tableau 16)

- **Indépendance :**

Les résultats du test de Wald Wolfowitz (Annexe IV Tableau 16) permettent de conclure que les séries sont indépendantes au seuil de 5% à toutes les stations pour les Q10, Q50 et Q95, à l'exception de Domè pour les Q10 et Q95 et Bonou pour les Q50.

3.4.3. Ajustement aux lois des débits extrêmes (Q10, Q50 et Q95)

Les figures 17, 18 et 19 de l'annexe II présentent les graphes d'ajustement des débits extrêmes Q10, Q50 et Q95 par les différentes lois retenues pour l'étude sur la période de 1990 à 2022. De l'analyse des graphiques de la figure 17, on remarque que contrairement à la loi de Gumbel, les observations de la loi log-Normale suivent de près le modèle tout en restant dans l'intervalle de confiance pour la majorité des points représentés sur les quatre stations de l'étude. On en déduit donc que les Q10 des sous bassins de Ahlan, Atchérigbé Bonou et Domè s'ajustent le mieux à la loi log-Normale.

L'exploration des différents graphiques de la figure 18, montre que les Q50 de Ahlan, Atchérigbé et Domè sont bien corrélées aux lois de Gamma avec des observations majoritairement comprises dans l'intervalle de confiance 95% et bien représentés sur le modèle. Seul le sous bassin de Bonou répond au mieux à l'ajustement de la loi Gamma-généralisée. On en déduit donc que les Q50 des sous bassins de Ahlan, Atchérigbé et Domè s'ajustent le mieux à la loi de Gamma tandis que ceux de Bonou s'ajustent le mieux à Gamma Généralisée.

L'analyse de chaque graphique de la figure 19, montre que pour la loi GEV les observations des sous bassins de l'étude (Ahlan et Bonou) suivent de très près le modèle tout en restant dans l'intervalle de confiance. Au niveau de la station de Atchérigbé seule la loi de GEV s'ajuste, ce qui la rend plus appropriée tandis qu'au niveau de la station de Domè, bien que les lois de GEV et Pearson type III ont pu être appliquées, la loi GEV reste la plus précise.

En générale, nous pouvons retenir que les débits extrêmes Q10, Q50 et Q90 s'ajustent le mieux respectivement à la loi de Gumbel, Gamma et GEV avec une marge d'erreur comprise entre 1 à 5%.

3.4.4. Comparaison des critères et adéquation par le test de khi-carré

3.4.4.1. Comparaison des critères

Le choix de la meilleure loi d'ajustement à partir du critère de comparaison se fait à partir du BIC (Critère d'information Bayésien) et AIC (Critère d'information d'Akaike). La meilleure loi à retenir est celle qui a simultanément les deux critères d'informations faibles.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6: Valeurs des paramètres BIC et AIC

Stations	Lois	Nombre de paramètre	BIC	AIC
Q10				
Ahlan	Gumbel	2	181,118	178,125
	Log-Normale	2	174,001	171,139
Atchérigbé	Gumbel	2	146,455	143,462
	Log-Normale	2	-13,313	-14,858
Bonou	Gumbel	2	190,768	187,775
	Log-Normale	2	194,491	191,498
Domè	Gumbel	2	87,777	84,734
	Log-Normale	2	92,653	89,660
Q50				
Ahlan	Gamma	2	253,160	250,167
	Gamma Généralisée	3	254,807	250,318
Atchérigbé	Gamma	2	164,979	62,048
	Gamma Généralisée	3	167,307	162,908
Bonou	Gamma	2	319,383	316,390
	Gamma Généralisée	3	299,618	295,128
Domè	Gamma	2	215,047	212,054
	Gamma Généralisée	N/D	N/D	N/D
Q95				
Ahlan	GEV	3	467,456	462,966
	Pearson type III	3	N/D	N/D

Atchérigbé	GEV	3	186,929	182,440
	Pearson type III	3	N/D	N/D
Bonou	GEV	3	437,566	433,077
	Pearson type III	3	N/D	N/D
Domè	GEV	3	409,782	405,292
	Pearson type III	3	N/D	N/D

NB : Les valeurs en rouges sont les plus faibles.

L'analyse du tableau montre que les valeurs des critères Bayésien et d'Akaike pour les lois de Gumbel et Log-Normal sont les plus faibles respectivement pour les stations (Bonou, Domè) et (Ahlan, Atchérigbé). Ce résultat ne nous permet pas totalement d'affirmer les analyses graphiques faites ci-haut et nécessite l'utilisation d'un autre critère de vérification. Quant à l'extrême Q50, la majorité des stations présente des valeurs d'AIC et BIC faibles, ce qui nous permet de vérifier les résultats de l'analyse graphique précédente. La loi de Pearson type III n'a pas pu donner d'informations sur le BIC et l'AIC au niveau de l'extrême 95, ce qui place la loi GEV comme meilleure loi d'ajustement des Q95. On en conclut donc que les lois : Log-Normale, Gamma et GEV s'ajustent le mieux respectivement aux Q10, Q50 et Q95.

3.4.4.2. Adéquation par le test de khi-carré

Pour valider les lois retenues, le test de khi-carré a été appliqué aux différentes séries. Les résultats sont présentés dans les tableaux 7, 8, et 9 ci-dessous.

L'ajustement est jugé acceptable si :

$$\chi^2_{cal} < \chi^2_{0.05}$$

Grâce au logiciel HYFRAN, la valeur des χ^2_{cal} sont consignés dans les tableaux 7, 8, et 9 ci-dessus.

La valeur de $\chi^2_{0.05}$ est lue sur une table de GAUSS. Sa valeur est égale à 7.81.

En comparant cette valeur de 7.81 à chaque χ^2 calculé dans les trois tableaux ci-dessus, on constate que les valeurs de χ^2 de la loi log-normale, Gamma et GEV sont celles qui ne sont pas trop éloignées de la valeur référence. On pourra donc conclure que les lois : log-normale, Gamma et GEV sont les plus satisfaisantes.

Tableau 7: Résultats de test de Khi-deux pour les Q10

Stations Q10	Loi de Gumbel (Méthode des moments)				Loi de Log-Normal (Méthode de maximum de vraisemblance)			
	Nombres de classes	Degrés de liberté	χ^2	Conclusions	Nombres de classes	Degrés de liberté	χ^2	Conclusion
Ahlan	8	5	6,52	A	7	4	5,81	A
Atchérigbé	8	5	187,36	R	6	3	8,00	R
Bonou	8	5	7,00	A	8	5	10,88	A
Domè	8	5	28,82	R	8	5	17,67	R

Tableau 8: Résultats de test de Khi-deux pour les Q50

Stations Q50	Loi de Gamma (Méthode des moments)				Loi de Gamma généralisée (Méthode de maximum de vraisemblance)			
	Nombres de classes	Degrés de liberté	χ^2	Conclusions	Nombres de classes	Degrés de liberté	χ^2	Conclusion
Ahlan	8	5	3,61	A	8	4	3,61	A
Atchérigbé	8	5	4,50	A	8	4	4,50	A
Bonou	8	5	24,94	R	8	4	362,15	R
Domè	5	8	27,85	R	--	--	--	--

Tableau 9: Résultats de test de Khi-deux pour les Q50

Stations Q95	GEV (Maximum de vraisemblance)				Pearson type III (Maximum de vraisemblance)			
	Nombres de classes	Degrés de liberté	χ^2	Conclusions	Nombres de classes	Degrés de liberté	χ^2	Conclusion
Ahlan	8	4	1,67	A	8	4	231,00	R

Atchérigbé	8	4	3,61	A	8	4	23,97	R
Bonou	8	4	8,45	A	8	4	231,00	R
Domè	8	4	36,58	R	8	4	85,06	R

A : Nous pouvons accepter H_0 au seuil de 5% ; R : Nous devons rejeter H_0 au seuil de 1%

3.4.5. Estimation des débits caractéristiques et les intervalles de confiance

Les quantiles ont été calculés à partir des équations issues de l'ajustement de chaque loi pour différentes périodes de retour (2 ans, 5 ans, 10 ans et 50 ans). Les tableaux 10, 11, et 12 ci-dessous, présentent les valeurs des quantiles calculées pour les séries Q10, Q50 et Q95. De l'analyse de ces tableaux, on remarque que l'augmentation de la valeur des quantiles est proportionnelle à celles des périodes de retour.

Les résultats d'analyse fréquentielle des extrêmes Q10 pour la station de Ahlan présentée dans le tableau 10, indiquent que pour une période de retour de 10 ans, le débit estimé se situe entre un intervalle de confiance [7.14 m^3/s - 18.7 m^3/s]. Ce résultat reflète une incertitude quant au débit exact, mais signifie qu'il y a environ 2% de chances qu'un événement avec un débit dans cette fourchette se produise chaque année en moyenne. Au niveau des trois autres sous bassins de l'étude, l'incertitude sur les valeurs exacte de débits associés aux diverses périodes de retour reste les mêmes que celle de la station de Ahlan avec une probabilité de 2% de se produire chaque année.

L'exploration du tableau 11, et 12, nous permet de visualiser les intervalles de confiances très larges et parfois indéterminables par les lois d'ajustement au niveau des extrêmes Q50 et Q95. Ces incertitudes remettent en cause les valeurs exactes de simulation de débits associés à chaque période de retour observés dans le tableau. Ainsi nous ne pouvons qu'affirmer maintenant que les valeurs comprises dans les intervalles de confiance pour chaque sous bassins de l'étude ont une probabilité de 50%, 20%, 10% et 2% de se reproduire respectivement au moins en moyenne chaque 2 ans, 5 ans, 10 ans et 50 ans.

Tableau 10:Quantiles calculés pour les séries de Q10

Stations Q10	Ahlan	Atchérigbé	Bonou	Domè
Gumbel (Méthode des moments)				
2 ans	4,36 (3,17-5,54)	0,318 (-0,584-1,22)	7,01 (5,57-8,44)	2,53 (2,16-2,89)

5ans	7,70 (5,70-9,69)	2,86 (1,34-4,38)	11,1 (8,64-13,5)	3,55 (2,94-4,17)
10 ans	9,91 (7,22-12,6)	4,55 (2,50-6,60)	13,7 (10,5-17,0)	4,24 (3,41-5,07)
50 ans	14,8 (10,4-19,1)	8,25 (4,94-11,6)	19,6 (14,4-24,9)	5,74 (4,40-7,07)
Log-Normale (Maximum de vraisemblance)				
2 ans	3,90 (2,62-5,19)	0,05 --	6,54 (5,10-7,97)	2,56 (2,27-2,84)
5 ans	8,56 (5,27-11,9)	0,484 --	11,2 (8,35-14,1)	3,37 (2,93-3,80)
10 ans	12,9 (7,14-18,7)	1,55 --	14,9 (10,5-19,4)	3,89 (3,30-4,48)
50 ans	26,6 (11,0-42,1)	12,0 --	24,5 (14,9-34,1)	5,00 (4,01-6,00)

Tableau 11: Quantiles calculés pour les séries de Q50

Stations Q50	Ahlan	Atchérigbé	Bonou	Domè
Gamma (Méthode des moments)				
2 ans	15,4 (12,0-18,9)	2,34 (0,278-4,41)	21,0 (7,78-34,2)	4,83 (2,17-7,49)
5ans	25,6 (19,9-31,2)	8,33 (4,27-12,4)	60,7 (35,4-85,9)	12,9 (7,84-17,9)
10 ans	32,2 (24,3-40,2)	13,7 (6,60-20,7)	93,4 (51,2-136)	19,3 (11,1-27,5)
50 ans	46,4 (32,6-60,2)	27,2 (9,99-44,4)	127 (63,9-191)	34,7 (16,7-52,6)
Gamma Généralisée (Maximum de vraisemblance)				
2 ans	15,9	2,06	25,3	--

	(11,8-20,0)	--	(18,6-32,1)	
5 ans	26,3 (20,7-31,8)	7,50 --	48,3 (32,8-63,9)	--
10 ans	32,5 (25,6-39,3)	13,3 --	69,7 (41,9-97,6)	--
50 ans	44,3 (32,0-56,6)	32,0 --	N/D	--

Tableau 12: Quantiles calculés pour les séries de Q95

Stations Q95	Ahlan	Atchérigbé	Bonou	Domè
GEV (Maximum de vraisemblance)				
2 ans	794 (701-887)	5,41 (4,27-6,55)	837 (779-895)	115 (81,5-148)
5ans	992 (914-1070)	9,47 (6,58-12,4)	955 (917-993)	229 (149-309)
10 ans	1070 (1000-1140)	13,6 (7,83-19,5)	992 (963-1020)	342 (187-498)
50 ans	1160 (1120-1200)	30,2 (N/D)	1030 (1010-1040)	767 (N/D)
Pearson Type III (Maximum de vraisemblance)				
2 ans	801 (715-887)	7,22 (5,43-9,02)	840 (785-895)	172 (117-227)
5 ans	987 (906-1070)	14,4 (10,1-18,7)	954 (909-999)	385 (258-513)
10 ans	1060 (952-1170)	19,8 (13,6-26,0)	990 (935-1050)	546 (364-728)
50 ans	1160 (984-1330)	32,6 (22,1-43,1)	1030 (953-1100)	918 (609-1230)

3.6. Discussion

L'étude de la variabilité des débits extrêmes (Q10, Q50 et Q95) dans les sous bassins de notre étude sur la période de 1990 à 2022, montre que dans la basse et moyenne vallée de l'Ouémé, il y a une forte variabilité des extrêmes hydrologiques. Ces variabilités sont représentées par des tendances significative et non significative positive ou négative au niveau de chaque sous bassins conduisant à des périodes de ruptures de stationnarités particulières dans les séries Q10, Q50 et Q95. Ces ruptures divisent les séries en 2 sous périodes renforçant les résultats de variabilité observés. De tels résultats entrent en concordance avec les études réalisées par (Fêmi et al., 2019, Kodja et al., 2017) dans la basse vallée de l'Ouémé montrant qu'il y a respectivement deux et trois sous périodes dans les séries de centiles 95 étudiés.

Une corrélation parfaite entre la pente et les débits extrêmes semble partiellement confirmée par les données de Ahlan et de Domè. En exemple, la baisse de pente de 2014 à 2018 s'accompagne d'une réduction des débits extrêmes au niveau de Ahlan tandis que l'augmentation de 2018 à 2023 est suivie d'une légère augmentation des débits sur les sous bassins de Ahlan et Domè. Ces résultats suggèrent une légère relation entre la pente et le dynamisme des débits au niveau de Ahlan et Domè comme lu dans l'article du 08/01/2024 « Pente (HU) » du site Wikihydro ; mais ajoutent aussi qu'outre la pente plusieurs autres paramètres tels que la précipitation, la végétation, le type de sol, l'urbanisation et les activités humaines influencent ces débits.

L'analyse fréquentielle nous a permis de choisir les lois qui s'ajustent le mieux au Q10, Q50 et Q95 des sous bassins de l'étude. Cette étude statistique nous a permis de connaître les quantiles des débits pour chaque période de retour pour la prévention des risques hydrométéorologiques. Les résultats de cette étude montrent que les lois : log-normale, Gamma et GEV s'ajustent le mieux respectivement aux débits extrêmes Q10, Q50 et Q95. Ces résultats viennent confirmer les études de (Freddy, 2020) où il exprime que les débits extrêmes minimaux s'ajustent bien à la loi log-normale avec une marge d'erreur de 1 à 5%. Dans son étude sur l'analyse des extrêmes dans l'Algérie du Nord, (Bellout M., 2015) affirme que les débits s'ajustent mieux aux lois Log-normale, Pearson type III, Gumbel et loi Normale respectivement suivant l'ordre de préférence. Cette étude fréquentielle nous a aussi permis d'estimer les débits pour différentes périodes de retour (2, 5, 10 et 50 ans). Les débits Q10 compris entre 0.05 m³/s et 7.97 m³/s ont une probabilité de 50% d'être atteint ou dépassé en moyenne tous les deux ans sur l'ensemble des stations de l'étude tandis que ceux décennaux en

général sont compris entre $1.55 \text{ m}^3/\text{s}$ et $19.4 \text{ m}^3/\text{s}$ avec une probabilité de 10% d'être atteint en moyenne tous les 10 ans. Parlant des Q50, les débits avec une période de retour de 2 ans sont comprise entre $0.278 \text{ m}^3/\text{s}$ et $34.2 \text{ m}^3/\text{s}$ sur l'ensemble de la basse et moyenne vallée de l'ouémé tandis que ceux avec une période de retour de 10 ans varient entre $6.60 \text{ m}^3/\text{s}$ et $136 \text{ m}^3/\text{s}$ sur l'ensemble des stations de la BMVO. Concernant les Q95, les débits de périodes de retour 2 ans varient de $4.27 \text{ m}^3/\text{s}$ à $895 \text{ m}^3/\text{s}$ alors que ceux de retour 10 ans varient de $7.83 \text{ m}^3/\text{s}$ à $1170 \text{ m}^3/\text{s}$ en fonction de la station. (Freddy, 2020) a estimé lors d'une étude similaire dans le bassin de l'Ouémé sur la période de 1960 à 2010 que les débits de période de retour de deux ans varient entre $8.96 \text{ m}^3/\text{s}$ et $792 \text{ m}^3/\text{s}$ et ceux de 10 ans entre $17.2 \text{ m}^3/\text{s}$ et $1050 \text{ m}^3/\text{s}$ pour les extrêmes Q95 ; ce qui est semblable avec nos résultats des extrêmes Q95 sur la BMVO avec une période d'étude (1990-2022).

3.7. Conclusion

Dans la perspective des analyses qui ont eu lieu dans ce chapitre, nous avons constaté par le biais des débits extrêmes de chaque sous bassin que la basse et moyenne vallée de l'Ouémé est une Zone qui a connu une forte variabilité au cours de la période 1990-2022. Nous avons détecté plusieurs ruptures de stationnarité sur l'ensemble des stations étudiées dont 4 au niveau des extrêmes Q10 ; trois au niveau des Q50 et 2 au niveau des Q95. L'étude de la relation Pente-Débits nous a permis de découvrir que la pente de terrain n'est pas le seul facteur influençant les extrêmes de débits mais aussi d'autres facteurs environnementaux et sociaux. Les résultats de l'analyse fréquentielle nous ont permis d'opter comme meilleure loi d'ajustement les lois (Log-Normale, Gamma et GEV) pour la détermination des quantiles associés à chaque période de retour. Les critères AIC et BIC ainsi que le test de khi-carré nous ont permis de valider le choix de la meilleure loi fait un peu plus tôt par le biais des graphiques.

CHAPITRE 4 : CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

4.1. Conclusion

L'analyse menée sur les extrêmes de débits de quatre sous bassins a pour objectif principal d'analyser l'évolution des indices de débits extrêmes dans la BMVO du Bénin. À travers le test non paramétrique de Mann-Kendall et de Sen-Theil, nous avons pu identifier des tendances significatives et sens de tendance dans l'évolution des débits dans les séries de données Q10 et Q95 de la station de Ahlan. Les résultats d'étude de variabilité montrent une variabilité distincte des débits extrêmes entre les sous bassins de l'étude. La détermination des années de ruptures à base des méthodes courantes et de la méthode d'Entropie-Croisée (méthode sensible aux variations des extrêmes) nous a permis de déceler des ruptures au niveau des sous bassins, approximativement similaires à celles observées dans de nombreuses études antérieures. Ces résultats sont des réponses moyennement favorables à notre première question de recherche car sur la plupart des stations les tendances sont non significatives soit à la hausse soit à la baisse à un seuil de 5%.

Les variations de pentes observées, en lien avec les extrêmes Q10, Q50 et Q95, suggèrent que la topographie est l'un des facteurs jouant un rôle essentiel dans la fluctuation des débits malgré que la végétation, les précipitations, le type de sol, l'urbanisation et les activités humaines en font partie. Ces résultats sont modérément favorables à notre deuxième question de recherches mais reste cependant une base solide pour de futures études sur l'impact des changements topographiques sur les bassins versants.

L'analyse fréquentielle nous a permis de choisir respectivement la loi log-normale, Gamma et GEV comme meilleure loi d'ajustement des extrêmes Q10, Q50 et Q95 ; ce qui est la réponse à notre troisième question d'étude. Ces différentes lois choisies plus tôt au niveau de l'analyse graphique, validés à partir du critère AIC, BIC et le test d'adéquation khi carré nous ont permis de déterminer les quantiles associés à chaque période de retour ainsi que l'intervalle de confiance associés à ces débits.

Malgré la robustesse des résultats obtenus dans cette étude, il est important d'en reconnaître certaines limites. En effet, les données hydrologiques ont été imputées pour combler les données manquantes dans les séries hydrologiques et les MNT n'ont été trouvés que sur trois années, diminuant l'approfondissement de l'étude. En outre, les modèles statistiques utilisés pour le calcul des débits associés à différentes périodes de retour ne tiennent pas compte des effets potentiels du changement climatique et topographique.

4.2. Perspectives et suggestions

A la lumière des résultats obtenus, un certain nombre de pistes de recherche et de suggestions peuvent être envisagées pour renforcer l'impact et la portée de cette étude.

❖ Pistes de recherches :

- ✚ Amélioration de la méthode de prétraitement des données;
- ✚ Augmentation de la taille des données ;
- ✚ Etude interannuelle de la pente de terrain pour vérifier s'il y a une dépendance des débits de la pente ou de la pente des débits ;
- ✚ Etudes complémentaires avec intégration de nouvelles variables (Climat ; végétation ; température ; ...) ;
- ✚ Utilisation de modèles avancés (modèles statistiques plus sophistiqués ou modèles basés sur l'intelligence artificielle)

❖ Suggestions

- ✚ Gestion du bassin en identifiant les zones à risques en cas de crue
- ✚ Politiques de conservation pour réduire l'érosion des sols pour minimiser la variabilité des débits.
- ✚ Aménagement du territoire (Construction des infrastructures : ponts, barrage...)

Références bibliographiques

- [1] Ague, E. (2015). Analyse fréquentielle des extrêmes pluviométriques dans la zone subéquatoriale du Bénin.
- [2] Bard, A., Renard, B., et Lang, M., 2012. Tendances observées sur les régimes hydrologiques de l'arc Alpin. *La Houille Blanche*, 1, 38–43. [doi:10.1051/lhb/2012006](https://doi.org/10.1051/lhb/2012006)
- [3] Berns, A. (n.d.). Introduction au calcul de taux d'accroissements.
- [4] Boko, M., et Adjovi, L. C. (1994). Recherche des tendances dans les séries pluviométriques du Bénin méridional : Implications agroclimatiques. Publication de l'association Internationale de climatologie, 7, 294–304.
- [5] Burn, D.H. et Elnur, M.A.H., 2002. Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of Hydrology*, 255, 107–122. [doi:10.1016/S0022-1694\(01\)00514-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00514-5)
- [6] Chingombe, W., et al., 2013. A Study of Hydrological Trends and Variability of Upper Mazowe Catchment, Zimbabwe, Disponible à: <http://www.jsd-africa.com/Jsda/Spring2005/article.htm> [Accessed February 10 2014].
- [7] El Garouani, A.(2009). Etude des facteurs physiques influençant les crues dans le bassin versants de l'oued Inaouène au Maroc
- [8] Faye, C. (2017). Variabilités des tendances observées sur les débits moyens mensuels, saisonniers et annuels dans le bassin de la Falémé (Sénégal).
- [9] Fêmi, et al. (2019). Évolution récente des débits dans la basse vallée de l'Ouémé, Sud-Bénin.
- [10] Grafton, R. Q. (2011). Global insights into water resources, climate change, and governance.
- [11] Hamed, K. H., et Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1–4), 182–196
- [12] Hamed, K.H. et Rao, A.R., 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204 (1–4), 182–196. [doi:10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- [13] Hounnondaho, F. (2020). Évolution des débits extrêmes au Bénin.
- [14] Japhet. (2019). Étude des indices de débits journaliers extrêmes à l'inondation dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de BONOU.

- [15] Kendall, M. (1975a). Multivariate analysis. London: Charles Griffin et Company.
- [16] Kendall, M. G. (1975b). Rank correlation measures. London: Charles Griffin.
- [17] Kendall, M.G., 1975b. Rank corrélation measures. London: Charles Griffin
- [18] Laib, R. A. (2019). Test des ruptures des séries chronologiques: Application sur des données météorologiques. Température à Soumaa W.Blida.
- [19] Leclair, S. F., et Roy, A.G.(1997). Variabilité de la morphologie et des structures sédimentaires du lit d'un confluent de cours d'eau discordant en période d'étiage. Géographie physique et Quaternaire, 51(2), 125-139. <https://doi.org/10.7202/033114ar>
- [20] Lemaitre. (2002). Identification de ruptures dans la série pluviométrique de Kouandé (p. 14).
- [21] Lemaitre. (2002). Identification de ruptures dans la série pluviométrique de Kouandé (p. 14).
- [22] Lubes-Niel, H., Masson, J. M., Paturel, J. E., et Servat, E. (1998). Variabilité climatique et statistiques : Étude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 11(3), 383–408.
- [23] Meublat, G. (2001). Les nouvelles politiques de l'eau : Enjeux urbains, ruraux, régionaux. Tiers-Monde, 42(166). Retrieved from https://www.persee.fr/issue/tiers_1293-8882_2001_num_42_166
- [24] Meylan, P., et Musy, A. (1999). Hydrologie fréquentielle. Bucarest: H G A.
- [25] Paturel, J.E., et al., 1997. Manifestations d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In : D. Rosbjerg et al., eds. Sustainability of water resources under increasing uncertainty. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences. IAHS Publ. 240, 21–30. Disponible à : http://iahs.info/uploads/dms/iahs_240_0021.pdf
- [26] Pierron, T. (2014, January 5). Étude de la loi Gamma.
- [27] ResearchGate. (n.d.). Test de segmentation de Hubert. Retrieved from <https://www.researchgate.net>
- [28] Servat, E., et al., 1998. Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. In : E. Servat et al., eds. Water resources variability in Africa during the XXth century / Variabilité des ressources en eau en Afrique au XXème siècle. Wallingford, UK: International Association of Hydrological

- Sciences. IAHS Publ. 252, 323–337. Disponible à : http://iahs.info/uploads/dms/iahs_252_323.pdf
- [29] Silva, V.P.R., 2004. On climate variability in north-east of Brazil. *Journal of Arid Environments*, 58 (4), 575–596. [doi:10.1016/j.jaridenv.2003.12.002](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2003.12.002)
- [30] Valimba, P., 2004. Rainfall variability in southern Africa, its influences on stream-flow variations and its relationships with climatic variations. Thesis (PhD), Rhodes University, Grahamstown. South Africa. Disponible à : <https://oatd.org/oatd/record?record=oai%5C%3Aeprints.ru.ac.za%5C%3A2900> [Accessed February 10 2014]
- [31] Wikipedia. (n.d.). Test de Sen-Theil. Retrieved from <https://www.wikipedia.org>
- [32] XLSTAT. (n.d.). Test de petit. Retrieved from <https://www.xlstat.com>
- [33] Yue, S., et Wang, C. Y. (2004). The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resources Management*, 18, 201–218.

Annexe

Annexe I : Résultats des tests de ruptures

Figure 15: Evolution de la variable U du test de Pettitt des extrêmes dans la BMVO

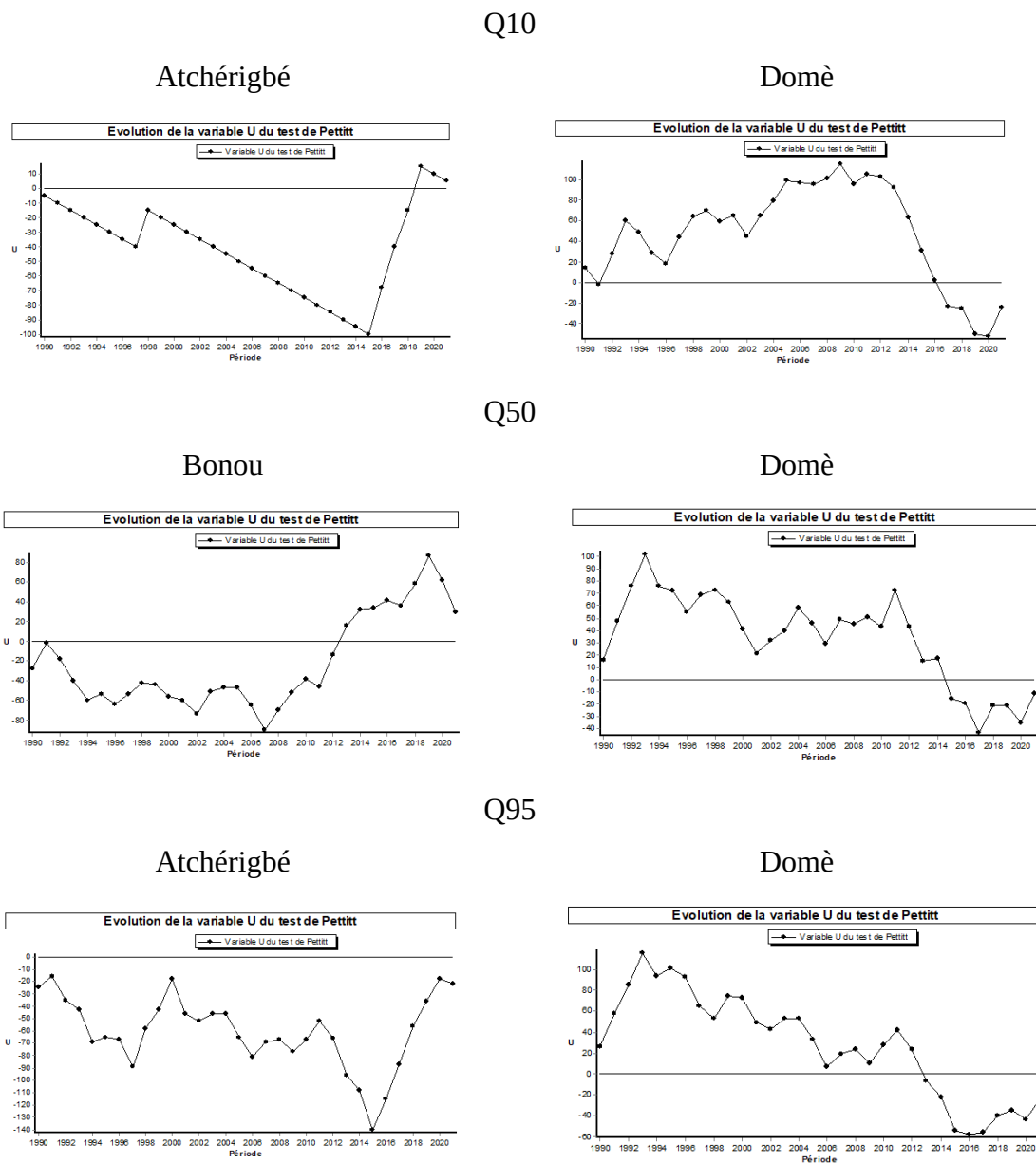
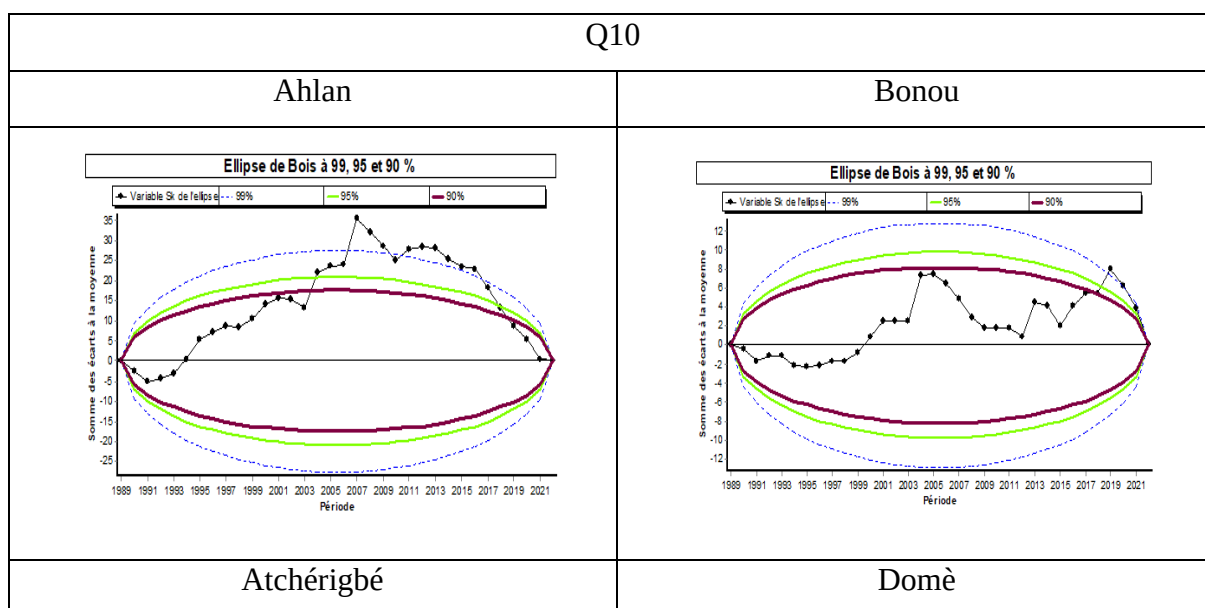


Tableau 13: Résultats du test de segmentation de Hubert.

Station	Début	Fin	Moyenne	Ecart type
Q10				
Ahlan	1990	2006	7.412	2.809
	2007	2007	17.700	0.000
	2008	2022	3.573	2.281
Atchérigbé	NA	NA	NA	NA

Bonou	1990	2022	7.770	4.572
Domè	1990	1991	2.450	0.354
	1992	1993	6.700	0.283
	1994	2020	2.352	0.424
	2021	2022	3.800	0.707
Q50				
Ahlan	1990	2022	17.627	10.904
Atchérigbé	1990	2022	5.921	7.052
Bonou	1990	2022	36.867	44.910
Domè	1990	1990	7.900	0.000
	1991	1991	52.400	0.000
	1992	2022	6.423	4.170
Q95				
Ahlan	1990	2022	755.797	269.059
Atchérigbé	1990	2015	177.438	138.482
	2016	2022	398.400	137.176
Bonou	1990	2022	790.333	188.589
Domè	1990	1990	587.300	0.000
	1991	1991	1360.100	0.000
	1992	1993	794.150	106.420
	1994	2022	99.714	34.928

Figure 16: Résultats du test de BUIHAND



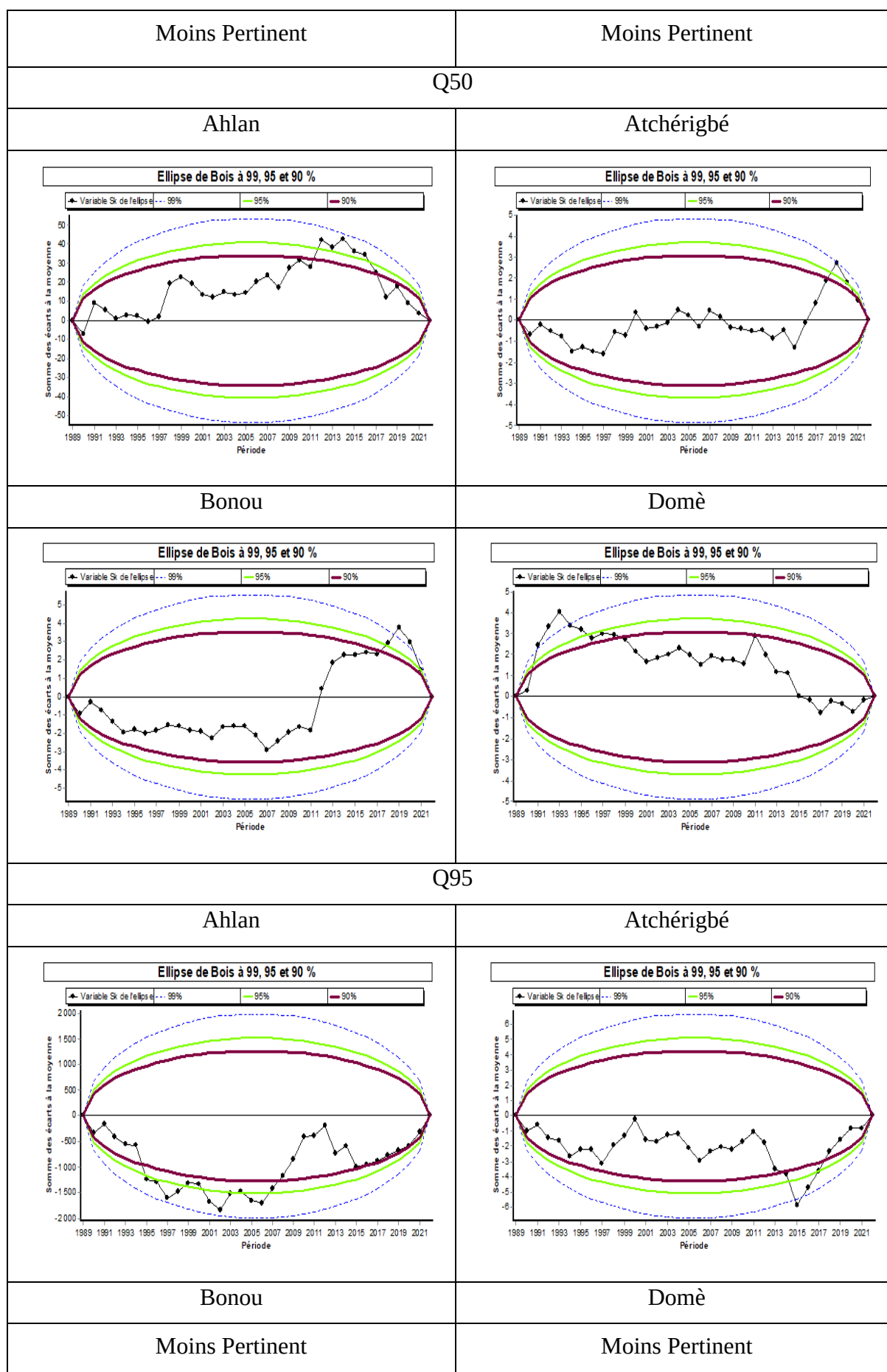
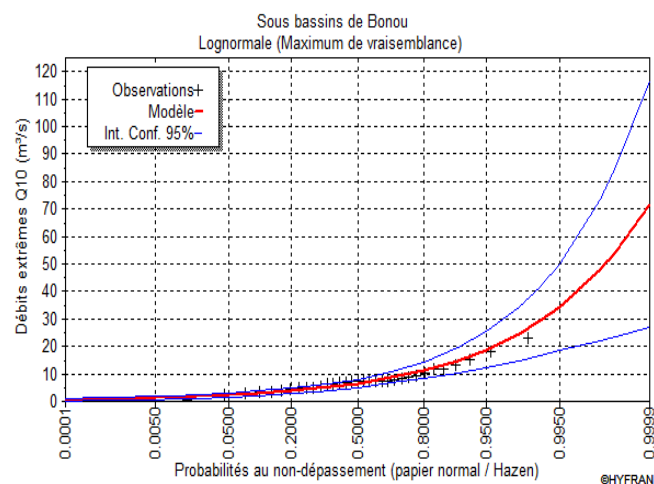
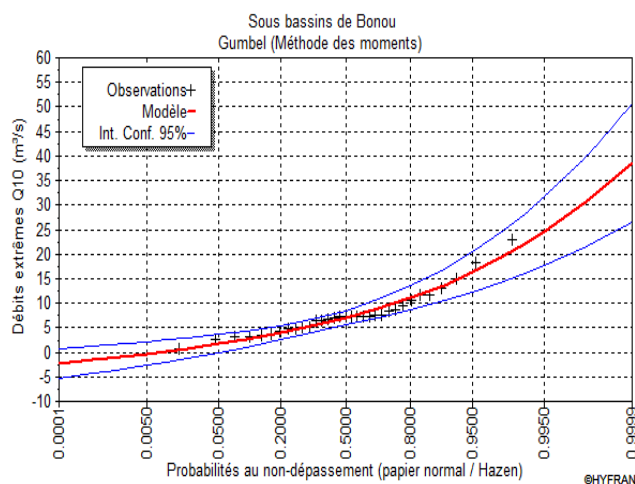
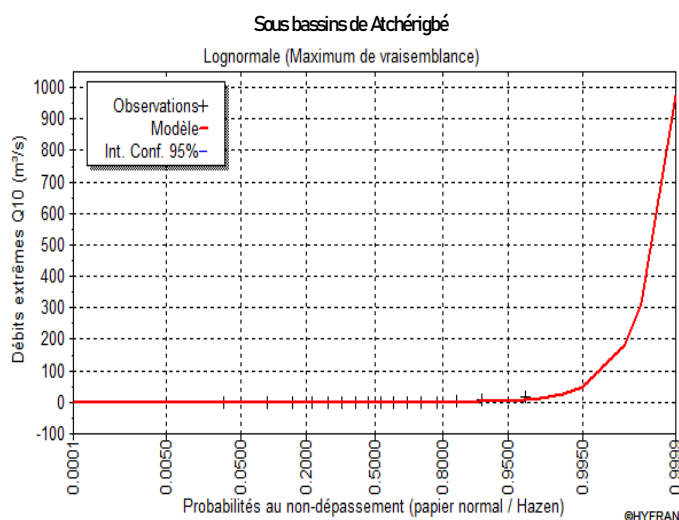
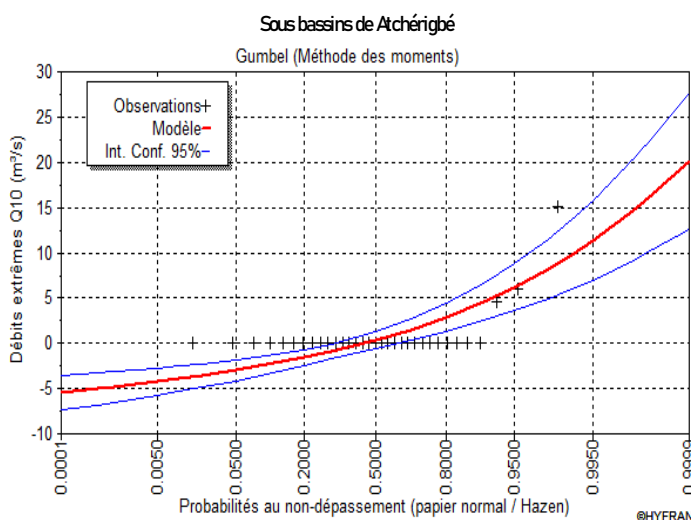
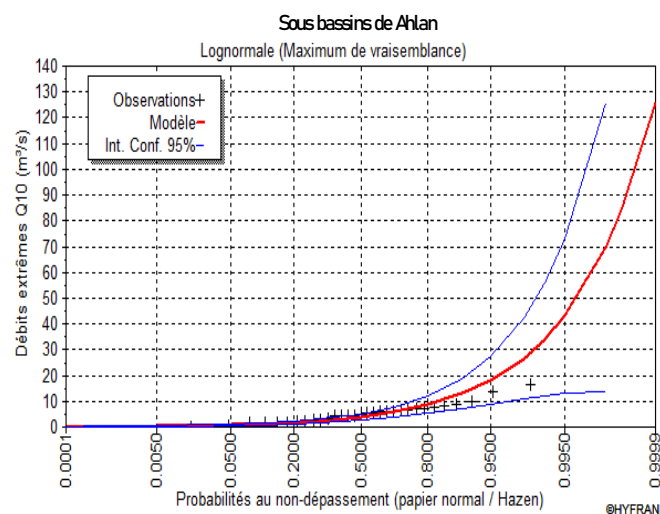
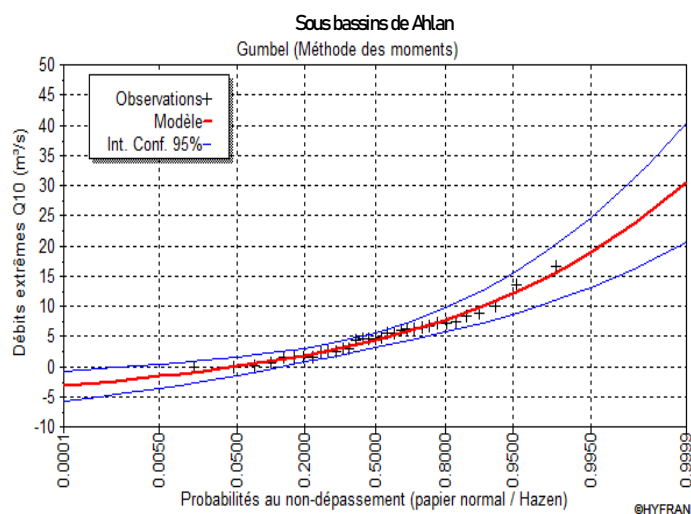


Tableau 14: La méthode de l'Entropie croisée

Station	Numéro de ligne ou la rupture a été détecté dans la série	Année correspondant
Q10		
Ahlan	14	2003
	18	2007
Atchérigbé	26	2015
Bonou	NA	NA
Domè	4	1993
Q50		
Ahlan	NA	NA
Atchérigbé	NA	NA
Bonou	22	2011
	26	2015
Domè	4	1993
Q95		
Ahlan	NA	NA
Atchérigbé	26	2015
Bonou	NA	NA
Domè	4	1993

Annexe II: Graphiques des lois d'ajustement



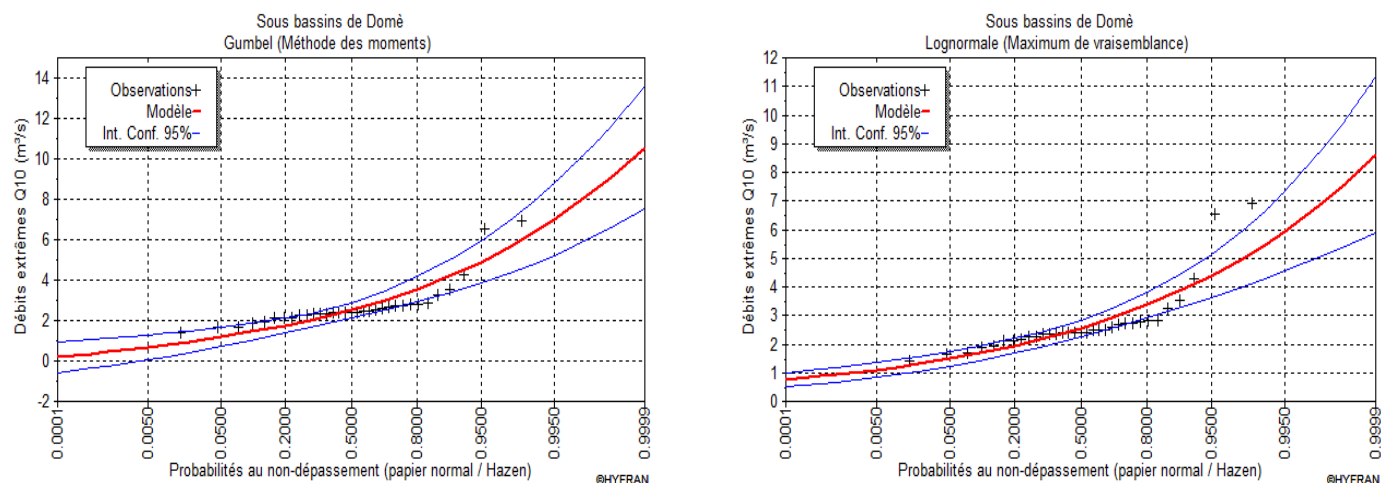
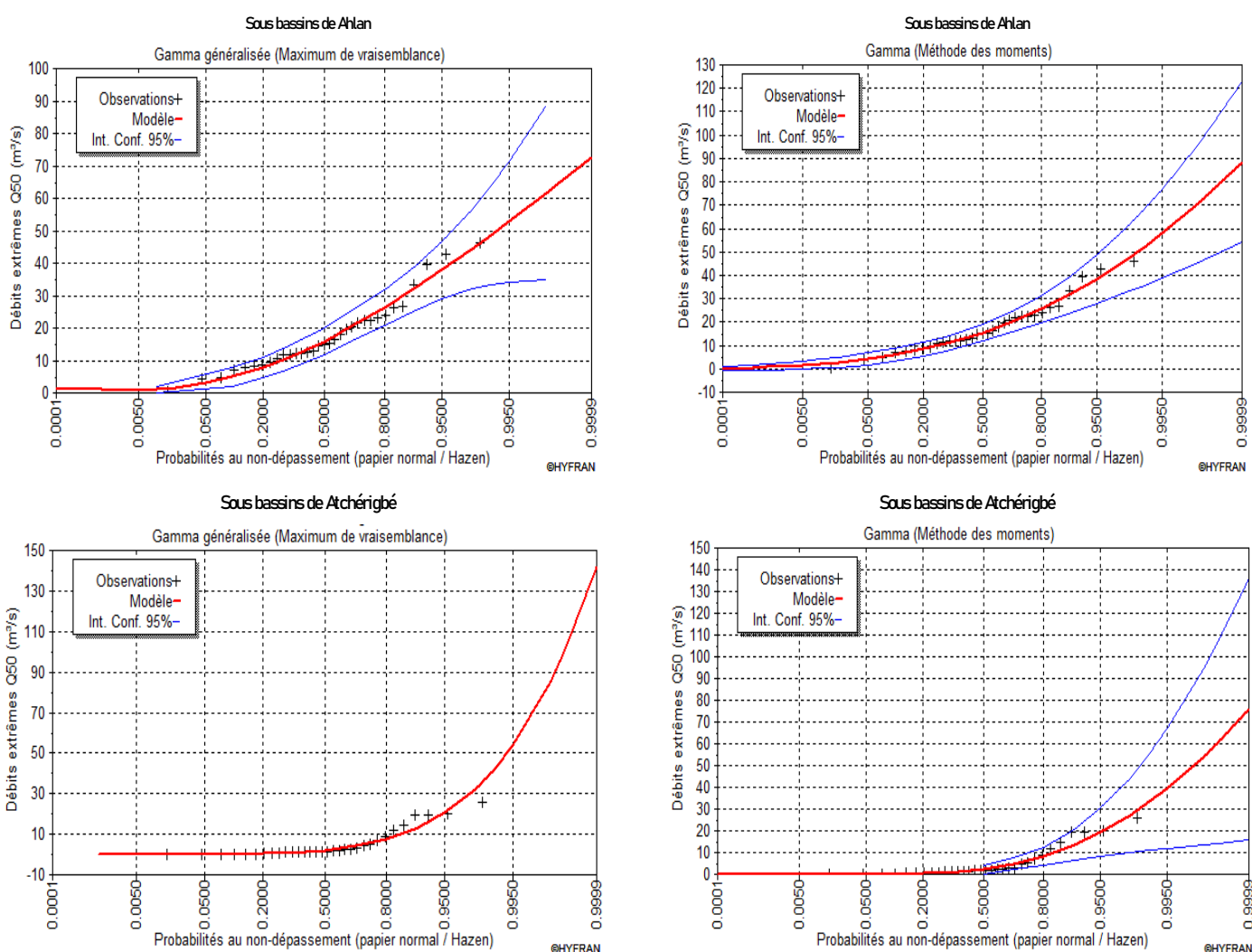


Figure 17: Graphes d'ajustement des débits extrêmes Q_{10} aux lois Gumbel et Log-normale



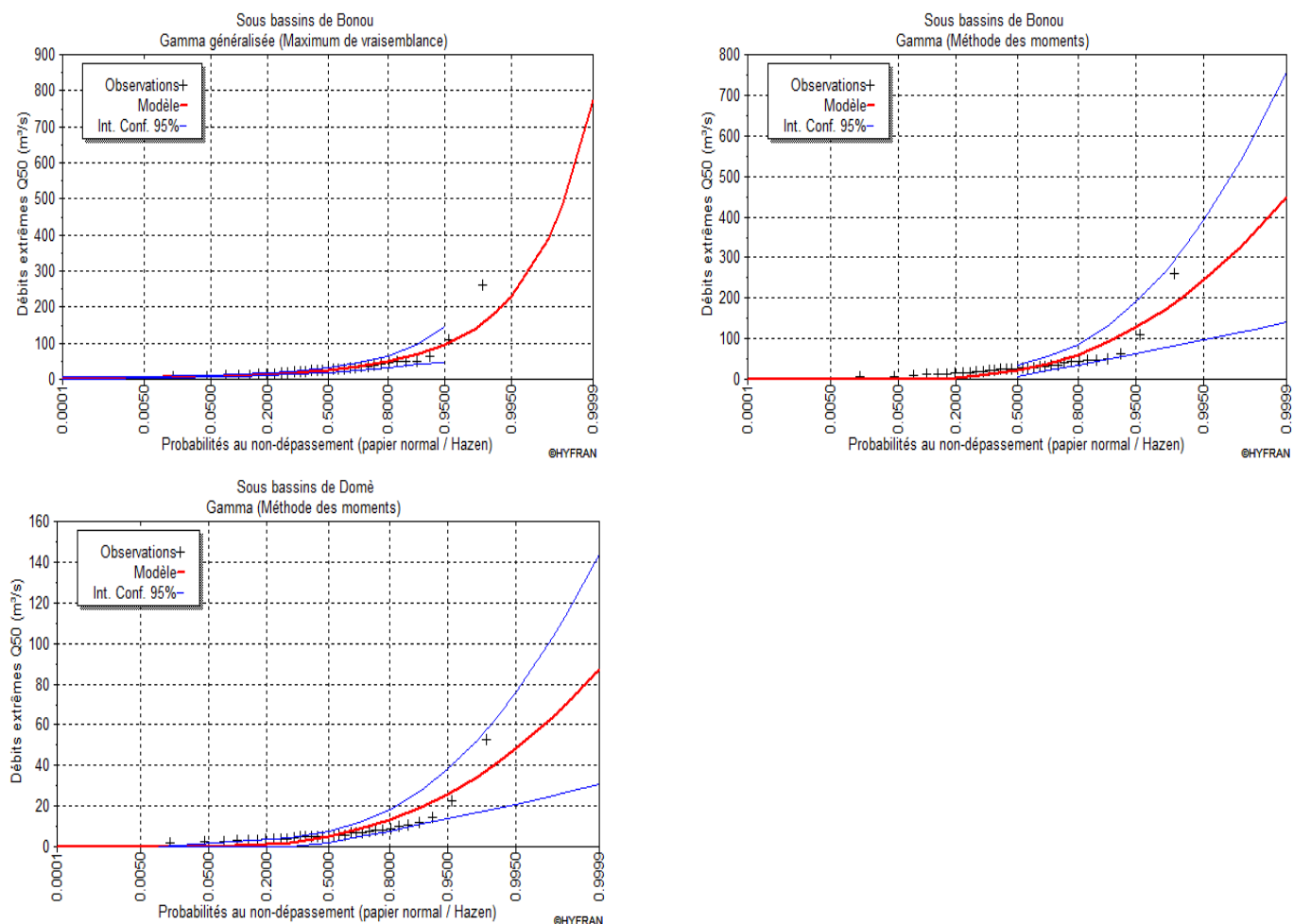
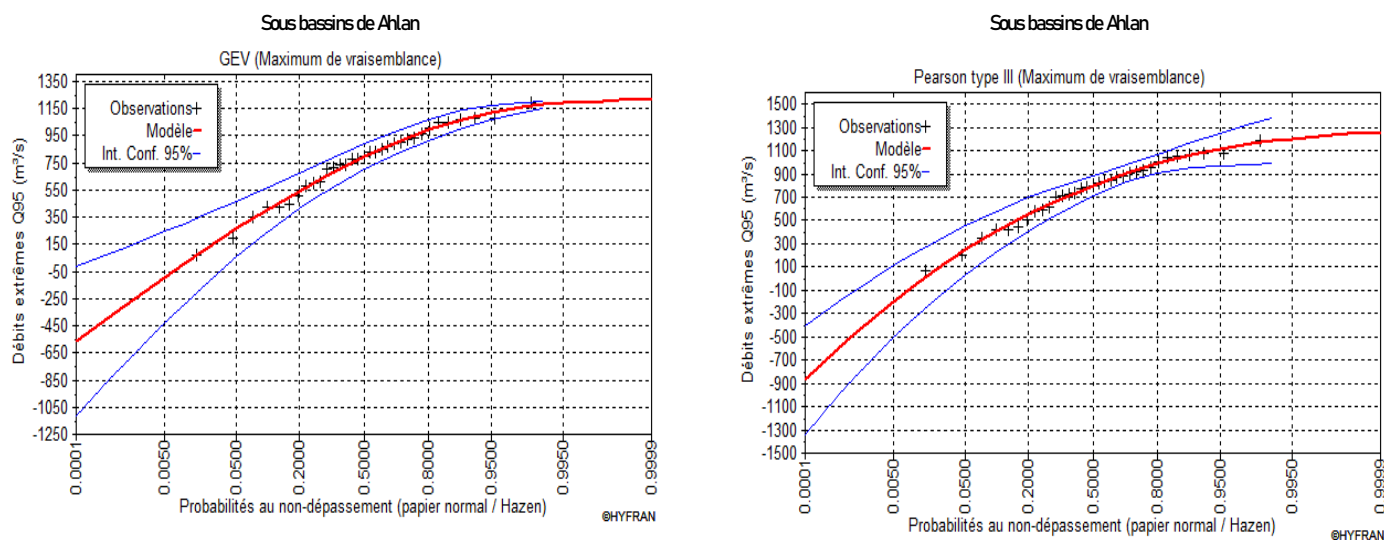


Figure 18: Graphes d'ajustement des débits extrêmes Q_{50} aux lois Gamma & et Gamma Généralisée



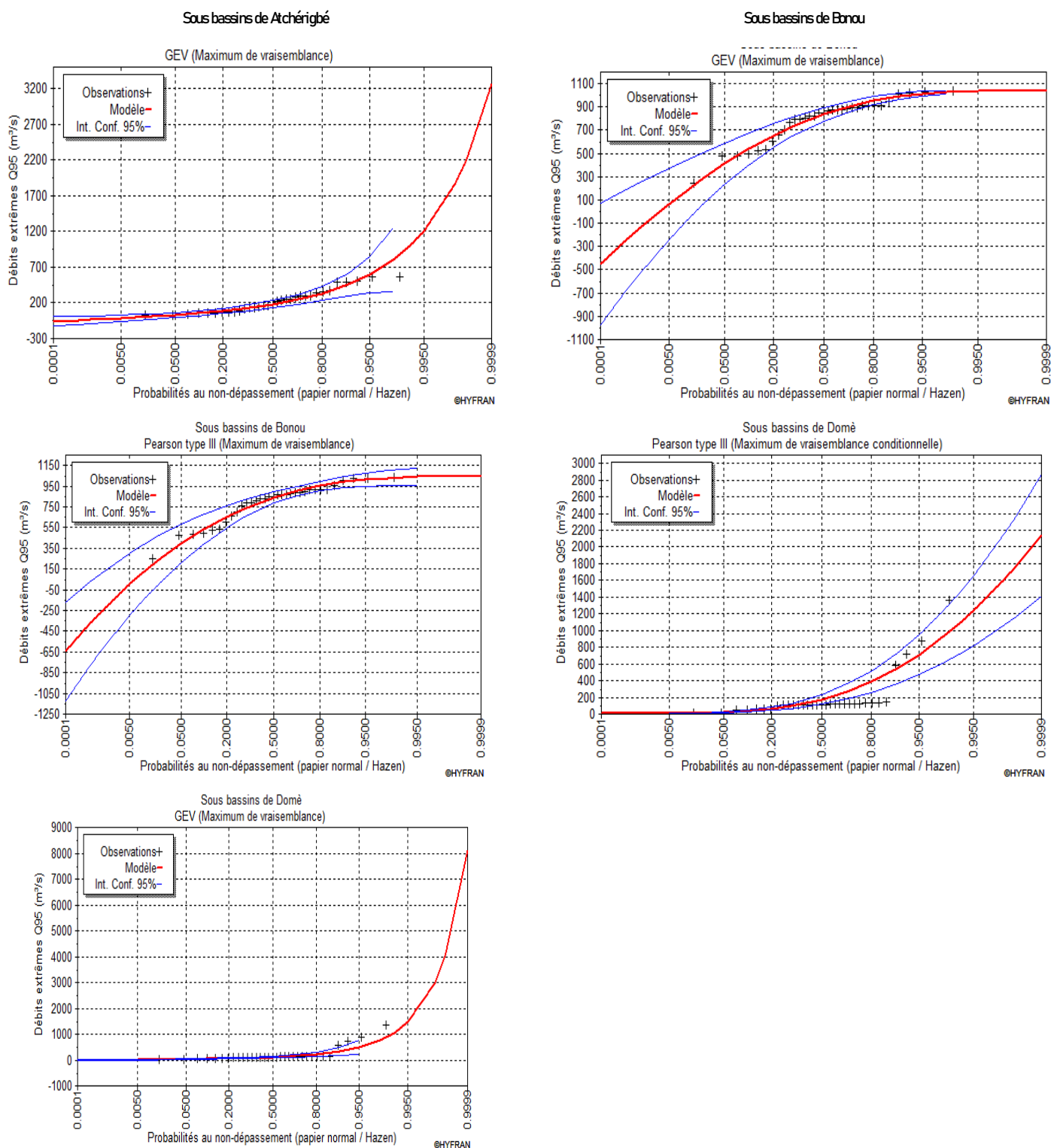


Figure 19: Graphes d'ajustement des débits extrêmes Q95 aux lois GEV et Pearson type III

Annexe III : Caractéristiques Statistiques des séries

Tableau 15:Caractéristiques statistiques des séries de Q10, Q50 et Q95

Station	N	Min	Max	Moy	Ecart-Type	Médiane	Cv	Cs	Ck
Q10									
Ahlan	31	0.196	16.7	5.30	3.67	4.79	0.694	1.20	4.35
Atchérigbé	16	0.00200	15.1	1.63	4.03	0.0258	2.47	2.92	7.94
Bonou	33	0.701	22.9	7.76	4.58	7.17	0.590	1.52	5.15
Domè	33	1.41	6.91	2.72	1.16	2.41	0.429	2.67	8.78
Q50									
Ahlan	33	0.410	46.1	17.6	10.9	15.0	0.618	1.03	3.33
Atchérigbé	32	0.00700	25.8	5.07	7.10	1.50	1.40	1.70	4.08
Bonou	33	5.86	262	36.9	44.9	25.9	1.22	4.25	19.2
Domè	33	2.05	52.4	7.86	8.96	5.33	1.14	4.19	18.8
Q95									
Ahlan	33	67.7	1190	756	259	800	0.356	- 0.729	2.76
Atchérigbé	33	20.6	571	224	164	172	0.732	0.740	2.31
Bonou	33	248	1030	790	189	849	0.239	-1.10	3.29
Domè	33	8.97	1360	195	282	113	1.45	3.06	10.4

N : Nombre d'observation ; Min : Minimum ; Max : Maximum ; Moy : Moyenne ;

Cv : Coefficient de variation ; Cs : Coefficient d'asymétrie ; Ck : Coefficient d'aplatissement.

Annexe IV : Résultats des tests

Tableau 16: Résultats des Tests pour Q10, Q50 et Q95

Stations	Test d'indépendance		Test de stationnarité		Test d'homogénéité	
	Q10					
	U	P	K	P	W	P
Ahlan	1.35	0.176	2.45	0.0144	2.41	0.0159
Atchérigbé	1.18	0.238	1.22	0.224	0.530	0.596
Bonou	0.628	0.530	1.04	0.299	2.04	0.0418
Domè	3.05	0.00228	1.50	0.133	1.77	0,0774

Q50						
Ahlan	0.349	0.727	0.976	0.329	0.666	0.505
Atchérigbé	1.11	0.268	0.405	0.685	0.132	0.895
Bonou	2.84	0.00453	0.821	0.412	0.865	0.387
Domè	1.48	0.140	0.945	0.345	0.774	0.439
Q95						
Ahlan	0.334	0.738	2.31	0.0210	2.40	0.0166
Atchérigbé	1.52	0.128	1.77	0.0773	1.19	0.234
Bonou	0.536	0.592	1.26	0.209	1.66	0.0975
Domè	4.57	4.96E-006	0.573	0.566	0.576	0.564