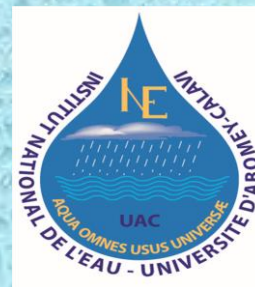




UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=====

INSTITUT NATIONAL DE
L'EAU



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES
RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

N'KOUÉ YOKA Timontidoka Elvire

Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE Professionnelle en Hydrologie

OPTION : Hydrologie Quantitative

=====

VERS L'ACTUALISATION DES NORMES
HYDROLOGIQUES POUR LE DIMENSIONNEMENT DES
OUVRAGES HYDRO-AGRICOLES

=====

Maître de stage

Ir. Codjo Sèdami Franck
Augustin LEGBA

Maître de Mémoire

Dr Djigbo Félicien BADOU



Dédicace

Je dédie ce mémoire à ma mère M'PO Tchéta pour son amour, son soutien inébranlable et ses conseils qui m'ont guidé jusqu'à ce jour

Remerciements

Dire « Merci » est et demeure un acte de gratitude envers ceux qui accordent une grâce. Ainsi, je ne saurais commencer la rédaction de ce travail sans témoigner ma gratitude à toutes les personnes qui n'ont ménagé aucun effort pour sa réussite.

Je tiens à remercier :

- ✚ Dr Djigbo Félicien BADOU, mon maitre de mémoire pour avoir accepté nous accompagner dans ce travail malgré ses multiples occupations, pour ses conseils scientifiques et pour sa disponibilité tout au long de ce travail ;
- ✚ Ir. C. S. Franck Augustin LEGBA Responsable des Infrastructures au PSAAB, mon Maitre de stage pour avoir accepté de superviser ce travail malgré ses multiples occupations ;
- ✚ Aux membre du jury pour avoir accepté évaluer ce travail.
- ✚ Prof. Abdoukarim ALASSANE, le Chef du Département d'hydrologie pour tous les efforts qu'il a fournis pour la formation des étudiants ;
- ✚ Dr Jean HOUNKPE, enseignant à l'INE pour ses explications et recommandations ;
- ✚ Dr N'TCHA M'po, enseignant à l'INE pour ses conseils et sa disponibilité ;
- ✚ Dr Charlène GABA, enseignante à l'INE pour ses conseils et sa disponibilité ;
- ✚ Dr Rita HOUNGUE, enseignante à l'INE pour ses conseils et sa disponibilité ;
- ✚ Tout le 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 reconnaissance et ma grande satisfaction.
- ✚ Tous mes camarades de l'INE pour l'ambiance et l'entraide qui ont régnées tout au long de notre formation et en particulier AFFOIGNON Xavy et ZANOUE Etienne qui m'ont soutenu lors de la rédaction de ce mémoire ;
- ✚ Tout le personnel du PSAAB et particulièrement au Coordonnateur National du PSAAB, Monsieur ZANNOU Jean Bienvenu ;
- ✚ Tous mes aînés d'hydrologie en particulier SAMBIENI Kévin, et HOUNNONDAHO Freddy Zinsè pour tous leurs conseils et explications ; merci à vous pour votre attention ;

- ✚ A mes frères et sœurs, qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans mes études et grâce à qui j'ai grandi dans un milieu épanouissant ;
- ✚ Enfin un sincère merci à tous ceux qui de près ou de loin m'ont soutenu dans l'aboutissement de ce travail

Résumé

Avec la variabilité climatique, les inondations et les sécheresses sont les principaux risques qui menacent les populations en Afrique de l'Ouest et au Bénin en particulier. Ainsi, la connaissance des quantiles de précipitations extrêmes comme normes hydrologiques est nécessaire dans le cadre de projets d'aménagement pour la conception d'ouvrages hydro-agricoles. L'objectif de cette étude est d'actualiser les normes hydrologiques pour le dimensionnement et la sécurité des ouvrages hydroagricoles dans le département du Borgou. Pour atteindre cet objectif, les précipitations journalières maximales annuelles de trois (3) stations de ce département sur la période de 1957 – 2021 ont été utilisées. L'approche méthodologique utilisée a consisté d'abord, à faire la synthèse des normes hydrologiques ou méthodes de prédétermination des crues actuelles de dimensionnement des ouvrages hydro-agricole au Bénin. Ensuite, faire une analyse de la pertinence de ces normes ou méthodes de prédétermination des crues sur deux sites (bas-fonds de Wookou dans la commune de N'Dali et le barrage de Kinkinnin-Darou dans la commune de bembèrèkè) se trouvant dans le département du Borgou et enfin faire des propositions pour une actualisation des méthodes. Les résultats ont montré que les méthodes de prédétermination hydrologiques les plus utilisées au Bénin sont les méthodes de ORSTOM et de CIEH. L'analyse de la pertinence de ces méthodes a montré que sur les deux sites les débits décennaux trouvés par la méthode de ORSTOM sont un peu plus petits que ceux obtenus par l'analyse fréquentielle effectuée alors qu'ils sont généralement six (6) fois plus petit avec la méthode du CIEH. Ainsi, pour une meilleure sécurité des ouvrages hydro-agricoles, les recommandations sont d'utiliser la méthode d'analyse fréquentielle pour le dimensionnement. Pour la valeur du gradex, nous proposons 0,41 comme gradex locale dans le Borgou dans l'application des méthodes empiriques de l'ORSTOM et du CIEH pour le dimensionnement des ouvrages hydro-agricoles.

Mots-clés : *variabilité climatique, normes hydrologiques, ouvrages hydro-agricoles, Borgou*

Abstract

With climate variability, floods and droughts are the main risks that threaten populations in West Africa and in Benin in particular. Thus, the knowledge of the quantiles of extreme rainfall as hydrological standards is necessary within the framework of development projects for the design of hydro-agricultural works. The objective of this study is to update the hydrological standards for the design and safety of hydro-agricultural infrastructures in Borgou Department. To achieve this objective, the maximum annual daily rainfall of three (3) stations in this department over the period 1957 - 2021 was used. The methodological approach used consisted firstly, in making a synthesis of the hydrological standards or methods of predetermination of the current floods of dimensioning of the hydro-agricultural works in Benin. Then, to make an analysis of the relevance of these standards or methods of flood predetermination on two sites (Wookou and the Kinkinnin-Darou) located in the department and finally to make proposals for an update of the methods. The results showed that the hydrological predetermination methods most used in Benin are the ORSTOM and CIEH methods. The analysis of the relevance of these methods showed that on the two sites the decennial flows found by the ORSTOM method are a little smaller than those obtained by the frequency analysis performed while they are generally six (6) times smaller with the CIEH method. Thus, for better safety of hydro-agricultural structures, the recommendations are to use the frequency analysis method and to use the local average value of 0.41 for the gradex in Borgou in the application of the empirical methods of ORSTOM and CIEH for the dimensioning of hydro-agricultural structures

Keywords: *climate change, hydrological standards, hydro- agricultural structures, Borgou*

Sigles et acronymes

CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques.

CIEH : Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques

GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Expert sur l'Evolution du Climat.

GR2M : Génie Rural à 2 paramètres Mensuel

HYFRAN : HYdrological FRequency Analysis.

INE : Institut National de l'Eau.

IPCC : Intergovernmental Panel of Climate Change.

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer

PSAAB : Projet de Sécurité Alimentaire par l'Aménagement des Bas-fonds et le Renforcement des Capacités de Stockage au Bénin

Listes des figures

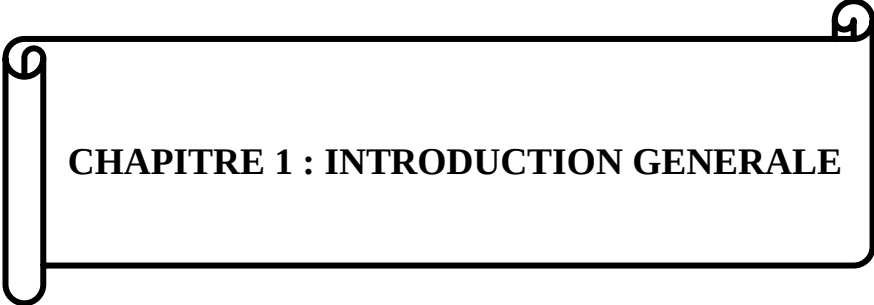
Figure 1 : Carte de situation du département du Borgou	11
Figure 2 : Carte du relief de Borgou.....	12
Figure 3 : Carte hydrographique de Borgou.....	14
Figure 4 : Localisation des stations pluviométriques de la zone d'étude	15
Figure 5 : Bassins versants de Wookou et de Kinkinnin-Darou	23
Figure 6 : Evolution de la variable U du test de Pettitt des stations de Bembèrèkè, Kalalé et de Parakou.....	24
Figure 7 : Ajustement de la loi de Gumbel sur les trois stations.....	25

Listes des tableaux

Tableau 1 : Stations de la zone d'étude.....	15
Tableau 2 : Les valeurs des paramètres de régressions associable au site.....	19
Tableau 3 : Valeurs des paramètres de BIC et AIC	26
Tableau 4 : Quantiles estimés sur les stations de Bembèrèkè, Kalalé et Parakou.....	27
Tableau 5 : Quantiles des pluies journalières maximales annuelles et intervalles de confiance	28
Tableau 6 : Analyse fréquentielle du bassin de Kinkinnin-Darou et du bassin de Wookou....	29
Tableau 7 : Application de la méthode de CIEH sur les sites de Kinkinnin-Darou et Wookou	30
Tableau 8 : Détermination des débits décennaux sur les sites de Kinkinnin-Darou de Wookou par la méthode de ORSTOM.....	30
Tableau 9 : Valeurs du gradex des méthodes de ORSTOM et CIEH	31
Tableau 10 : Récapitulatif des résultats des différentes méthodes.....	32
Tableau 11 : Ecart relatif entre les gradex locaux et le gradex sous régional de ORSTOM et CIEH.....	34
Tableau 12 : Caractéristiques statistiques des séries pluies maximales journalières	I
Tableau 13 : Résultats des tests.....	I
Tableau 14 : Résultats du test de Khi-deux pour les trois stations.....	II

Sommaire

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iv
Abstract	v
Sigles et acronymes	vi
Listes des figures	vii
Listes des tableaux	8
Sommaire	ix
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 2 : DONNEES, MATERIELS ET METHODOLOGIE	10
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION	21
CHAPITRE 4 : CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	35
Références bibliographiques	38
Annexe	I
Table des matières	III



CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION

Les enjeux de développement, socio-économique, liés à l'eau sont innombrables et font d'elle une ressource naturelle indispensable et irremplaçable pour les divers besoins de l'homme surtout en matière de boisson, de production, d'énergie, de navigation, de tourisme etc. (Dahodo, 2013). Avec les changements climatiques, l'estimation des précipitations et des écoulements associés aux événements extrêmes comme normes hydrologiques est un sujet qui suscite de plus en plus d'intérêt dans le domaine des sciences de l'eau. Or le problème le plus souvent posé aux hydrologues est celui de donner un ordre de grandeur des crues maximales à craindre en un point d'un cours d'eau. Ces crues retiennent tout particulièrement l'attention du public en raison des effets dévastateurs qu'elles entraînent sur le paysage, avec des conséquences très lourdes dans la vie des populations (Nka, 2016). Ainsi, la connaissance des quantiles des précipitations et des débits extrêmes est nécessaire dans le cadre des projets d'aménagement pour la conception des ouvrages hydrauliques tels que les ouvrages hydro-agricoles, les ouvrages de protection contre les inondations et les réseaux d'assainissement pluviaux. Ces quantiles sont en général déterminés à partir de données pluviométriques qui sont influencées par une instabilité du climat (Kouassi et al., 2019).

En dehors du contexte climatique déficitaire, le Bénin à l'instar des autres pays de l'Afrique de l'Ouest sont confrontés à de graves problèmes d'inondation tant en milieu urbain que rural (Goula et al., 2010 ; Soro, 2011 ; Panthou, 2013 ; Kouassi et al., 2019). Les inondations ont constitué durant ces dernières années un risque majeur pour le territoire national du Bénin, surtout pour les villes situées au sud et Nord-Est (Cotonou, Abomey-Calavi, Bonou, Malanville, Karimama, etc.). En Afrique de l'Ouest et centrale en générale et au Bénin en particulier, les ouvrages hydrauliques sont souvent dimensionnés à partir des méthodes de l'Office de la recherche scientifique et technique outre-mer (ORSTOM) et la Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH) (Bambara, 2011 ; Kouassi et al., 2019 ; Nka, 2016; Ague & Afouda, 2015). La détermination de la crue centennale (crue de projet) à partir de la crue décennale, il est utilisé un coefficient de majoration, supérieur à 1, qui dépend, entre autres paramètres, des pluies décennales (P_{10}) et centennales (P_{100}). Ce coefficient est appelé gradex (gradient des valeurs extrêmes) (Kouassi et al., 2019). Selon les auteurs de ces méthodes, le gradient prendra une valeur de 0,45 en zone sahélienne et 0,38 en zone tropicale. Cependant, les nouvelles conditions climatiques et hydrologiques rendent les méthodes de dimensionnement des ouvrages hydrauliques et routiers obsolètes et leur application conduit soit à des sous dimensionnements, soit à des surdimensionnements (Bambara, 2011). Le Bénin étant dans la

zone tropicale, peu d'études ont été effectuées sur ce domaine. A partir de ces constats, notre étude abordera, la contribution à l'actualisation des normes hydrologique pour le dimensionnement des ouvrages hydro-agricole dans le Nord-Bénin afin de garantir la sécurité de ces ouvrages.

1.1. Revue de littérature

1.1.1. Clarification de certains concepts

- **Norme** : Selon Ouédraogo (2001), une définition simple de la norme est "la moyenne des valeurs observées". La moyenne est parfois remplacée par la médiane ou le mode pour tenir compte de l'irrégularité interannuelle.

- **Norme hydrologique** : Morel (1986) in Ouédraogo (2001) définit la norme hydrologique comme la moyenne d'une série la plus longue possible pour pouvoir valider les occurrences cinquantennales ou centennales, de la norme météorologique qui désigne une moyenne sur 30 ans. Cette dernière permet le calcul des normales pluviométriques qui sont des moyennes glissantes se succédant les unes aux autres tous les trente ans (1931-1960, 1941-1970, 1951-1980, etc.).

- **Stationnarité** : La stationnarité d'un échantillon c'est son indépendance par rapport au temps. Avant de procéder à un test statistique pour vérifier la stationnarité d'un échantillon, on peut vérifier visuellement, en reportant sur un graphique les valeurs des variables en fonction du temps, et observer s'il y a une tendance ou pas (Souanef, 2015). La littérature hydrologique s'intéresse plus particulièrement à deux formes de non-stationnarité, les tendances et les ruptures (Lemaitre 2002, in Koukponou, 2016). Dans leur document sur les tests de stationnarité, Faucher et al. (1997) considère qu'une série de données est dite stationnaire lorsque l'on ne retrouve pas de variations temporelles significatives autres que les fluctuations aléatoires dans les valeurs classées chronologiquement.

- **Rupture** : Selon Lemaitre (2002), une rupture désigne une modification brusque dans les propriétés d'un processus aléatoire. Elle suppose que ces propriétés sont stables de part et d'autre de l'année de rupture.

- **Quantile** : La notion de quantile est le terme général pour désigner les valeurs qui divisent un jeu de données en intervalles contenant le même nombre de données. Il y a donc un quantile de moins que le nombre de groupe créés puisqu'en divisant une population en n il y a bien $n-1$ quantiles (<https://manuelnumeriquemax.belin.education>).

- **Extrêmes** : Goubanova et Li (2007), qualifie d'« extrêmes », les différents types d'événements climatiques susceptibles de présenter des écarts importants à la normale climatologique. Se basant sur la définition du climat, Beniston et Stephenson (2004) déclarent que la notion d'extrême est très complexe et se réfère à l'éloignement de la valeur d'une variable météorologique, ou à une combinaison de ces dernières, par rapport à leurs valeurs moyennes

en un lieu et en un moment donné. Selon Decamps (2010), il s'agit d'un événement exceptionnel révélé par les valeurs inhabituelles atteintes par un ou plusieurs paramètres (température, pluie, ...) sur un territoire donné. Concernant les événements hydrologiques extrêmes, ce sont essentiellement les crues des cours d'eau suivies des inondations des plaines après un excédent pluviométrique ou des étiages à la suite de sécheresse pluviométrique. Selon l'OMM (2006) et Vissin (2007), les crues fluviales surviennent lorsque le volume d'encaissement du cours d'eau est dépassé et déborde dans la plaine d'inondation en raison des pluies torrentielles dans les secteurs notamment en amont du cours d'eau.

Changement climatique : Selon la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), le changement climatique est un changement du climat attribué directement ou indirectement à toute activité humaine qui modifie la composition de l'atmosphère de la Terre et qui s'ajoute à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes de temps comparables. Selon, le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (GIEC), le changement climatique se réfère à une variation statistiquement significative dans l'état moyen du climat ou dans sa variabilité, variation persistant sur une longue période de temps (décades ou plus). Le changement climatique peut être dû aux processus naturels internes ou à des forçages exogènes ou à des changements anthropogéniques persistants dans l'atmosphère ou dans les usages du sol.

1.1.2. Etat des connaissances

La présente revue a pour objectif de situer l'état des connaissances sur les processus hydrologiques et climatiques, dans le contexte d'étude de la variabilité des extrêmes pluviométriques.

- Evènements hydro climatiques extrêmes et variabilité

La précipitation est l'un des éléments climatiques les plus variés en passant d'une échelle à une autre. Sa variabilité a fait l'objet de plusieurs études dans le passé (Dahodo, 2013). Ainsi, de nombreuses études se sont penchées sur la question de la variabilité climatique et des ruptures dans les séries chronologiques des variables climatiques en Afrique tropicale (Mahé et al., 2001 ; Ouédraogo, 2001 ; Koumassi, 2014 ; Kouassi, 2011). Les résultats de ces études soulignent : un déplacement nord-sud des isohyètes, l'existence d'une rupture dans les séries chronologiques des paramètres climatiques autour des années 1970 et 1980, une variation interannuelle et annuelle très forte de la pluviométrie avec des écarts à la normale importants et une forte variation des caractéristiques de la saison (début, fin, longueur de la saison).

Dans son travail sur la caractérisation de la saison des pluies dans le centre-ouest du Sénégal, Ndong (2003) montre qu'il y a une tendance à la baisse des hauteurs de pluie de 1951 à 2000 et il détecte une rupture dans les séries pluviométriques en 1969. De l'étude comparative des sous périodes 1951-1969 (humide) et 1970-2000 (sèche), il ressort que les débuts de saison des pluies étaient plus généralement plus précoces lors de la première sous période puis tardifs à partir des années 1970.

Vissin (1998, 2001) a montré que les chroniques de la pluviométrie sur le bassin versant béninois du fleuve Niger ont connu une « rupture de stationnarité » en 1972. Les changements pluviométriques observés se sont largement amplifiés dans les écoulements et la recharge des sous bassins versants. Il a aussi souligné que les déficits les plus marqués s'observent au cœur de la saison des pluies, entraînant des déficits d'écoulements très sensibles. Ainsi, la sécheresse pluviométrique des dernières décennies serait responsable de la sécheresse hydrologique enregistrée dans le bassin.

Kouassi (2011) a relevé une très forte variabilité de la pluviométrie et des écoulements. Cette situation s'est traduite par des baisses plus ou moins significatives des volumes d'eau précipitées et des écoulements à partir de l'année 1970. Ces déficits annuels varient entre 14% et 31 % pour les précipitations et entre 44% et 55% pour les écoulements. Les volumes d'eau mobilisés par les aquifères connaissent également une diminution de 44% à 47%. De l'utilisation du modèle GR2M et la méthode des « horizons » ressort une augmentation de la température de 0,4 °C à 1,8°C à l'horizon 2031-2040 et de 3,2 à 5,8°C à l'horizon 2091-2100 et une diminution des écoulements de 18,8% à 34% en 2031-2040 et de 40% à 73% à l'horizon 2091-2100 selon les localités.

Koumassi (2014) en observant un non stationnarité de l'évolution de pluviométrie de 1960 à 2010, identifie trois phases dans l'évolution de la pluviométrie dans le bassin versant de la Sota. La première phase est marquée par des excédents pluviométriques, et concerne la période 1960-1972 ; la deuxième sous-série est caractérisée par des déficits pluviométriques entre la période 1973-1990. La troisième phase est caractérisée par une très forte instabilité dans l'évolution de la pluviométrie et concerne la période 1991- 2010. Selon lui cette variabilité pluviométrique observée dans le bassin versant est conforme à ce qui a été observé dans la plupart des travaux sur le régime des précipitations de la sous-région de l'Afrique de l'Ouest.

1.1.2.1. Normes Hydrologiques

Les normes hydrologiques sont très largement utilisées pour caractériser l'abondance des ressources en eau (Ouédraogo et al., 2002). La plupart, sinon l'ensemble, des publications en usage en Afrique de l'ouest et du centre dans le domaine de la planification et de la gestion des ressources en eau utilisent encore des informations ou des normes basées sur les périodes 1951-1980, voire 1941-1970. Plusieurs attitudes peuvent être adoptées :

- Il faut baser les nouvelles normes sur les données les plus récentes ;
- Il faut intégrer les données les plus récentes aux données plus anciennes. Car Agué et Afouda (2015) ont montré que les isohyètes proposées par le CIEH et utilisés par les aménageurs pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques ne couvrent pas tout le Bénin. Ce même constat a été fait par Goula et al. (2010) en Côte d'Ivoire.

Ainsi, le diagnostic de l'évolution récente des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale montre que sur une période de référence de 1950 à 1990, les précipitations ont baissé en moyenne de 15 à 20% et les écoulements de plus de 50%. Ce déficit pluviométrique et hydrométrique observé sur une longue période soulève le problème de la période de référence à considérer pour l'estimation des caractéristiques hydrologiques employées par les aménageurs dans le cadre de leurs projets. La persistance de la baisse des précipitations et des écoulements remet en cause certains automatismes et usages sur l'utilisation de séries chronologiques de référence (Ouédraogo, 2001).

De tout ce qui précède, la non stationnarité des précipitations et des écoulements, montre aisément que la prise en compte ou non des valeurs récentes des séries chronologiques de pluie et de débit puissent conduire à des décisions différentes en matière de planification et de gestion des ressources en eau (Ouédraogo, 2001 ; Bambara, 2011).

1.1.2.2. Révision des normes hydrologiques

De nombreuses publications des caractéristiques de crue, d'étiage ou de module des fleuves ont été réalisées en prenant comme postulat la stabilité du climat. L'observation des caractéristiques climatiques sur un certain nombre d'années permettrait de décrire le climat de manière convenable. L'O.M.M. recommande une période de 10 années de mesures d'une station hydrologique. Pouyaud (1986b) cité par Ouédraogo (2001) pense que compte tenu de la persistance interannuelle des phénomènes de sécheresse, cette recommandation semble insuffisante pour caractériser le régime hydrologique en Afrique soudano-sahélienne.

Olivry et al. (1994) cité par Bambara (2011) ont procédé à des prédéterminations des débits moyens journaliers maximums annuels du Niger à Koulikoro en scindant l'échantillon total des observations en deux parties, avant et après 1970. L'ajustement sur la période de 1971 à 1992 montre une sous-estimation de 24% par rapport aux résultats obtenus en considérant toute la période d'observation. Hubert et al. (1989) cité par Bambara (2011) après avoir mis en évidence des ruptures situées avec le maximum de probabilité entre 1968 et 1970 dans les séries de précipitations et de débits en Afrique de l'ouest recommandent que les normes hydrologiques soient désormais établies sur des données de la phase climatique récente. Les données de certaines phases climatiques antérieures, similaires à la phase climatique actuelle pourraient venir augmenter la taille de l'échantillon des données de la période récente. Ces auteurs pensent que l'on devrait s'orienter vers une conception dynamique des ouvrages hydrauliques (les réservoirs en particulier) de sorte qu'ils intègrent d'éventuelles fluctuations climatiques. La stratégie de conception devrait se baser sur le principe de la constitution de systèmes d'eau capables de résister aux effets de plusieurs années de sécheresse.

1.2. But de la recherche

Cette étude a pour but d'étudier les extrêmes pluviométriques passés afin d'évaluer les probabilités d'apparition future pour une meilleure adaptation. Elle sera ainsi une contribution au débat sur la révision des normes hydrologiques en général et la révision des quantiles des pluies et des débits extrêmes en particulier et un outil d'aide pour la gestion de nouveaux projets de construction des ouvrages hydrauliques.

1.3. Problème et question de recherche

La mobilisation et la maîtrise des ressources en eau sont conditionnées par la réalisation des ouvrages hydrauliques et hydro-agricoles. En Afrique de l'ouest en générale et au Bénin en particulier, tous les ouvrages hydrauliques sont dimensionnés soit par les méthodes probabilistes, soit par les méthodes empiriques dites méthodes de ORSTOM et de CIEH. Or l'estimation des précipitations associées aux événements extrêmes comme normes hydrologiques pour le dimensionnement est un sujet qui suscite de plus en plus d'intérêt dans le domaine des sciences de l'eau à cause du changement climatique qui représente aujourd'hui une menace potentiellement majeure pour l'environnement et le développement durable. Face à cette situation, il urge qu'une attention particulière soit portée sur la révision de ces normes et méthodes afin d'optimiser la sécurité de ces ouvrages. C'est pour répondre à cette préoccupation que la présente étude tend vers l'actualisation des normes hydrologiques pour le dimensionnement des ouvrages hydro-agricoles dans le département du Borgou.

Les questions de recherche que suscite le sujet se présentent comme suit :

- Quelles sont les normes hydrologiques de dimensionnement utilisées au Bénin ?
- Quelle est la réalité de l'impact de la variabilité climatique (pluviométrique) sur les débits extrêmes ?
- Les normes hydrologiques usuelles doivent-elles de ce fait être actualisées?

1.4. Objectifs du mémoire

1.4.1. Objectif général

L'objectif général de cette étude est d'actualiser des normes hydrologiques pour le dimensionnement et la sécurité des ouvrages hydroagricoles dans le département du Borgou.

1.3.1. Objectifs spécifiques

Trois objectifs spécifiques ont été formulés pour ce travail.

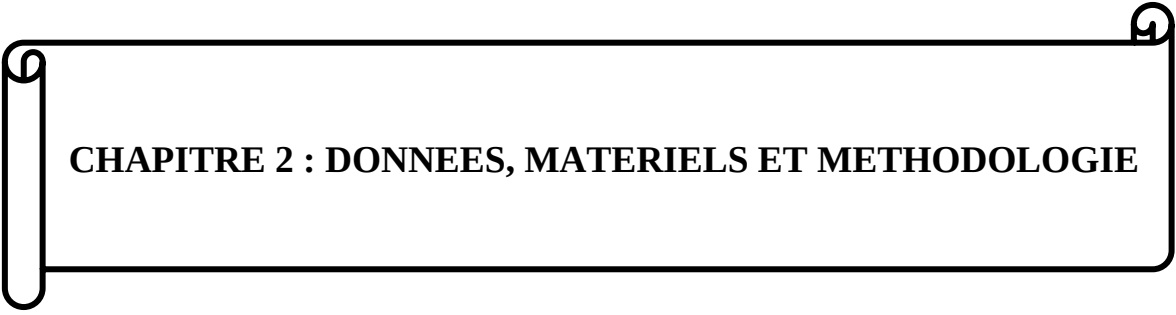
- Faire la synthèse des normes hydrologiques et méthodes de prédétermination des crues actuelles de dimensionnement des ouvrages hydro-agricole au Bénin ;
- Analyser la pertinence de ces normes hydrologiques et ces méthodes sur le site de N'Dali (Wookou) et sur le barrage de Kinkinin-Darou, commune de Bembèrèkè dans le département du Borgou ;
- Faire des propositions pour une actualisation de méthodes existantes de prédétermination hydrologique au Bénin.

1.5. Résultats attendus

Les résultats attendus à la suite de cette étude se résument en une meilleure connaissance des normes hydrologiques de dimensionnement au Bénin. Il s'agira de la connaissance des périodes de référence qu'il faut considérer pour dimensionner les ouvrages hydrauliques en générale et les ouvrages hydro-agricoles en particulier.

Notre étude a été structurée en quatre (04) chapitres :

Le premier chapitre est le présent chapitre intitulé « introduction générale », le deuxième chapitre présentera les données, les matériels et la méthodologie. Le troisième chapitre est consacré à la présentation des différents résultats et le quatrième et dernier chapitre présentera la conclusion générale et les perspectives.

A decorative rectangular frame with rounded corners and scroll-like details at the top and bottom edges, containing the chapter title.

CHAPITRE 2 : DONNEES, MATERIELS ET METHODOLOGIE

Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons le milieu d'étude c'est-à-dire sa situation géographique, hydrographique, son climat et sa végétation. Nous présenterons ensuite les données, les normes hydrologiques ou méthodes utilisées au Bénin pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques et la méthodologie utilisée pour la détection de tendance de ruptures et pour l'analyse fréquentielle.

2.1. Milieu d'étude

2.1.1. Localisation

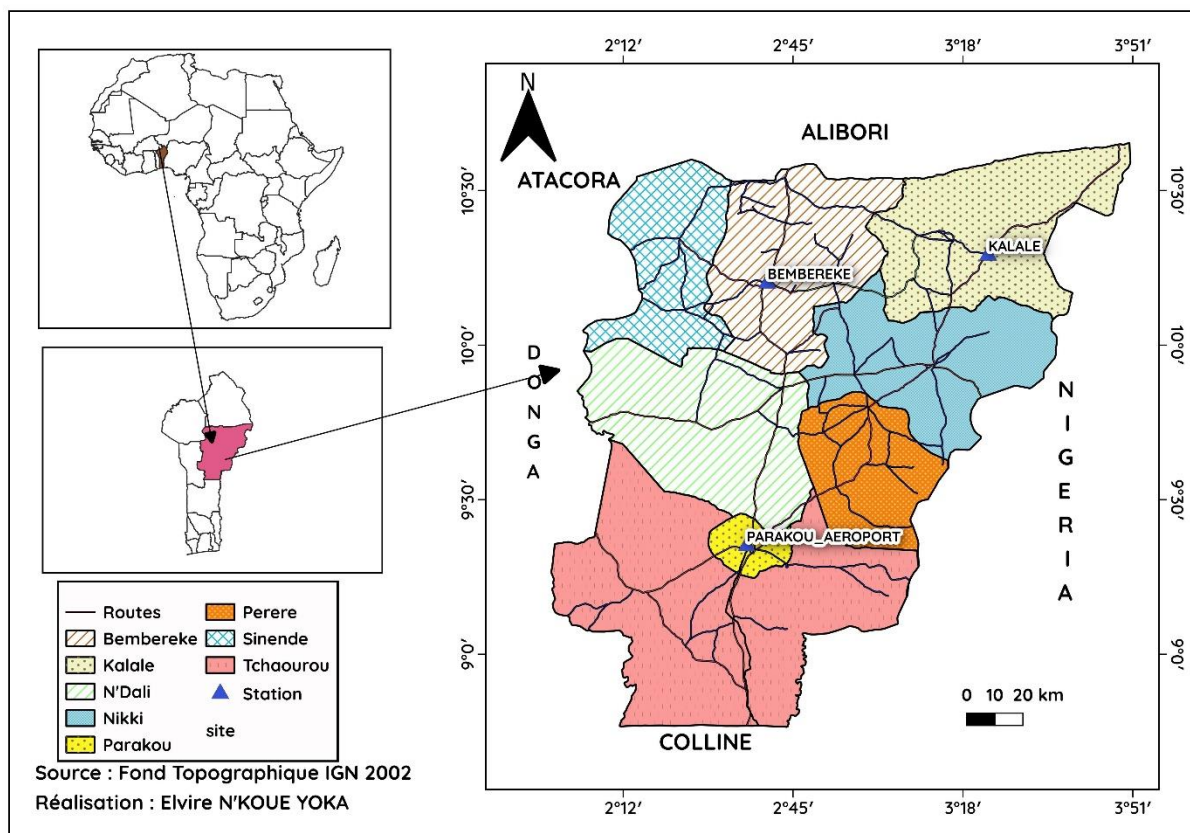


Figure 1 : Carte de situation du département du Borgou

Le département du Borgou est limité au Nord par le département de l'Alibori, au Sud par les départements des collines, à l'Est par la République Fédérale du Nigéria, et à l'Ouest par le département de l'Atacora et la Donga. Il s'étend sur une superficie de 25 856 km² (23% du territoire national) dont 13 962 km² de terres cultivables (54% de la superficie totale du département). Il est subdivisé en huit (8) communes. Il s'agit de Kalalé, N'dali, Pèrèrè, Nikki, Sinendé, Bembèrèkè, Parakou et Tchaourou. Ces communes sont subdivisées en 43 Arrondissements et 310 villages et quartiers de ville.

2.1.2. Relief et géologie

Le relief du Borgou comprend des terrains appartenant au bouclier africain et des terrains non plissés de bassins sédimentaires récents. Dans la région de Sinendé, le plateau de 300... 400m et les collines appelés ‘‘ Monts de Bembèrèkè ‘‘ forment la zone montagneuse du Borgou.

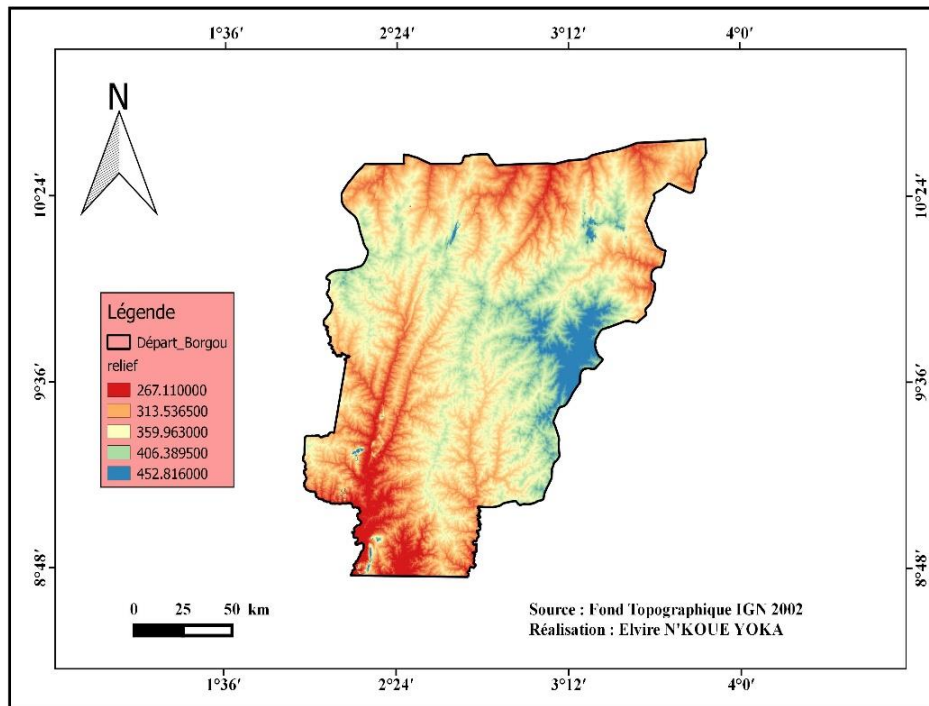


Figure 2 : Carte du relief de Borgou

Du point de vue géologique, le département du Borgou est constitué de socle précambrien du type dahoméen, avec une large frange sédimentaire alluvionnaire le long du Niger et des grès du crétacé au Nord-Est.

2.1.3. Climat du Borgou

Le département du Borgou bénéficie du climat du type soudanien avec une saison sèche et une saison des pluies. La pluviométrie annuelle varie entre 900 et 1 300 mm par an. La saison des pluies commence en avril et dure sept (7) mois environ. La température moyenne annuelle s'établit autour de 26°C avec un maximum de 35°C en mars et redescend aux environs de 23°C en décembre-janvier. L'humidité relative varie entre 30 et 70% (INSAE, 2016)

2.1.4. Sol, végétation et hydrographie

Les principaux types de sols rencontrés dans ce département sont surtout les sols ferrugineux tropicaux, des sols ferralitiques, des sols sablonneux argileux ou argilo sableux et les sols granito gneissiques à caractère très varié selon les séquences topographiques :

- ✓ Les sols ferrugineux tropicaux sont dominants dans la commune de N'Dali où ils sont profonds, non concrétionnés et soumis au lessivage.
- ✓ Les sols ferralitiques se rencontrent dans les communes de Sinendé, de Nikki, de Pèrèrè.
- ✓ Les sols sablo-argileux et granito-gneissiques de ce même groupe couvrent les communes de Bembèrèkè, de Kalalé où se rencontrent aussi des sols sableux.
- ✓ Les sols hydromorphes se retrouvent dans les vallées le long de l'Okpara et de l'Ouémé dans la commune de Tchaourou.

Quant à la végétation du Borgou, elle est une savane à physionomie diversifiée où la densité des arbres diminue vers le Nord. On y distingue quatre (4) types de végétation qui se rencontrent dans toutes ses communes :

- ✓ La savane herbeuse où les bois se font rares à cause des feux de brousse rencontrés dans les communes de Kalalé, de Bembèrèkè et de Sinendé, et dans les dépressions dominées par les Hyparhénia, les Loudetia, les Andropogon, les Pennisetum et de nombreuses Papilionacées, Rubiacées etc...;
- ✓ La savane arborée et arbustive se rencontre dans les communes de Nikki, de N'Dali, de Pèrèrè où la densité des arbres est plus élevée.
- ✓ La savane boisée dominée par des espèces comme Parkiabiglobosa B. faréii, Isoberliniaeunaceus et des herbes Andropogon,

Hyparhenia, Panicum, Schizachyrium

- ✓ La forêt galerie longe les fleuves et rivières et renferme les espèces comme Anogéissusleiocarpus, Bombax costatum, Adansoniadigitata avec des herbes plus ou moins sciaphyles et des discorea.

Le réseau hydrographique du département de Borgou est plus ou moins important. Il comporte les fleuves Alibori et Sota qui sont les affluents du fleuve Niger et arrose le nord du département et le fleuve Okpara, affluent du fleuve Ouémé arrosant le sud du département (INSAE, 2016).

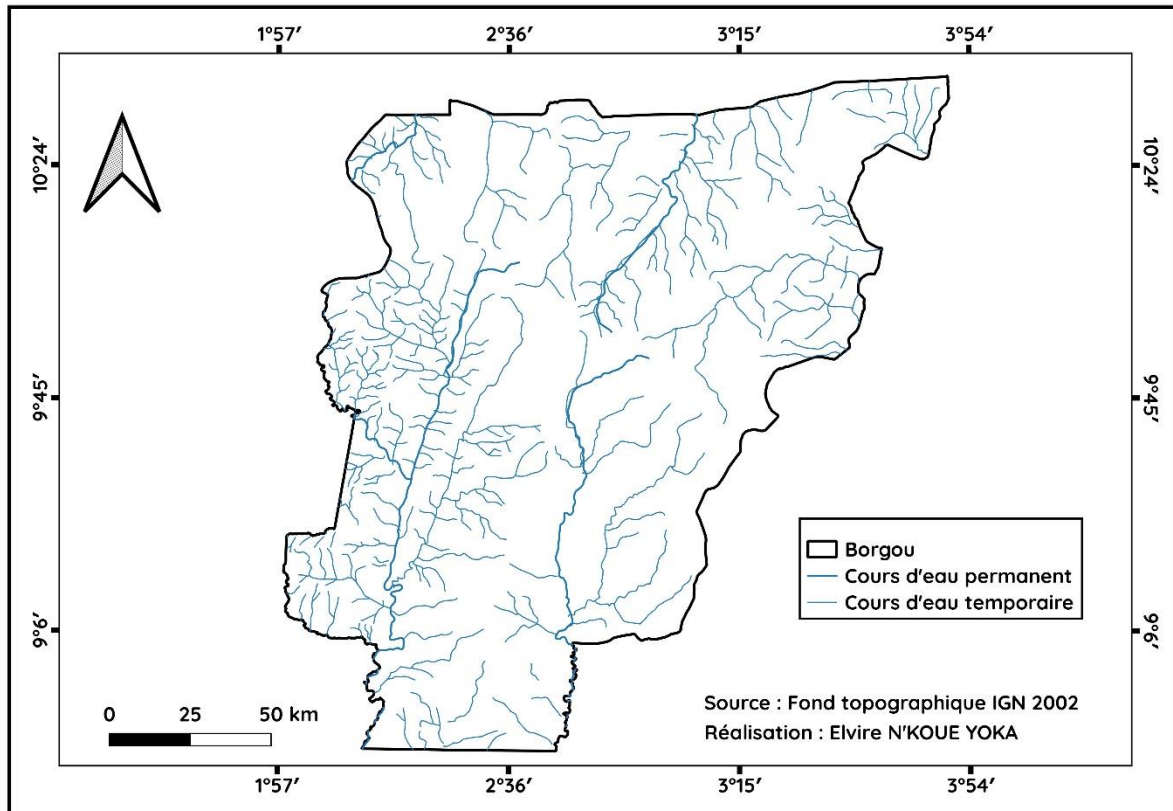


Figure 3 : Carte hydrographique de Borgou

2.2. Méthodes

2.2.1. La synthèse des normes hydrologiques ou méthodes de prédétermination des crues actuelles de dimensionnement des ouvrages hydro-agricole au Bénin

En ce qui concerne des méthodes de prédétermination hydrologique utilisées au Bénin, les rapports des études hydrologiques et documents techniques des ouvrages réalisés par quelques bureaux d'étude dans les villes de Cotonou et de Parakou, ont été exploités. Lesdits rapports ont été obtenus dans la bibliothèque du Projet de Sécurité Alimentaire par l'Aménagement des Bas-fonds et le Renforcement des Capacités de Stockage au Bénin (PSAAB). En plus des rapports, plusieurs personnes ressources du domaine de l'eau et de l'aménagement hydro agricole ont été également consultées.

2.3.2 La pertinence des normes hydrologiques et des méthodes de prédétermination sur le site de N'Dali (Wookou) et sur le barrage de Kinkinin-Darou, commune de Bembèrèkè dans le département du Borgou.

2.3.2.1. Données

Les données de pluies journalières ont été obtenus à METEO-BENIN. Ces données proviennent des stations pluviométriques de Bembèrèkè, Kalalé et Parakou et s'étendent sur la période de 1957-2021.

Tableau 1 : Stations de la zone d'étude

NOM	LONGITUDE	LATITUDE	PERIODE
Bembèrèkè	2°67'E	10°2'N	1957-2021
Kalalé	3°38'E	10°29'N	1957-2021
Parakou	2°6'E	9°35'N	1957-2021

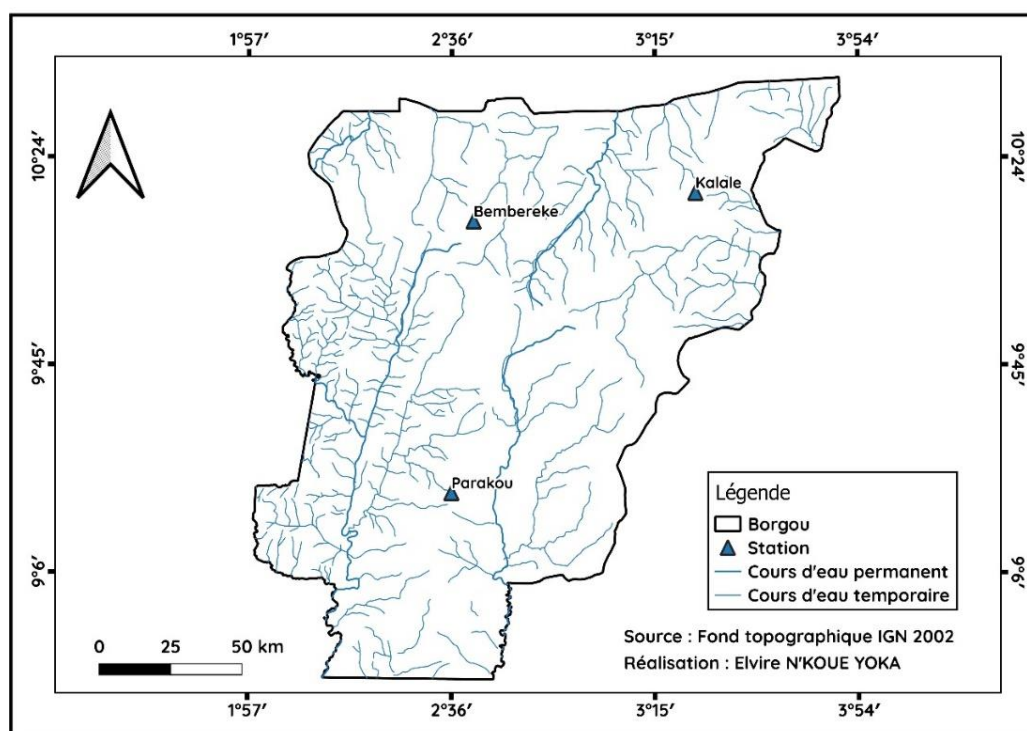


Figure 4 : Localisation des stations pluviométriques de la zone d'étude

2.3.2.2. Contrôle de la qualité des données

- Extraction des variables descriptives des pluies extrêmes

Comme pour tout type analyse statistique, la pertinence ou la qualité des résultats dépend en premier lieu de la qualité des données disponibles. Nous avons extrait les variables descriptives des pluies extrêmes. Car l'extraction des variables extrêmes constitue une étape importante de la modélisation statistique des pluies extrêmes. Les données pluviométriques ont été minutieusement traitées (Elimination des années avec beaucoup de lacune) en vue de constituer une série chronologique complète et fiable, exempte de toutes les valeurs aberrantes. Il existe plusieurs méthodes d'extraction des variables descriptives basées sur la théorie des valeurs extrêmes (Soro, 2011). Cependant, celle adoptée est l'échantillonnage des valeurs maximales. Il s'agit de sélectionner sur une année civile (du 1er janvier au 31 décembre), la hauteur de pluie journalière la plus élevée, c'est-à-dire la pluie journalière maximale annuelle (Kouassi et al, 2019).

2.4.2.3 Traitement des données, simulation et calculs

Cette étude s'applique aux stations du département du Borgou. Les périodes de rupture des séries chronologiques des stations concernées ont été déterminées. A la suite de ces déterminations, des estimations hydrologiques sur les différentes stations de la zone d'étude par l'analyse fréquentielle sur les différentes périodes ont été exécutées. Détection de tendance et de rupture au sein des séries pluviométriques.

- Détection de tendance et de rupture au sein des séries pluviométriques

➤ Test de Pettitt

Le test de Pettitt est non-paramétrique et dérive de celui de Mann-Whitney. L'absence de rupture dans une série (X_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle. Sa mise en œuvre suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N , les séries chronologiques (X_i) $i-1$ à t et $t+1$ à N appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,n}$ définie par : $U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n D_{ij}$ où $D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j)$ avec

$$\begin{cases} \text{sgn}(x) = -1 \text{ si } x < 0 \\ \text{sgn}(x) = 0 \text{ si } x = 0 \\ \text{sgn}(x) = 1 \text{ si } x > 0 \end{cases} \quad (3)$$

Dans cette étude, nous nous appuierons essentiellement sur les résultats du test de Pettitt pour nos conclusions sur la présence ou non de rupture dans nos séries. Les autres serviront alors de

confirmation et fourniront des précisions sur la nature et les caractéristiques de la série.

Méthode Bayésienne de Lee et Heghinian

La méthode bayésienne de Lee et Heghinian propose une approche paramétrique. Son application sur une série nécessite une distribution normale des valeurs de cette dernière. La méthode établit la distribution de probabilité à posteriori de la position dans le temps d'un changement. Lorsque la distribution est uni modale, la date de la rupture est estimée par le mode avec d'autant plus de précision que la dispersion de la distribution est faible.

➤ **Statistique U de Buishand**

La procédure de Buishand fait référence au même modèle et aux mêmes hypothèses que l'approche de Lee et Heghinian. L'hypothèse nulle du test statistique est l'absence de rupture dans la série. En cas de rejet de l'hypothèse nulle, aucune estimation de la date de rupture n'est proposée par ce test.

➤ **La méthode de segmentation de Hubert**

La procédure de segmentation de séries chronologiques proposée par Hubert, est appropriée à la recherche de multiples changements de moyenne. Elle fournit, au moyen d'un algorithme spécifique, une ou plusieurs dates de rupture (éventuellement aucune) qui séparent des segments contigus dont les moyennes sont significativement différentes au regard du test de Scheffé (Dagnelie, 1975 in Bambara, 2011).

Ces différents tests ont été réalisés avec le logiciel Khronostat

- **Analyse fréquentielle des pluies extrêmes**

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future.

Cette prédiction repose sur la définition et la mise en œuvre de modèles fréquents, au moyen d'équation décrivant le comportement statistique d'un processus. Ces modèles décrivent la probabilité d'apparition d'un événement de valeur donnée. L'analyse fréquentielle fait appel à diverses techniques statistiques qu'il convient de traiter avec beaucoup de rigueur.

Les principales étapes de l'analyse fréquentielle (Meylan et al., 1999) sont:

- Définition des buts de l'analyse ;

- Construction d'une série de valeurs ;
- Contrôle de la série de valeurs ;
- Choix du modèle fréquentiel ;
- Ajustement du modèle fréquentiel ;
- Contrôle de l'ajustement ;
- Analyse des incertitudes ;
- Exploitation du modèle fréquentiel.

L'analyse fréquentielle a été réalisée à l'aide du logiciel HYFRAN. HYFRAN est un logiciel permettant d'effectuer l'ajustement de plusieurs distributions statistiques à une série de données. Ce logiciel a été développé à l'INRS-ETE en collaboration avec le Service Hydraulique (Division hydrologie) d'Hydro-Québec dans le cadre de la chaire en hydrologie statistique.

Ces tâches peuvent être regroupées en deux catégories:

- Saisie des données et étude des caractéristiques statistiques de l'échantillon aléatoire ;
- Ajustement d'une ou plusieurs lois statistiques et analyse des résultats.

- La méthode CIEH

Puech et Chabi-Gonni ont proposé en 1983 une méthode de calcul de la crue décennale connue depuis sous le nom de méthode CIEH. La formulation retenue pour retrouver l'expression du débit décennal de pointe est basée sur un schéma de régression multiple et se présente dans le bulletin 54 de la FAO sous la forme :

$$Q_{10} = a * S^s * \bar{P}_{an}^p * I_g^i * K_{r10}^k * D_d^d \quad (1)$$

Où **a, s, p, k, i et d** sont des coefficients à déterminer. **s** est la surface du bassin versants (en km²), **$\bar{P}_{an}$** est la pluie annuelle moyenne (en mm), **I_g** est l'indice global de pente (en m/km), **K_{r10}** est le coefficient de ruissellement décennal (en %), et **D_d** est la densité de drainage (en Km⁻¹). La détermination de ces coefficients est effectuée par une méthode de régression linéaire multiple par palier, c'est-à-dire que l'on introduit successivement dans la régression les variables explicatives en fonction de leur degré d'explication de la régression.

Tableau 2 : Les valeurs des paramètres de régressions associable au site

N° régression	<i>a</i>	<i>s</i>	<i>i</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>r</i> ²
3	1,33	0,596	0,457			87	0,579
6	2,01	0,649	0,066	0,824		87	0,591

Parmi ces deux régressions, on a finalement retenu le N°3 à cause du manque de la densité.

- La méthode ORSTOM

Dans la méthode ORSTOM, la crue décennale est définie comme étant la crue provoquée par une pluie décennale, toutes les autres conditions étant celles observées le plus fréquemment lors de fortes averses (humectation du sol, état de la végétation, forme et répartition spatiale de la pluie). Le débit décennal de pointe (Q_{10}) est défini par la relation :

$$Q_{10} = A * P_{10} * K_{r10} * \alpha_{10} * \frac{S}{T_{b10}} \quad (2)$$

Avec **A** le coefficient d'abattement de la pluie, **P₁₀** la hauteur de pluie journalière décennale, **K_{r10}** le coefficient de ruissellement décennal, **α₁₀** le coefficient de pointe correspondant à la crue décennale, **S** la superficie du bassin versant, et **T_{b10}** le temps de base correspondant à la crue décennale. Ces différents paramètres sont déterminés à l'aide d'abaques ou de formules. Seul **α₁₀** peut dans de nombreux cas, être assimilé à une constante.

- Le coefficient d'abattement A :

Le coefficient d'abattement est donné par la formule de G. VUILLAUME

$$A = 1 - 0,001 * [9 * \log(r) - 0,042 * P_{an} + 152] * \log(S) \quad (3)$$

r : période de retour de la pluie (10 ans)

P_{an} : pluie moyenne annuelle (993 mm)

S : superficie du bassin-versant

- Estimation de la précipitation décennale moyenne sur le bassin versant :

$$P_{m10} = A * P_{10} \quad (4)$$

- Détermination du gradex de ORSTOM et CIEH

L'expression du coefficient majorateur est :

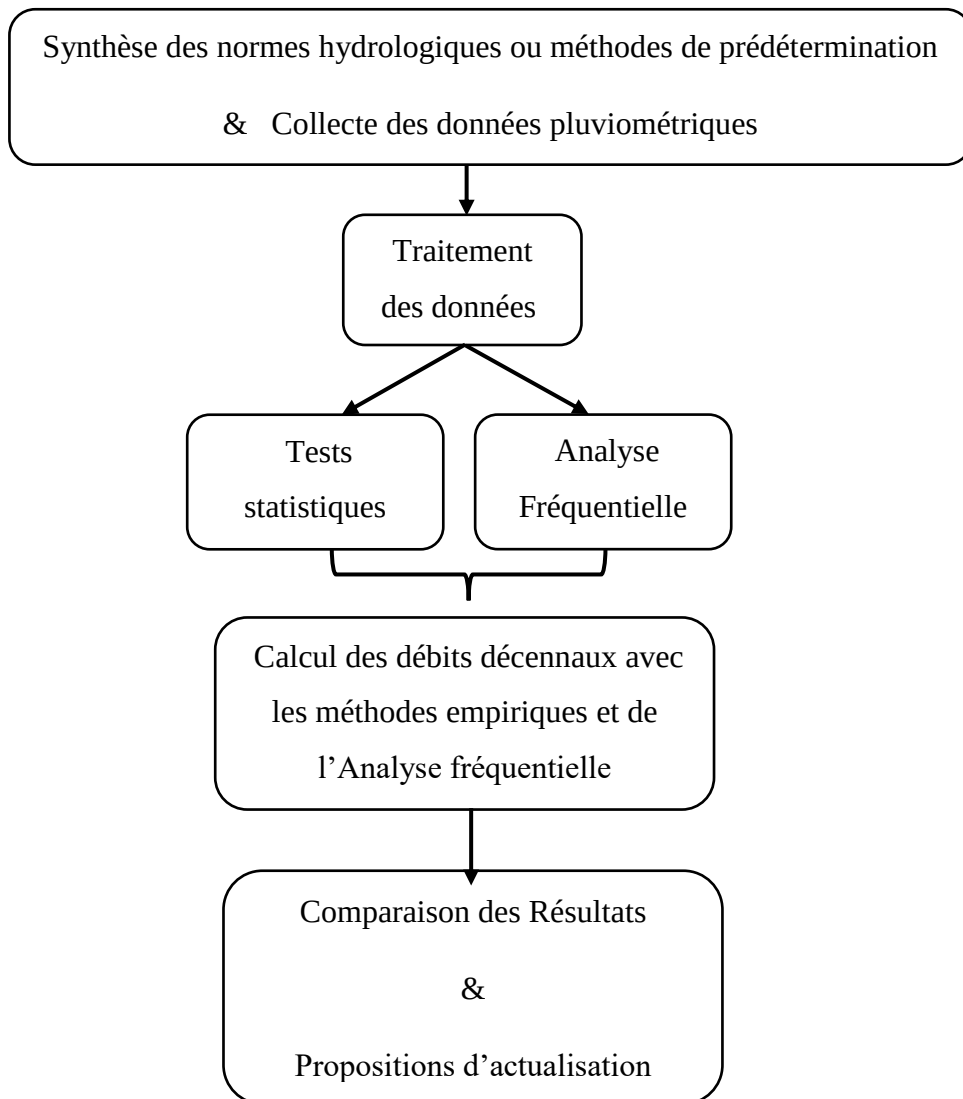
$$C = 1 + \lambda * \frac{\left(\frac{T_b}{24}\right)^{0.12}}{K_{r10}} \quad (5) \quad \text{avec} \quad \lambda = \frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}} \quad (6)$$

Où **P₁₀** : précipitation journalière correspondant à une période de retour de dix ans;

P_{100} : précipitation journalière correspondant à une période de retour de 100 ans; T_b : temps de base en heures;

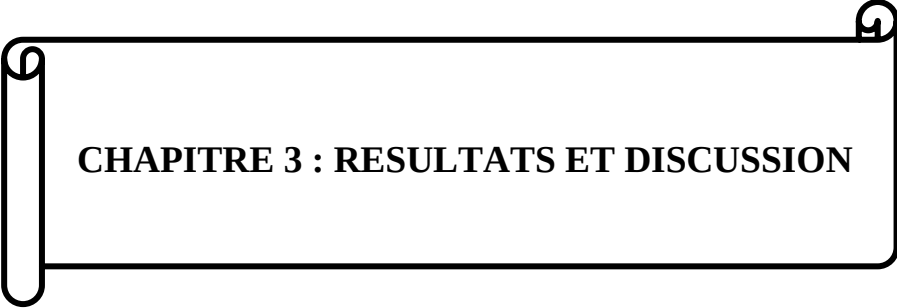
K_{r10} : coefficient de ruissellement de la crue décennale (exprimé en fraction et non pas en pourcentage).

Les principales étapes de la méthodologie :



2.4. Conclusion

Le présent chapitre nous a permis d'avoir une connaissance approfondie sur la localisation, le relief, la végétation, le climat et l'hydrographie de notre zone d'étude. Aussi, à travers ce chapitre, une méthodologie a été élaborée et sa mise en application permettra de mettre en évidence les normes hydrologiques de dimensionnement utilisées au Bénin.



CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction

Le présent chapitre présente les résultats obtenus après l'application de la méthodologie présentée plus haut ainsi que leurs interprétations. Ces résultats ont été obtenus grâce à l'exploitation judicieuse des rapports techniques et l'analyse fréquentielle. Les rapports techniques ont permis de faire la synthèse des normes hydrologiques ou des méthodes de prédétermination hydrologique et l'analyse fréquentielle nous a permis d'apprécier la pertinence de ces normes ou méthodes hydrologiques.

3.1. Résultats

3.1.1. Synthèse des normes et méthodes de prédétermination hydrologiques utilisées au Bénin

Après la lecture de la bibliographie et les rapports techniques des études hydrologiques, nous pouvons dire que les méthodes les plus utilisées pour prédéterminer les événements extrêmes sont : les méthodes de CIEH et d'ORSTOM. Car la méthode de CIEH est utilisée dans tous les bureaux d'étude et la méthode d'ORSTOM utilisée à 80%. Ces deux méthodes sont utilisées dans la plupart des cas simultanément. En plus des méthodes de CIEH et d'ORSTOM, il y a la méthode de rationnelle et l'Analyse statistique et la méthode de Voron qui sont aussi utilisées dans les bureaux d'études. Pour la prédétermination des apports moyens les méthodes de CIEH, de Rodier et de ORSTOM sont aussi les plus utilisées dans les bureaux d'études. En plus des méthodes de CIEH et d'ORSTOM, on a les méthodes de RODIER et DUBREUIL-VUILLAUME qui sont utilisées pour la prédétermination des apports moyens.

Par rapport à la littérature et aux résultats de notre fouille des documents techniques des études hydrologiques réalisés par des bureaux d'études, nous pouvons affirmer que les méthodes utilisées pour la prédétermination hydrologique au Bénin sont celle de CIEH et de ORSTOM.

3.1.2. Analyse de la pertinence des normes hydrologiques et des méthodes de prédétermination sur le site de N'Dali (Wookou) et sur le barrage de Kinkinnin-Darou, commune de Bembèrèkè dans le département du Borgou

Les deux sites (bas-fonds de Wookou et le barrage de kinkinnin-Darou, commune de Bembèrèkè) ont été choisis du fait que les deux méthodes (CEIH et ORSTOM) ont été utilisées sur le site du barrage de Kinkinnin-Darou et seule celle de ORSTOM sur le site de Wookou d'une part et de la disponibilité des paramètres sur ces sites qui permettront l'application de chacune de ces méthodes d'autre part.

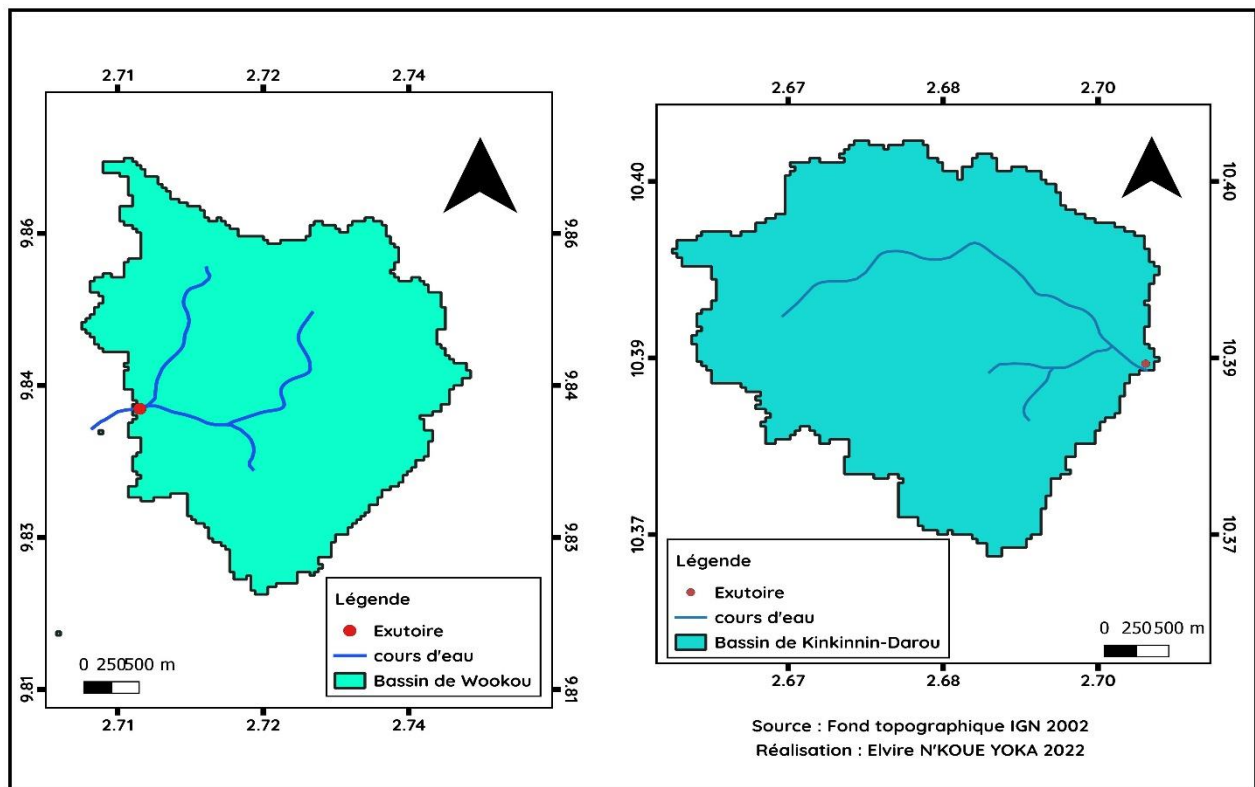


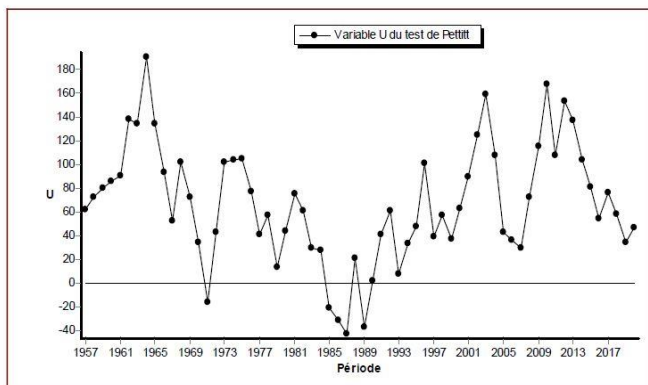
Figure 5 : Bassins versants de Wookou et de Kinkinnin-Darou

3.1.2.1. Etude de la période de rupture des stations

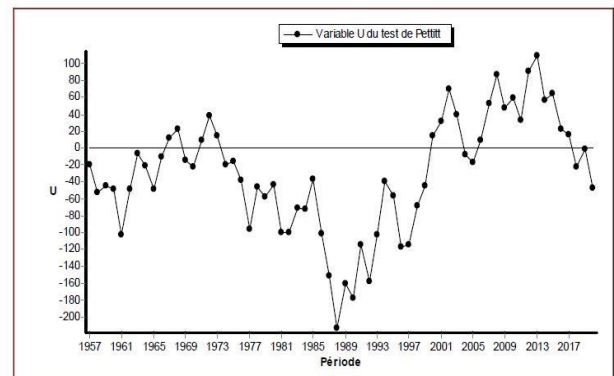
Les différents tests statistiques appliqués aux pluies maximales journalières de la période de 1957 à 2021 ont permis d'évaluer la stationnarité des stations de la zone d'étude.

La figure 6 nous montre l'évolution de la variable U du test de Pettitt des trois stations de la zone d'études. Il ressort de l'analyse de cette figure que l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée aux seuils de confiance 90%, 95% et 99% sur les stations de Kalalé et de Parakou ce qui confirme l'absence de la rupture dans la série chronologique. L'absence de plusieurs moyennes à la suite du test de segmentation de Hubert en est une édification. Quant à la station de Bembèrèkè l'hypothèse est rejetée aux trois seuils 90%, 95% et 99%, ce qui confirme la présence de la rupture de stationnarité dans la série. Cette rupture est observée en 1987 sur cette station entre 1957 et 2021.

Identification Station de Bembereke
Variable étudiée Pluies maximales journalières
Unité mm
Chronique de 1957 à 2021



Identification Station de Kalalé
Variable étudiée Pluies maximales journalières
Unité mm
Chronique de 1957 à 2021



Identification Station de Parakou
Variable étudiée pluviométrie maximale journalière
Unité mm
Chronique de 1957 à 2021

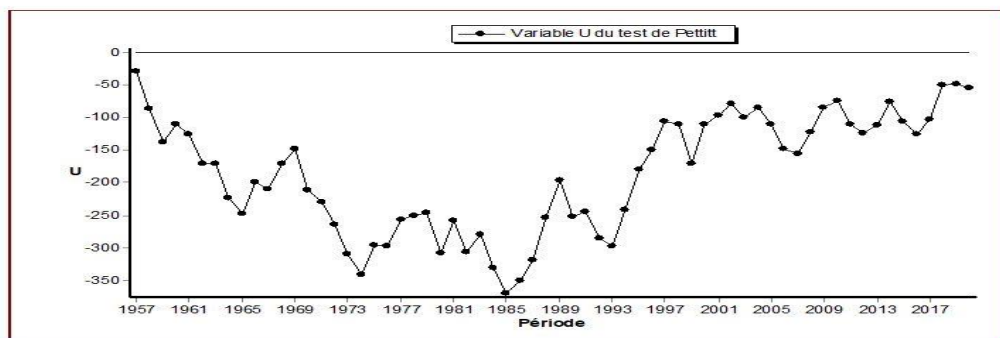


Figure 6 : Evolution de la variable U du test de Pettitt des stations de Bembèrèkè, Kalalé et de Parakou

3.1.2.2. Analyse fréquentielle des pluies maximales journalières des stations

3.1.2.2.1. Vérification des hypothèses de base dans les hauteurs de pluie maximales

Conformément à la méthodologie de l'analyse fréquentielle, l'indépendance, l'homogénéité et la stationnarité de la série s'avèrent indispensables. Ainsi, les hypothèses d'indépendance, homogénéité et stationnarité ont été effectuées. L'hypothèse d'indépendance a été validée à l'aide du test de Wald-Wolfowitz. Les tests d'homogénéité et de stationnarité utilisés sont respectivement ceux de Wilcoxon et de Kendal. Il ressort de l'analyse des résultats de ces différents tests que la série chronologique (1957-2021) est indépendante, homogène et stationnaire au seuil de 5% sur toutes les stations choisies.

3.1.2.2.2. Ajustement aux lois des séries pluviométriques maximales

Plusieurs lois de distribution (loi de Weibull, loi de Gumbel et loi lognormale) sont employées dans la conception des ouvrages hydrauliques (Kouassi et al., 2019). L'ajustement a été fait à

partir de ces lois de distributions. Le calcul des fréquences empiriques a été fait à partir de la relation de Hazen. Dans notre étude, la méthode des maximums de vraisemblance a été utilisée pour ajuster les séries aux lois retenues. L'ajustement a été jugé à partir de représentation graphique et du test de khi-deux (annexe IV).

Pour le choix du meilleur modèle, deux critères (critère d'Akaike et critère bayésien) ont été retenus. Après l'application des lois sur les séries pluviométriques maximales, une loi s'adapte le mieux. Il s'agit de la loi de Gumbel. La figure 7 présente un ajustement des séries pluviométriques par la loi Gumbel sur la période de 1957 à 2021. Il résulte de l'analyse des graphes que les séries pluviométriques suivent très bien la loi de Gumbel pour l'ensemble des stations. De plus, tous les points sont dans l'intervalle de confiance de 95% pour cette loi. On conclut donc que toutes les séries pluviométriques s'ajustent bien à la loi de Gumbel avec une marge d'erreur de 1 à 5%.

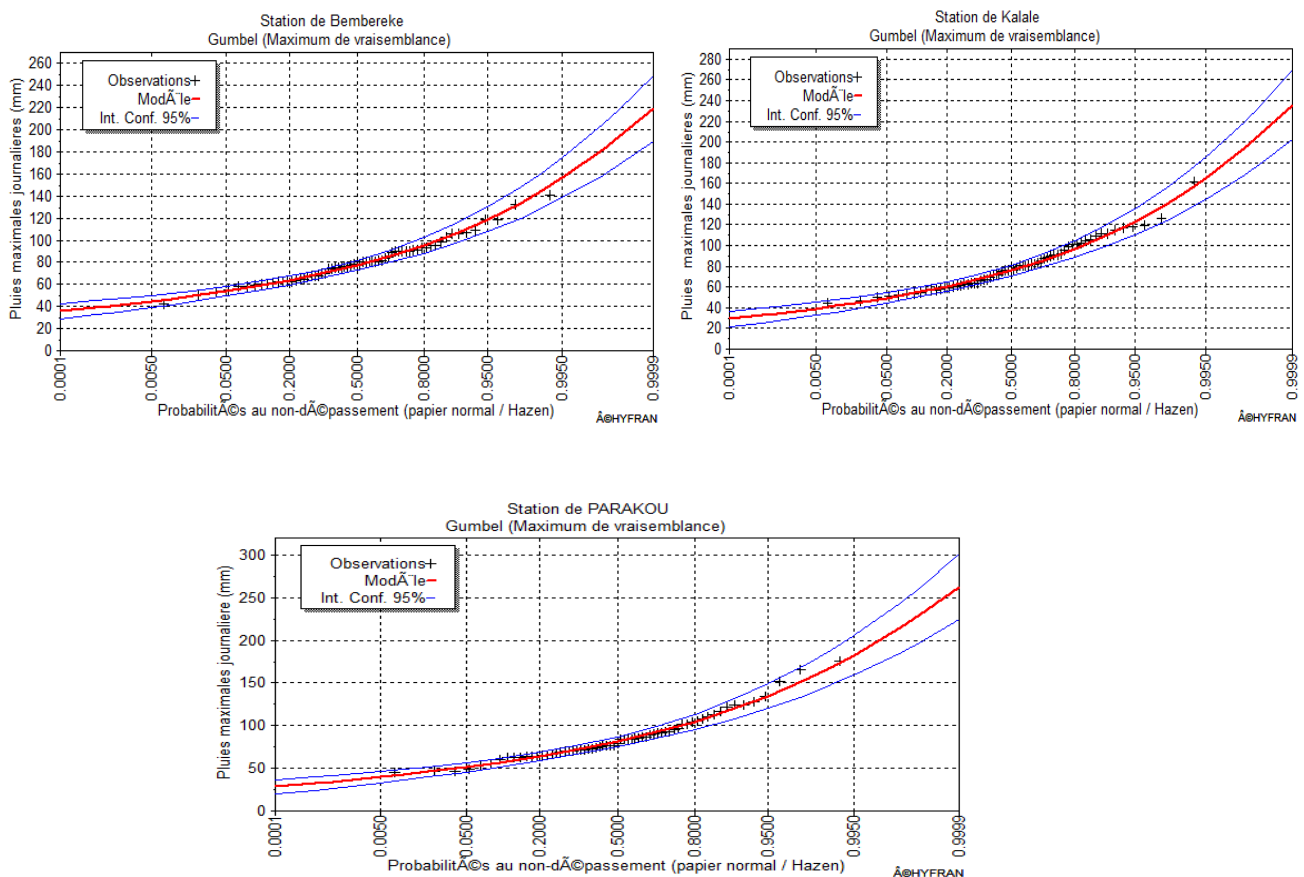


Figure 7 : Ajustement de la loi de Gumbel sur les trois stations

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

3.1.2.2.3.1. Comparaison des critères

Pour le choix du meilleur modèle deux critères ont été retenus. Il s'agit du critère d'information de Bayésien (BIC) et du critère d'information d'Akaike (AIC). La meilleure loi à retenir est

celle qui a simultanément les deux critères faibles. Le tableau 3 ci-dessous montre les différentes valeurs des critères.

Tableau 3 : Valeurs des paramètres de BIC et AIC

Stations	Lois	Nombre de paramètre	BIC	AIC
Bembèrèkè	Gumbel	2	569.976	565.627
	Log-normale	2	570.355	566.007
	Weibul	2	582.010	577.661
Kalalé	Gumbel	2	589.830	585.481
	Log-normale	2	590.402	586.053
	Weibul	2	603.047	598.698
Parakou	Gumbel	2	606.348	601.999
	Log-normale	2	607.246	602.897
	Weibul	2	622.972	618.624

Source : N'KOUE YOKA, 2022

De l'analyse du tableau, il ressort que les valeurs de BIC et AIC sont faibles pour la loi Gumbel pour toutes les trois stations. On en déduit que la loi de Gumbel s'ajuste mieux aux séries pluviométriques de ces stations. Donc le meilleur modèle pour les trois stations est celui de Gumbel.

3.1.2.2.4. Estimation des pluies caractéristiques et les intervalles de confiance

L'ajustement des pluies journalières aux tests statistiques a permis d'obtenir les quantiles estimés pour différentes périodes de retour (2, 5, 10, 20, 50 et 100ans) (tableau 4). Les intervalles de confiance qui permettent d'évaluer l'incertitude associée aux estimations sont aussi fournis (tableau 5). Ces quantiles sont déterminés selon deux approches :

- la première approche a consisté à déterminer les quantiles en considérant toute la chronique disponible (Kouassi et al,2019) ;
- la deuxième approche a consisté à déterminer les quantiles en considérant des sous-périodes glissantes de trente ans (Sighomnou, 2004 cité par Kouassi et al, 2019). La deuxième approche s'est faite uniquement avec les données de la station synoptique de Parakou. Car elle domine une grande zone de couverture agro-météorologique ou climatique à laquelle dépendent les stations pluviométriques. Ainsi les quantiles des pluies journalières maximales annuelles ont été calculés sur les périodes 1981-2010, 1991- 2020, 1971-2000,1961-1990 et 1957-2021. Les

quantiles des pluies journalières maximales annuelles ont été évalués pour plusieurs durées de retour T (2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans) à partir de la loi de Gumbel. En effet, dans les projets de dimensionnement des ouvrages hydrauliques, le choix de la période de retour est fonction de l'importance de l'ouvrage à concevoir. On peut cependant rappeler quelques récurrences habituellement utilisées dans le cadre de ces projets au Bénin :

- 2 à 5 ans pour les canaux primaires à tertiaires;
- 10 ans pour les petits ouvrages de franchissement comme les buses et dalots;
- 20 à 50 ans pour les ponts de petite à moyenne importance;
- 100 ans pour les ponts de portée importante (de plus de 100 m).

Tableau 4 : Quantiles estimés sur les stations de Bembèrèkè, Kalalé et Parakou

Stations	Quantiles (en mm)					
	2 ans	5ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Bembèrèkè	77.2	95.4	107	119	134	145
	72.6-81.8	88.3-102	98.3-116	108-130	120-148	129-161
Kalalé	75.9	96.4	110	123	140	152
	70.7-81.0	88.4-104	99.7-120	110-135	124-155	135-170
Parakou	81.3	105	120	135	154	168
	75.4-87.1	95.5-114	108-131	120-149	136-171	148-188

Source : N'KOUÉ YOKA, 2022

Il résulte de l'analyse du tableau 4 que les hauteurs de pluies journalières 75.9 à 81.3 mm ont une chance sur deux de se produire tous les deux (02) ans sur la zone d'étude. Quant à celles qui ont une chance sur dix de se produire tous les dix (10) ans oscillent entre 107 à 120mm. Les précipitations extrêmes dans la zone d'étude sont celles dont les valeurs sont supérieures à 95.4 mm c'est-à-dire celles dont les périodes de retour sont supérieures à 5 ans

Tableau 5 : Quantiles des pluies journalières maximales annuelles et intervalles de confiance

Séries	Quantiles (en mm)					
	P_2	P_5	P_{10}	P_{20}	P_{50}	P_{100}
1981-2010	87.3	114	132	150	172	189
	87.8-112	112-152	125-174	141-203	153-224	165-245
1991-2020	84.8	107	121	135	153	166
	76.7-92.9	94.1-119	105-137	115-155	128-178	138-195
1971-2000	85.1	114	133	151	175	192
	74.5-95.7	97.4-130	112-154	125-177	142-207	155-230
1961-1990	78.8	103	119	134	153	168
	70.0-87.7	89.1-116	101-136	112-155	126-180	137-199
1957-2021	81.3	105	120	135	154	168
	75.4-87.1	95.5-114	108-131	120-149	136-171	148-188

Source : N'KOUÉ YOKA, 2022

Il ressort de l'analyse du tableau 5 que les quantiles calculés à partir des données de la période trentenaire 1981-2010 sont supérieurs à ceux calculés avec les autres périodes de 30 ans (1961-1990 ; 1991-2020) quelle que soit la période de retour considérée. Les quantiles évalués sur la période 1971-2000 sont légèrement inférieurs aux quantiles de la période (1981-2010) pour les périodes de retour inférieures à dix ans, mais pour les périodes de retour de dix ans et plus, les quantiles de la série 1971-2000 restent supérieurs à ceux des autres séries. Concernant les quantiles déterminés à partir de la série complète 1957-2021, ils sont presque inférieurs à ceux des autres périodes. Les différences entre quantiles sont telles qu'une pluie de récurrence cinquantennale calculée à partir des données de la période (1981-2010) se rapproche de la pluie de récurrence centennale évaluée à partir de celles de la période 1971-2000. Les conséquences du choix de l'une ou l'autre série pour les calculs relatifs aux projets d'investissement est donc considérable.

3.1.2.3. Analyse de la pertinence des méthodes

Les sites de Kinkinnin-Darou dans la commune de Bembèrèkè et Wookou dans la commune de N'Dali sont utilisés pour l'étude de la pertinence des méthodes. Nous avons utilisé la méthode de CIEH, ORSTOM et l'analyse fréquentielle pour déterminer le débit décennal.

3.1.2.3.1. Résultat de l'analyse fréquentielle

A partir des données fournies par la METEO-BENIN et avec le logiciel HYFRAN on obtient les résultats du tableau 6 qui présente l'analyse fréquentielle du bassin de Kinkinnin-Darou et du bassin de Wookou.

Tableau 6 : Analyse fréquentielle du bassin de Kinkinnin-Darou et du bassin de Wookou

Site de Kinkinnin-Darou			Site de Wookou		
Période	T(ans)	Quantiles(mm)	Période	T(ans)	Quantiles(mm)
1957-2021	100	168	1957-2021	100	126
	50	154		50	121
	20	135		20	114
	10	120		10	107
	5	103		5	98.3
	2	81.3		2	80.6
Volume d'eau décennal(m ³)	1140000				999280
Débit décennal(m ³ /s)	95.87				81.47

Source : N'KOUÉ YOKA, 2022

3.1.2.3.2. La méthode de CIEH

Nous avons appliqué la méthode de CIEH sur les sites de Kinkinnin-Darou et Wookou. Les sites de Kinkinnin-Darou et de Wookou ont une superficie respectivement 9.5 et 9,34 Km². La précipitation décennale ponctuelle journalière P10=120mm et la pluie annuelle moyenne Pan= 1150mm pour le Kinkinnin-Darou. Quant au site de Wookou, la précipitation ponctuelle est

P10=107mm et la pluie moyenne est Pan=1083mm. Les coefficients de ruissellement ont été déterminé par la méthode ORSTOM. Après calcul (note de calcul), on obtient le tableau 7

Tableau 7 : Application de la méthode de CIEH sur les sites de Kinkinnin-Darou et Wookou

Noms	Site de Kinkinnin-Darou	Site de Wookou
Coefficient d'abattement	0.9	0.89
Précipitation moyenne décennale	108	95.23
Coefficient de ruissellement	33.14%	31.05%
Equation n°3 FAO bulletin 54	13.46	12.52

Source : N'KOUE YOKA, 2022

3.1.2.3.3. La méthode de ORSTOM

La méthode de ORSTOM a été utilisé pour déterminer les débits décennaux sur les sites de Kinkinnin-Darou de Wookou. Le temps de base a été déterminé à partir des abaques de la figure17 de FAO bulletin 54. Quant à l'indice global de pente I_g , il a été assimilé à l'indice longitudinale et est calculé avec la formule de GRESILLON en raison de l'absence des données topographiques. L'indice de pente globale de Kinkinnin-Darou est égal à 8.4m/Km et celui de Wookou est égal à 8.5mKm. Le temps de base de Kinkinnin-Darou et de Wookou sont respectivement $T_b = 198.18min$ et 204.45min. on utilise $\alpha=2.6$ et on obtient les résultats du tableau 8 suivant :

Tableau 8 : Détermination des débits décennaux sur les sites de Kinkinnin-Darou de Wookou par la méthode de ORSTOM

Nom	Site de Kinkinnin-Darou	Site de Wookou.
Volume décennal(m ³)	74.35	58.53

Source : N'KOUE YOKA, 2022

Les trois méthodes utilisées pour la détermination du débit décennal, donnent des résultats largement différents. Le débit décennal de ORSTOM et celui de CIEH sont tous inférieurs au

débit décennal de l'analyse fréquentielle. Sur le site de Kinkinnin-Darou, le débit décennal de l'analyse fréquentielle est un peu plus grand que le débit décennal obtenu par la méthode de ORSTOM et le débit décennal de CIEH est sept (7) fois plus petit que celui de l'analyse fréquentielle. En ce qui concerne du site Wookou le débit décennal obtenu par l'analyse fréquentielle est six (6) fois plus grand que le débit décennal obtenu par la méthode de CIEH et le débit de ORSTOM est légèrement plus petit que celui de l'analyse fréquentielle.

3.1.2.3.4. Calcul du gradex des méthodes de l'ORSTOM et du CIEH

Une analyse du gradex (λ) des méthodes de l'ORSTOM et du CIEH, généralement utilisé par les praticiens pour la détermination de la crue de projet a été réalisée

Pour une durée de retour donnée, les valeurs de λ varient en fonction des quantiles P100 et P10.

Ainsi, les valeurs de λ ont été calculées pour les différentes périodes normales retenues (1981-2010, 1990-2019, 1986-2016 et 1981-2021) et les durées de retour fixées (2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans) à partir de l'équation 6.

Tableau 9 : Valeurs du gradex des méthodes de ORSTOM et CIEH

Périodes	Valeurs du gradex (λ)
1981-2010	0.43
1991-2020	0.38
1971-2000	0.44
1961-1990	0.41
1957-2021	0.4
Moyenne	0.41

Source : N'KOUE YOKA, 2022

Les différentes valeurs du gradex (λ) des méthodes de l'ORSTOM et du CIEH évaluées en fonction des périodes de 30 ans et de la chronique complète sont consignées dans le tableau 9. Les différentes valeurs du gradex évaluées à partir des quantiles de période de retour de 10 ans et 100 ans varient entre 0,38 et 0,44 avec une moyenne de 0,41.

3.2. Discussion

3.2.1. Variabilité des pluies maximales journalières par rapport aux différentes stations

L'analyse de la variabilité des pluies extrêmes des stations de l'étude a montré que sur la période 1957 à 2021, qu'il n'y a aucune rupture dans les observations au seuil de défaillance de 5% sur les stations de Kalalé et Parakou. Par contre sur la station de Bembèrèkè, on enregistre plusieurs

ruptures de la série chronologique. On peut dire que la zone d'étude a connu une faible variabilité des précipitations. Mais les quantiles varient pour une durée de retour donnée en fonction des périodes de référence et la longueur de la série choisies pour leur détermination. En effet, le choix de la période de référence impacte les quantiles des pluies journalières maximales annuelles ce qui explique la différence entre les quantiles trouvés par Agué et Afouda sur la période de 1921 à 2001 et ceux de cette étude dont les données couvrent la période allant de 1957 à 2021 sur la station de Parakou.

En conclusion nous pouvons dire que l'utilisation des méthodes établies avec les données d'une très longue période pourrait nous conduire à une sous-estimation sur les bassins.

Pour un dimensionner avec la méthode statistique (analyse fréquentielle), nous recommandons l'utilisation des données de la période de la normale (1981- 2010) car l'utilisation des données de toute la chronique va conduire à un sous-dimensionnement de l'ouvrage à dimensionner.

3.2.2. La pertinence des méthodes

Le tableau 10 présente le récapitulatif des résultats des différentes méthodes

Tableau 10 : Récapitulatif des résultats des différentes méthodes

Sites	Analyse fréquentielle	Débit décennal de CIEH (m ³ /s)	Débit décennal ORSTOM (m ³ /s)	Moyenne CIEH- ORSTOM
	Débit décennal (m ³ /s)			
Kinkinnin-Darou	95.87	13.46	74.35	43.91
Wookou	81.47	12.52	58.53	35.52

Source : N'KOUÉ YOKA, 2022

L'analyse de ces résultats a montré une très grande variabilité des débits en fonction des méthodes utilisées. De plus les valeurs trouvées avec les méthodes d'ORSTOM de CIEH sont plus petites que celles obtenues par la méthode fréquentielle. Les deux sites étudiés étant dans la zone tropicale sèche, nous pouvons dire que l'utilisation de la méthode de CIEH et ORSTOM conduisent à un sous-dimensionnement des ouvrages et à un risque élevé pour la sécurité. Cette sous-estimation a été relevé par Bambara (2011) au Burkina Faso. Nous pouvons dire qu'il sera

très important de réviser les méthodes les plus utilisés pour la prédétermination hydrologique afin d'optimiser la sécurité. Pour cette révision, il sera intéressant de suivre deux à trois sous bassins des grands bassins du Bénin pour réellement avoir les paramètres à modifier dans les méthodes utilisées.

Étant dans une zone tropicale sèche, une comparaison a été effectuée entre les valeurs de gradex locales déterminées dans cette étude et la valeur de référence sous régionale de gradex dans l'application de la méthode de l'ORSTOM et du CIEH. Ainsi, les valeurs de l'écart relatif entre les gradex des différentes périodes et le gradex de référence sont consignées dans le tableau 10. En s'imposant une marge de tolérance de 5 %, il ressort que tous les écarts relatifs déterminés sont au-dessus de ce seuil (5,26-15,79 %) sauf une seule valeur. Ainsi, l'erreur qu'impliquerait l'utilisation du gradex de référence sous régional en lieu et place des gradex locaux est très importante. Et le choix du gradex régional de 0,38 en lieu et place des gradex obtenus grâce aux observations pluviométriques de la zone d'étude, dont la majorité est bien supérieurs à ce dernier (0,40-0,44), revient à sous-estimer le coefficient majorateur « C » dans la formule du débit de projet proposé par l'ORSTOM et le CIEH. Ce dernier sera sous-estimé, ce qui impliquera une sous-estimation des dimensions des ouvrages hydrauliques ou hydro-agricoles projetés. La sous-estimation du coefficient majorateur des méthodes empiriques (ORSTOM et CIEH) a été soulevée par Koussi et al, 2019 en Côte d'Ivoire.

Le résultat de cette analyse sur le gradex est donc un outil d'aide pour les concepteurs et ingénieurs quant à la détermination des débits de projet pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques dans le Borgou

Le tableau 11 présente l'écart relatif entre les gradex locaux et le gradex sous régional de ORSTOM et CIEH

Tableau 11 : Ecart relatif entre les gradex locaux et le gradex sous régional de ORSTOM et CIEH

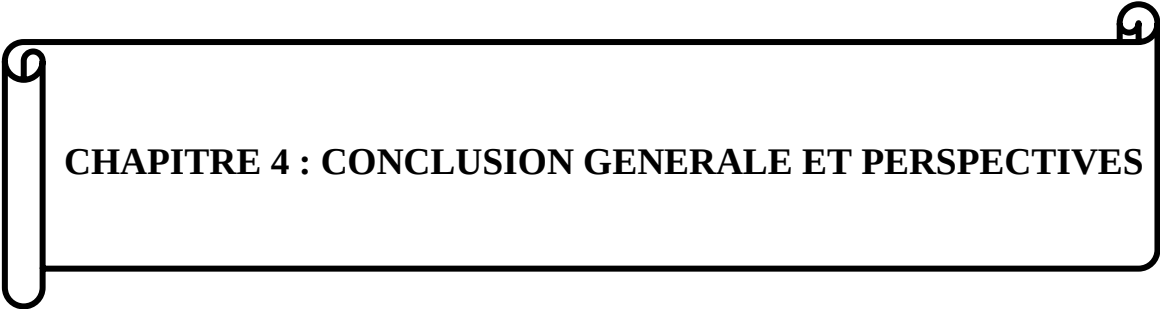
Gradex considéré	Ecart relatif(%)
$\Lambda_{1981-2010}/\Lambda_{référence}$	13.32
$\Lambda_{1991-2020}/\Lambda_{référence}$	0
$\Lambda_{1971-2000}/\Lambda_{référence}$	15.79
$\Lambda_{1961-1990}/\Lambda_{référence}$	7.89
$\Lambda_{1957-2021}/\Lambda_{référence}$	5.26

Source : N'KOUÉ YOKA, 2022

De tout ce qui précède, il apparaît clairement que les méthodes de l'ORSTOM et du CIEH sont à adapter au nouveau contexte climatique qui est marqué par une augmentation des intensités de précipitations extrêmes ainsi que l'occurrence plus fréquente de ces phénomènes en réponse aux changements climatiques, ce qui appelle à une mise à jour des méthodes de conception des ouvrages hydrauliques. Pour la valeur du gradex des méthodes empiriques de l'ORSTOM et du CIEH, il est recommandé de considérer 0,41 comme valeur pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques et hydro-agricoles dans le Borgou (Nord-Bénin).

3.3. Conclusion

Au terme de ce chapitre, nous avons constaté que les pluies extrêmes de la zone d'étude ont connu une forte variabilité. Ainsi, les résultats de l'analyse fréquentielle ont permis de choisir la loi Gumbel comme meilleure loi pour la détermination des quantiles pour chaque période de retour. Ces quantiles nous ont permis d'analyser la pertinence des méthodes empiriques (méthodes de ORSTOM et du CIEH). Il ressort de cette analyse que ces méthodes sont à adapter au nouveau contexte climatique qui est marqué par une augmentation des intensités de précipitations extrêmes ainsi que l'occurrence plus fréquente de ces phénomènes en réponse aux changements climatiques, ce qui appelle à une mise à jour des méthodes de conception des ouvrages hydrauliques.



CHAPITRE 4 : CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

4.1. Conclusion

L'exploitation des documents et les rapports techniques des études hydrologiques réalisées par plusieurs bureaux d'études ont confirmé que les méthodes de prédétermination hydrologiques les plus utilisées au Bénin sont les méthodes de ORSTOM et de CIEH. Dans les rapports techniques consultés, ces méthodes sont utilisées à plus de 85%. Dans la plupart des bureaux d'études, on utilise simultanément les deux méthodes. La vérification des hypothèses de l'analyse fréquentielle a montré que les différentes séries définies sont constituées de valeurs indépendantes, stationnaires et homogènes. L'analyse fréquentielle des pluies maximales, nous a permis de déterminer les quantiles sur chaque station. Ces quantiles calculés varient pour une durée de retour donnée (2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans) en fonction des périodes de référence choisies pour leur détermination. Le choix de la période de référence impacte donc les quantiles des pluies journalières maximales annuelles. Cette non-stationnarité des quantiles est due à l'instabilité du climat.

Les méthodes de prédétermination hydrologique (ORSTOM et CIEH) ont été utilisées pour déterminer les débits décennaux sur les sites de Kinkinnin-Darou et Wookou et ont été comparées aux débits décennaux obtenus par analyse fréquentielle. Sur les deux sites les débits décennaux trouvés par les méthodes de ORSTOM et CIEH sont plus petits que ceux obtenus par l'analyse fréquentielle. Pour une meilleure sécurité des ouvrages hydro-agricoles, les recommandations de ce travail proposent d'utiliser la méthode de l'analyse fréquentielle.

L'analyse du gradex à partir des quantiles de période de retour de 10 ans et 100 ans montre des valeurs fluctuant entre 0,38 et 0,44 avec une moyenne de 0,41. Une comparaison des valeurs locales obtenues à celle régionale proposée par l'ORSTOM et le CIEH (0,38) a été effectuée. Il ressort que la majorité des écarts relatifs déterminés sont au-dessus du seuil de 5 % (5,26-15,69 %), ce qui traduit une différence statistiquement significative entre les valeurs de gradex obtenues et celle de référence (0,38). Il est de ce fait recommandé d'utiliser la valeur moyenne locale de 0,41 dans le Borgou dans l'application des méthodes empiriques de l'ORSTOM et du CIEH pour le dimensionnement des ouvrages hydro-agricoles.

4.2. Perspectives et suggestions

Les résultats obtenus au cours de ce travail sur les quantiles ont montré la caducité des méthodes empiriques de l'ORSTOM et du CIEH très souvent utilisés par les concepteurs dans le dimensionnement des ouvrages hydrauliques. Au vu de ces différents résultats, certaines dispositions (à prendre) et pistes de recherche concrètes pour une meilleure connaissance des

extrêmes hydrologiques de la zone d'étude, peuvent être proposées selon les grandes lignes suivantes :

Dispositions à prendre :

- ✓ Un suivi plus rigoureux dans la collecte des données hydro climatiques principalement les données de pluies et de débits qui présentent un nombre non négligeable de lacunes.
- ✓ Faire des campagnes des mesures sur les petits bassins afin de déterminer les coefficients de correction liés au changement climatique ;
- ✓ La poursuite de cette étude pour tous les grands bassins d'une part et les sous-bassins du Bénin avec de nouvelles séries temporelles plus étendues.

Références bibliographiques

- Ague, A. I., & Afouda, A. (2015). *journalières au Bénin*. 9(February), 121–133.
- Bambara, T. L. (2011). *Memoire pour l ' obtention du master en ingenierie de l ' eau et de l ' environnement option : eau agricole*.
- Beniston M. et Sephenson D.B. (2004). *Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions*. *Global and Planetary Change*, vol. 44, p. 1-9.
- Dahodo, M. (2013). *Contribution a l'actualisation de l'évaluation des statistique des series hydrometriques recentes*.
- Decamps H. (2010). *Evénements climatiques extrêmes, réduire les vulnérabilités des systèmes écologiques et sociaux*, Académies des sciences, 240 P
- Etudes de réhabilitation de 12 barrages au Bénin dans le cadre du PDREGDE : Hydrologie et Hydraulique Site de Zougou-Pantrossi Commune de Gogounou*.
- Etudes d'avant-projet sommaire du barrage et du perimetre de zougou pantrossi Commune de gogounou*. (2012). 1–68.
- Faucher D., Ouarda T. et Bobée B. (1997). *Revue bibliographique des tests de stationnarité*, 73 P.
- Goubanova, K., and Li, L. (2007). *Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulations*. *Global and Planetary Change*, 57(1-2), 27-42.
- GOULA A.B.T., G. SORO, A. DAO, W.F. KOUASSI et B. SROHOUROU (2010). *Frequency analysis and new cartography of extremes daily rainfall events in Cote d'Ivoire*. *J. Appl. Sci.*, 10, 1684-1694.
- INSAE. (2016). *Cahier des villages et quartiers de ville du departement du borgou (rgph-4, 2013)*.
- Kouassi A. M. (2011). *Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur le régimes pluviométriques saisonniers en afrique de l'Ouest*.

- Koumassi, H. (2014). *Risques hydroclimatiques et vulnérabilités des écosystèmes dans le bassin versant de la Sotola à l'exutoire de Couberli* To cite this version : HAL Id : tel-01572602.
- Lemaitre. (2002). *Identification de ruptures dans la série pluviométrique de Kouandé*, p.14.
- Mahé, G., L'Hôte, Y., Olivry, J. C. & Wotling, G. (2001) *Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa: 1951–1989*. *Hydrol. Sci. J.* 46(2), 211–226.
- Meylan P., Favre A-C. et Musy A. (2008). *Hydrologie fréquentielle une science prédictive*. Ed: E P F L, Lausanne, 169 P
- Ndong J. B. (2003). *Caractérisation de la saison des pluies dans le centre-Ouest du Sénégal*. *Publication de l'association Internationale de climatologie*, Vol 15, pp. 326-33
- Nka, B. N. (2016). *Contribution à l'Actualisation des Normes Hydrologiques en relation avec les Changements Climatiques et Environnementaux en Afrique de l'Ouest* To cite this version : HAL Id : tel-01398353.
- Ouédraogo, M. (2001). *Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante: normes hydrologiques et modélisation régionale*. Thèse, Université Montpellier II, 257 p
- Ouedraogo, M., Paturel, J., & Mahé, G. (2002). *Conséquences de la sécheresse observée depuis le début des années 1970 en Afrique de l'Ouest et centrale : normes météorologiques et hydrologiques*. 1968(274), 149–155.
- PANTHOU G. (2013). *Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et de leur évolution au cours des 60 dernières années*. Thèse de doctorat, Univ. Grenoble, France, 282 p.
- Projet de développement des ressources en eau et de gestion durable des écosystèmes dans le bassin du Niger (pdregde) : Rapport hydrologique et hydraulique de 12 barrages et 1 bouli*. (2012). 1–51.
- RAPPORT HYDROLOGIE KARAKOU-DAROU1.
- SORO G. (2011). *Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire*. Thèse de doctorat, Univ. Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 185 p.

Souanef, N. (2015). *Analyse fréquentielle des débits max de crues de l'Oued Abiod*.

Unies, N. *Crues et apports*.

Vissin E. W. (1998). *Contribution à l'étude du fonctionnement hydrologique du bassin de la Sota. Mémoire de maîtrise 123 P. Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, 123 pages.*

Vissin E. W. (2001). *Contribution à l'étude de la variabilité des précipitations et des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger. Mémoire de DEA 53 P. Université de Bourgogne, Dijon, France*

Vissin, E. (2007). *Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger.*

Annexe

Annexe I : Caractéristiques statistiques des séries

Tableau 12 : Caractéristiques statistiques des séries pluies maximales journalières

Station	N	Min	Max	Moy	Ecart_type	Médiane	Cv	CS	Ck
Bembèrèkè	65	42.0	141	80.3	19.3	78.2	0.241	0.818	3.68
Kalalé	65	44 .2	162	79.9	23.2	76.3	0.291	0.916	3.74
Parakou	65	44.8	176	85.9	27.3	78.9	0.318	1.20	4.35

Annexe II : Résultats des Tests

Tableau 13 : Résultats des tests

Stations	Test d'indépendante		Test de stationnarité		Test d'homogénéité	
	U	P	K	P	W	P
Bembèrèkè	0.859	0.390	0.742	0.458	0.00657	0.995
Kalalé	0.761	0.447	0.294	0.768	1.18	0.240
Parakou	1.07	0.285	2.00	0.0457	1.62	0.106

Annexe III : Résultat du texte de Hubert

Tableau 12 : procédure de segmentation de Hubert

Station	Début	Fin	moyenne	Ecart-type
Bembèrèkè	1957	1987	80.626	19.417
	1988	1988	140.600	0.00
	1989	2021	78.097	16.545

Annexe IV : Résultats des tests d'adéquation

Tableau 14 : Résultats du test de Khi-deux pour les trois stations

Stations	Gumbel (méthode du maximum de vraisemblance)				Log-normale (méthode du maximum de vraisemblance)			
	Nombre de classe	Degré de liberté	X^2	Conclusion	Nombre de classe	Degré de liberté	X^2	conclusion
Bembèrèkè	10	7	17.62	A	10	7	18.85	A
Kalalé	10	7	5.31	A	10	7	3.46	A
Parakou	10	7	3.77	A	10	7	6.85	A

A : Nous pouvons accepter H_0 au seuil de 5%

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iv
Abstract	v
Sigles et acronymes	vi
Listes des figures	vii
Listes des tableaux	8
Sommaire	ix
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GENERALE	1
INTRODUCTION.....	2
1.1. Revue de littérature.....	4
1.1.1. Clarification de certains concepts	4
1.1.2. Etat des connaissances	5
1.2. But de la recherche	8
1.3. Problème et question de recherche.....	8
1.4. Objectifs du mémoire	9
1.4.1. Objectif général	9
1.3.1. Objectifs spécifiques	9
1.5. Résultats attendus	9
CHAPITRE 2 : DONNEES, MATERIELS ET METHODOLOGIE	10
2.1. Milieu d'étude.....	11
2.1.1. Localisation	11
2.1.2. Relief et géologie	12
2.1.3. Climat du Borgou	12
2.1.4. Sol, végétation et hydrographie.....	12
2.2. Méthodes	14

2.2.1. Faire la synthèse des normes hydrologiques ou méthodes de prédétermination des crues actuelles de dimensionnement des ouvrages hydro-agricole au Bénin.....	14
2.3.2 La pertinence de ces normes hydrologiques ou ces méthodes sur le site de N'Dali (Wookou) et sur le barrage de Kinkinin-Darou, commune de Bembèrèkè dans le département du Borgou ;.....	15
2.3.2.1. Données	15
2.3.2.2. Contrôle de la qualité des données	16
2.4.2.3 Traitement des données, simulation et calculs	16
- Le coefficient d'abattement A:	19
2.4. Conclusion	20
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION	21
Introduction	22
3.1. Résultats.....	22
3.1.1. Synthèse des normes et méthodes de prédétermination hydrologiques utilisées au Bénin	22
3.1.2. Analyse de la pertinence des normes hydrologiques et des méthodes de prédétermination sur le site de N'Dali (Wookou) et sur le barrage de Kinkinnin-Darou, commune de Bembèrèkè dans le département du Borgou	22
3.2. Discussion.....	31
3.2.1. Variabilité des pluies maximales journalières par rapport aux différentes stations	31
3.2.2. La pertinence des méthodes	32
3.3. Conclusion	34
CHAPITRE 4 : CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	35
4.1. Conclusion	36
4.2. Perspectives et suggestions.....	36
Références bibliographiques	38
Annexe	I
Annexe I : Caractéristiques statistiques des séries	I

Annexe II : Résultats des Tests	I
Annexe III : Résultat du texte de Hubert.....	I
Annexe IV : Résultats des tests d'adéquation	II
Table des matières	III