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

SALIFOU Samilou

Pour l'obtention du diplôme de

Licence Professionnelle en Hydrologie

OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

****

THEME :

IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE SUR LES INONDATIONS DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OKPARA À NANO

****

***Maître de Mémoire* :**

Dr. Ir. D. Mathieu Maurice AHOUANSOU

***Maître de Stage* :**

Dr. Quentin Fiacre TOGBEVI

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée

Année académique :2022-2023

Dédicace

À mes parents

C'est avec un énorme plaisir, un cœur rempli de joie, que je dédie ce travail à mes très chers, respectueux parents comme preuve de reconnaissance après m'avoir soutenu et encouragé tout au long de mes études.

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu, tout puissant et très miséricordieux qui par son amour, sa bonté, m'a donné la force, le courage et m'a protégé tout au long de ce travail.

Ce travail a été accomplir grâce à la générosité de certaines personnes. Qu'il me soit donc permis d'adresser mes sincères gratitudes et remerciements particuliers :

- Au Dr. Ir. D. M. Maurice AHOUANSOU, Maître de Conférences des universités CAMES, Enseignant Chercheur à la FSA pour ses précieux conseils et le temps consacré pour mon encadrement ;
- Au Professeur Flavien DOVONOU, Chef du Département d'Hydrologie et de Gestion des Ressources en Eau (DHGRE) pour tous les efforts consentis dans la formation des étudiants ;
- Aux Enseignants et Responsables du Département d'Hydrologie et de Gestion des Ressources en Eau (DHGRE) de l'Institut National de l'Eau (INE) ; pour toutes les connaissances acquises sous leurs encadrements respectifs durant ma formation en licence professionnelle en hydrologie ;
- Au Professeur Irénikatché AKPONIKPE Directeur du Laboratoire d'Hydraulique et de Modélisation Environnementale (HydroModE-Lab) pour m'avoir accepté dans son Laboratoire à la Faculté de l'Agronomie de l'Université de Parakou ;
- Au Docteur Quentin Fiacre TOGBEVI pour son effort sans cesse apporté lors de mon stage ;
- À tous les Honorables membres du Jury qui ont apprécié ce modeste travail ; merci pour le temps que vous avez sacrifié au détriment de vos occupations pour l'analyse et l'amélioration de ce document ;
- À nos aînés de la formation Professionnelle en Hydrologie ;
- À tous mes camarades de promotion pour l'ambiance et l'entraide qui ont régnée tout au long de notre formation, bonne suite à tous ;
- Aux membres du bureau de l'Association des Etudiants de Pèrèrè (AEP) ;
- À toute la famille TOURE de Pèrèrè et à mes proches pour leur soutien constant et leurs encouragements en occurrence : Elhadji Amoussa, ALASSANE Moussa, NOUHOUM Adizatou, SIDI Bachirou et mon oncle feu BOUKARI Bachirou ;
- À tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce document, qu'ils trouvent ici toute ma gratitude.

Résumé

Au Bénin en général et dans le nord en particulier, les principaux risques qui menacent les populations sont les inondations. La présente étude a pour objectif d'évaluer l'impact de la variabilité climatique sur les inondations dans le bassin versant de l'Okpara à Nano. Pour y parvenir, les données pluviométriques des stations (Ina, Nikki, Okpara et Parakou) ont été collectées à Météo-Bénin et les données de débit de la station de Kaboua à la DG-Eau, toutes sur une même période (1985 à 2020). Ensuite, nous avons eu les données futures à travers les modèles ECARTH et HADGEM2 de la période de 2020 à 2050. L'approche méthodologique adoptée est l'analyse fréquentielle où nous avons utilisé quatre lois statistiques (Log-normale, Gumbel, Pearson type III et log-Pearson type III.), puis la comparaison des variabilités des pluies futures et actuelles. La méthodologie adoptée nous a révélé dans un premier temps que les pluies maximales journalières actuelles varient tout au long de la période d'étude au niveau de toutes les stations et celles susceptibles d'inondation ne sont pas récurrentes. Dans un second temps nous avons remarqué que les débits (Q95) ont une variation en dents de scies. Les résultats des comparaisons ont aussi permis de noter que les pluies extrêmes ont une forte probabilité d'apparition dans le futur ; ce qui rend ce bassin versant plus vulnérable dans le futur.

Mots clés : Extrêmes hydroclimatiques, Inondation, Analyse fréquentielle, Bassin de l'Okpara à Nano

Abstract

In Benin in general and in the north in particular, the main risks threatening populations are floods. The purpose of this study is to assess the impact of climate variability on flooding in the Okpara watershed in Nano. To achieve this, the rainfall data from the stations (Ina, Nikki, Okpara and Parakou) were collected in Météo-Bénin and flow data from the station from Kaboua to the DG-Eau, all over the same period (1985 to 2020). Then we had the future data through the ECARTH and HADGEM2 models for the period from 2020 to 2050. The methodological approach adopted is frequency analysis where we used four statistical laws (Log- normal, Gumbel, Pearson type III and log-Pearson type III.), then the comparison of future and current rainfall variabilities. The methodology adopted initially revealed to us that the maximum daily rainfall varies throughout the study period at all stations and those susceptible to flooding are not recurrent. Secondly, we noticed that the flow rates (Q95) have a sawtooth variation. The results of the comparisons also made it possible to note that extreme rains have a high probability of appearing in the future, this makes this watershed more vulnerable in the future.

Keywords: Hydroclimatic extremes, Flooding, Frequency analysis, Okpara to Nano basin

Liste des sigles et acronymes

AEP : Association des Étudiants de Pèrèrè

AIC : Akaike Information Criterion (Critère d'Information d'Akaike)

BIC : Bayésien Information Criterion (Critère d'Information Bayésien)

CFSR : Centre de Réanalyse du Système de Prévision climatique

DG-Eau : Direction Générale de l'Eau

GES : Gaz à Effet de Serre

HYFRAN : HYdrological FRequency Analysis

INE : Institut National de l'Eau

INSAE : Institut National de la Statistique et de l'Analyse Économique

MCG : Modèle Climatique Global

MCR : Modèle Climatique Régional

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

PAS-PAN : Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation

PMJ : Pluie Maximale Journalière

Q95 : 95è centile

Qmax : Débits maximal annuels

REMO : Regional Model (Modèle Régional)

UAC : Université d'Abomey-Calavi

Liste des tableaux

Tableau 1: Stations utilisées 14
Tableau 2 : Statistiques des stations étudiées 22
Tableau 3: Résultat du test de Wald-Wolfwitz 23
Tableau 4 : Résultat du test de Mann-Kendall 23
Tableau 5 : Résultat du test de Wilcoxon 23
Tableau 6 : Résultats des trois tests effectués sur les Q95 24
Tableau 7 : Résultats des tests effectués des deux modèles utilisés 25
Tableau 8 : Résultat des valeurs des paramètres BIC et AIC des données d'observations 28
Tableau 9 : Résultat des valeurs des paramètres BIC et AIC des données futures 29
Tableau 10 : Quantile estimé sur les stations étudiées 31
Tableau 11 : Quantiles estimés pour les données futures 32
Tableau 12: Résultats du test de Khi Carré pour des différentes stations d'observations 44
Tableau 13 : Résultats de khi Carré pour les deux modèles 44
Tableau 14 : Paramètre des lois retenues 44

Liste des figures

Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude 10
Figure 2: Type de sol du bassin versant de l'Okpara 12
Figure 3: Etape fondamentale de l'analyse 15
Figure 4 : Ajustement des quatre stations à la loi de Gumbel de 1985 à 2020 26
Figure 5 : Ajustement des lois extrêmes au Q95 26
Figure 6 : Ajustement des lois aux données du modèle ECARTH de 2020 à 2050 27
Figure 7 : Ajustement des lois au modèle HADGEM2 de 2020 à 2050 28
Figure 8 : Evolution des pluies maximales des stations 34
Figure 9: Variabilité des Q95 34
Figure 10 : Variabilité des pluies futures du modèle ECARTH 35
Figure 11 : Variabilité des pluies futures du modèle HADGEM2 36

Table des matières

Dédicace i

Remerciements ii

Résumé iii

Abstract iv

Liste des sigles et acronymes v

Liste des tableaux vi

Liste des figures vii

Table des matières viii

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GENERALE 1

Introduction générale 2

1.1. Contexte et justification de l'étude 2

1.2. Revue de littérature 3

1.2.1. Clarification conceptuelle 3

1.2.2. Synthèse bibliographique 4

1.3. But de la recherche 5

1.4. Questions de recherche 5

1.5. Objectifs de l'étude 6

1.5.1. Objectif général 6

1.5.2. Objectifs spécifiques 6

1.6. Hypothèses de travail 6

1.7. Organisation générale du mémoire 6

CHAPITRE 2 : DONNEES, MATERIELS ET METHODES 8

2.1. Milieu d'étude 9

2.1.1. Présentation du bassin versant de l'Okpara à Nano 9

2.1.2. Géologie 10

2.1.3. Végétation 11

2.1.4. Relief 11

2.1.5. Sols 11

2.1.6. Climat et hydrographie 12

2.1.7. Aspects socio-économiques 13
2.2. Données utilisées 13
2.3. Matériel utilisé 14
2.4. Méthodes 14
2.4.1. Collecte des données 15
2.4.2. Contrôle de la qualité des données 16
2.4.3. Présentation des caractéristiques des extrêmes 16
2.4.4. Ajustement de quatre (04) lois aux valeurs extrêmes et choix de la meilleure loi 16
2.4.4.1. Les hypothèses de base 16
2.4.4.2. Loi des valeurs extrêmes 17
2.4.4.3. Choix de la meilleure distribution 18
2.4.5. Paramètre des lois choisis 19
2.4.6. Les quantiles 20
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS 21
3.1. Etude statistique de base des données 22
3.1.1. Caractérisation des extrêmes pluviométriques dans la zone d'étude 22
3.2. Tests d'hypothèses 22
3.2.1. Vérification des trois tests pour les pluies extrêmes 22
3.2.2. Vérification des trois tests pour les débits extrêmes (Q95) 24
3.2.3. Vérification des tests pour les données futures des deux modèles utilisés 24
3.3. Ajustement des lois extrêmes aux séries de données hydroclimatiques 25
3.3.1. Ajustement des lois extrêmes aux séries pluviométriques 25
3.3.2. Ajustement des lois extrêmes aux Q95 26
3.3.3. Ajustement des séries pluies futures 27
A. Pour le modèle ECARTH 27
B. Pour le modèle HADGEM2 27
3.4. Choix de la loi de distribution 28
C. Pour les données d'observations 28
D. Pour les données futures 29
3.5. Estimation des quantiles des séries hydroclimatiques extrêmes étudiées. 30
3.5.1. Pour les données d'observations 30
3.5.2. Pour les données futures 31
3.5.3. Présentation des variabilités 32
E. Présentation de la variabilité des séries de pluies des stations étudiées 33

F. Variabilité des Q95 34
G. Présentation de variabilité des pluies futures 34
3.6. Comparaison des variabilités actuelles et futures des PMJ 36
3.7. Discussions 37
Conclusion générale et Perspectives 39
Références bibliographiques 40

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

1.1. Contexte et justification de l'étude

Au cours du XXIe siècle, l'effet des variations climatiques sur les systèmes naturels et humains s'observe sur tous les continents et les océans. Il est devenu aujourd'hui un danger environnemental qui nécessite une anticipation afin de ne pas en venir aux catastrophes. Il entraine l'augmentation de la fréquence des évènements hydroclimatiques extrêmes (Koumassi et al.,2014). Le continent africain n'est pas en marge de ce phénomène qui s'amplifie avec la croissance démographique, l'urbanisation incontrôlée et galopante, l'imperméabilisation du sol, etc. En Afrique tropicale et dans le golfe de Guinée en particulier, les événements hydroclimatiques extrêmes tels que les précipitations violentes, les inondations et les sécheresses ne sont pas sans conséquence sur la population et son environnement socioéconomique (Amoussou et al., 2014). Selon Hmidi et al, (2019), plusieurs villes et localités tunisiennes de la péninsule du Cap Bon, la ville de Soliman a été touchée par de graves inondations survenues le 22 septembre 2018 ; des dégâts très importants ont été enregistrés en particulier dans la zone industrielle. Ce phénomène d'inondation qui affecte ce pays a causé d'énormes dégâts sur tous les plans. D'où leurs fameux proverbes tunisiens : « lamente-toi s'il pleut, lamente-toi s'il ne pleut pas » qui met bien en exergue l'ancrage de ce risque dans la mémoire des populations humaines. De plus, entre les années 2007 et 2010, les pays africains comme le Benin, le Togo, le Niger, le Burkina, le Sénégal, etc., ont connu de graves inondations.

En effet, le Benin un pays de l'Afrique de l'Ouest a particulièrement connu une grave inondation en 2010 comme d'autre pays de la sous-région. Cette inondation a affecté plus de 680 000 personnes avec 46 morts. Des 77 Communes que compte le pays, 55 ont été sinistrées, dont 21 sévèrement frappées. On dénombre également 92 hôpitaux et 455 établissements détruits. Selon le Rapport d'évaluation des Besoins Post Catastrophes (2011), les inondations de 2010 au Bénin ont eu un impact total évalué à plus de 127 milliards de FCFA, soit près de 262 millions USD ,les dommages (patrimoine, infrastructures, stocks…) sont estimés à près de 78,3 milliards de FCFA (environ 162 millions USD) et les pertes (flux réduits, pertes de production, réduction des chiffres d'affaires, coûts et dépenses induits comme conséquence de la catastrophe) à près de 48,8 milliards FCFA (environ 100 millions USD). Plus récemment, en 2019 et en 2021, la saison pluvieuse a été particulière dans certaines régions, du pays où les ponts ont cédé, les champs et les écoles sont restés inondés pendant longtemps.

Par ailleurs, ces inondations n'ont pas épargné le bassin versant de l'Opkara à Nano qui est l'un des bassins versant situés au nord du pays. Les populations riveraines de ce bassin versant sont confrontées aux inondations conduisant les plus vulnérables à la faim, la famine et à des conséquences néfastes telles que : le ralentissement des activités socio-économiques et la destruction des habitats. De plus, dans cette zones les populations pratiques principalement des activités agricoles (l'agriculture, l'élevage, la pêche, etc.,) pour subvenir à leurs besoins. Mais les inondations répétées dans cette zone ne permettent pas le bon déroulement des différentes activités aussi. En raison de cette situation persistante, la présente étude intitulée : « Impact de la variabilité climatique sur les inondations dans le bassin versant de l'Opkara à Nano » a-t-elle été réalisée.

1.2. Revue de littérature

1.2.1. Clarification conceptuelle

Pour mieux cerner ce sujet il est important de clarifier certains mots.

- **Inondation** : c'est la submersion par des eaux douces ou salées d'une zone généralement émergée. Cette submersion peut se faire lentement ou brutalement et se répéter de manière régulière ou bien être plus anecdotique. Elle peut être due à la crue d'un cours d'eau, des pluies intenses, la rupture d'un ouvrage. (WWW.futura-sciences.com/planete/définitions/meteorologie-inondation-6305/).
- **Crue :** c'est une augmentation du niveau d'eau au niveau des fleuves, lacs, rivières, ruisseaux, etc. Selon R. Ababou et A. Al-Bitar, (2006) le terme « crue » peut être associé, plus simplement, à un débit en rivière particulièrement élevé, maximum, ou de faible fréquence.
- **Période de retour** : elle est considérée comme étant l'intervalle de temps qu'il faudra pour que le degré entre deux évènements atteigne ou dépasse un certain seuil. C'est également l'inverse de la fréquence. La période de retour T d'un débit QT, correspond à l'inverse de la probabilité de dépassement de cet événement (F. Métivier,2010).
- **Analyse fréquentielle** : C'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 (Koumassi et al,2014). L'analyse fréquentielle est un des outils de base de l'analyse de l'occurrence d'évènements extrêmes. Elle consiste à rechercher une loi de probabilité qui s'ajuste le mieux aux valeurs observées de la variable

aléatoire "pluie maximale journalière" après comparaison de différentes lois de probabilités et méthodes d'estimation à l'aide de tests d'adéquation (Habibi et al., 2013).

- **Tendance** : c'est une variation graduelle dans les propriétés d'une variable aléatoire.
- **Quantile de pluie** : C'est la hauteur de pluie qui correspondent à des valeurs de probabilité ou de période de retour donnée. Selon (Grades 2017), le quantile de pluie est défini comme :

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

- **Extrêmes :** ce sont des évènements climatiques différents qui peuvent donner naissance à une modification (écart) très importante à la normale climatologique. Pour 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.
- **Lois de valeurs extrêmes**

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

1.2.2. Synthèse bibliographique

Du fait de l'instabilité des saisons d'une année à une autre, l'étude de la variabilité climatique et hydrologique n'est pas une chose aisée. Les changements climatiques sont causés par les modifications de l'atmosphère qui résultent de sa transformation chimique par les gaz à effet de serre (GES) (Jeanne et al 2011). Le développement des activités industrielles et agricoles, la multiplication des moyens de transport et l'explosion démographique au cours du siècle passé ont engendré l'accroissement des concentrations de rejets des Gaz à Effet de Serre (GES), cause du changement climatique actuel (Ogouwale et al.2020). Ainsi, les conditions climatiques actuelles compromettent la disponibilité des ressources en eau, le développement des activités économiques et la durabilité environnementale (Gildas et Ange,2018). Yapi et al, (2019) ont réalisé une étude spatio-temporelle des évènements pluviométriques extrêmes à partir des

observations journalières provenant du centre de réanalyse du système de prévision climatique (CFSR). Cependant, pour parvenir à comprendre ce problème de variabilité climatique qui conduit aux inondations plusieurs lois d'ajustements ont été utilisée et pour pouvoir choisir la meilleure loi, des tests sont effectués. Tout ceci pour déterminer enfin le temps ou la période de retour. En Afrique, Ousmane (1992) a effectué un ajustement statistique des échantillons de pluies sur le bassin versant de la Falémé au Sénégal. Hlaoui et Henial (2019) ont examiné la fréquence et la tendance dans l'évolution des fortes pluies, ainsi que les mécanismes atmosphériques à l'origine de ces fortes pluies qui surviennent de temps en temps dans le Sahara Tunisien où le climat passe de très aride à hyper aride. Koumassi et al. (2014) ont effectué une analyse fréquentielle des pluies maximales journalières sur le bassin versant de la Sota couvrant la période 1965-2008. Selon Ague (2015), les séries de maxima annuels de pluies journalières de la zone subéquatoriale du Bénin suivent préférentiellement trois lois statistiques (Gumbel, Log normale et Pearson type III) avec une prédominance de la loi de Gumbel et Log normale. Pour comprendre le comportement des pluies extrêmes actuelles et futures et la variation des crues, des études ont été menées. Ogouwale et al, (2021) ont effectué des études pour comprendre les actuelles variations de pluies et leurs effets sur la disponibilité de nos ressources en eaux afin de réduire la vulnérabilité des cours d'eau et des populations aux fluctuations pluviométriques dans le sous bassin versant de l'Okpara à Nano. Dans son travail sur les indicateurs des évènements hydroclimatiques extrêmes, Kodja en 2018 a montré qu'il y a une régression de15.7% de la variabilité pluviométrique dans le nord. Kouassi (2011), quant à lui, a relevé une très forte variabilité de la pluviométrie et des écoulements. Lawin et al, (2013) ont indiqués une augmentation des précipitations dans le futur. Selon Sintondji et al, (2019), les Communes les plus potentiellement vulnérables aux inondations pluviales dans le futur seraient celles de Djougou, N'Dali, Pèrèrè et Ouaké au nord du bassin.

1.3. But de la recherche

Le principal but de ce travail est d'évaluer les fluctuations des pluies et crues extrêmes dans le bassin versant de l'Okpara à l'exutoire de Nano afin de faciliter la tâche aux ingénieurs et décideurs dans leurs travaux de gestion et de ressortir enfin leurs futures probabilités d'apparition.

1.4. Questions de recherche

Ce travail s'est basé sur les questions ci-dessous :

- Comment les pluies extrêmes se comportent-elles dans le temps et dans l'espace sur le bassin versant de l'Okpara à Nano ?

- Quelles sont les variations de crue observées dans le bassin versant de l'Okpara à l'exutoire de Nano ?

- Quelles sont les probabilités d'apparition future des extrêmes pluviométriques dans ce bassin versant ?

1.5. Objectifs de l'étude

1.5.1. Objectif général

L'objectif général de ce travail est d'évaluer l'impact de la variabilité climatique sur les inondations dans le bassin versant de l'Okpara à Nano.

1.5.2. Objectifs spécifiques

Pour atteindre l'objectif principal, les objectifs spécifiques sont énumérés comme suit :

- Evaluer l'évolution spatio-temporaire des pluies extrêmes dans le bassin versant de l'Okpara à Nano.

- Analyser les crues extrêmes à l'exutoire du bassin versant à Nano.

- Comparer les variabilités actuelles et futures des pluies extrêmes dans le bassin versant de l'Okpara à Nano.

1.6. Hypothèses de travail

En relation avec les objectifs fixés, nous avons formulé trois (03) hypothèses suivantes :

- La variabilité climatique augmente les risques d'inondation dans le bassin ;
- Les débits et hauteurs d'eau susceptibles de créer des inondations sont récurrents à l'exutoire du basin ;
- Le bassin de l'Okpara à Nano est plus vulnérable à la variabilité future des pluies extrêmes.

1.7. Organisation générale du mémoire

Notre étude est structurée en trois (03) chapitres (hors, la conclusion générale et les perspectives).

Le premier chapitre est celui de l'introduction générale et composé de sept (07) sections dont le contexte et justification de l'étude et la revue de littérature.

Le deuxième chapitre est celui des données, matériel et méthodes. Il est composé de 6 sections principales dont la présentation de la zone d'étude, la description des données utilisées, les logiciels manipulés et surtout la méthodologie adoptée.

Le troisième chapitre est celui des résultats et discussions. Il est composé de 7 sous-sections dont 6 pour présenter les résultats obtenus et la dernière consacrée aux discussions.

CHAPITRE 2 : DONNEES, MATERIELS ET METHODES

Introduction

Ce chapitre présente le cadre d'étude c'est-à-dire, la situation géographique de la zone d'étude, la géologie, le climat, l'hydrographie, le sol, la végétation, le relief et l'aspect socio-économique. Il facilite la compréhension de l'étude car il permet de bien interpréter les résultats de l'étude. Il présente également les données, les matériels et décrit la méthodologie.

2.1. Milieu d'étude

Dans cette partie, est présenté notre milieu d'étude.

2.1.1. Présentation du bassin versant de l'Okpara à Nano

Le bassin versant de l'Okpara à Nano est un bassin versant de la République du Bénin dans l'Ouest du continent africain.

Géographiquement, le bassin versant de l'Okpara est situé entre 7°30' et 9°54' de latitude Nord, et 1°30' et 3°18' de longitude Est et s'étend sur une superficie évaluée à environ 12 710 km². Plus précisément, notre zone d'étude principale (le sous-bassin versant de Nano) est située au nord du bassin versant de l'Okpara et couvre une superficie de 2 314 km² (Ogouwale et al,2022). Cinq (05) grandes Communes couvrent ce sous bassin notamment les communes de : Nikki, Pèrèrè, N'Dali, Parakou, et Tchaourou.

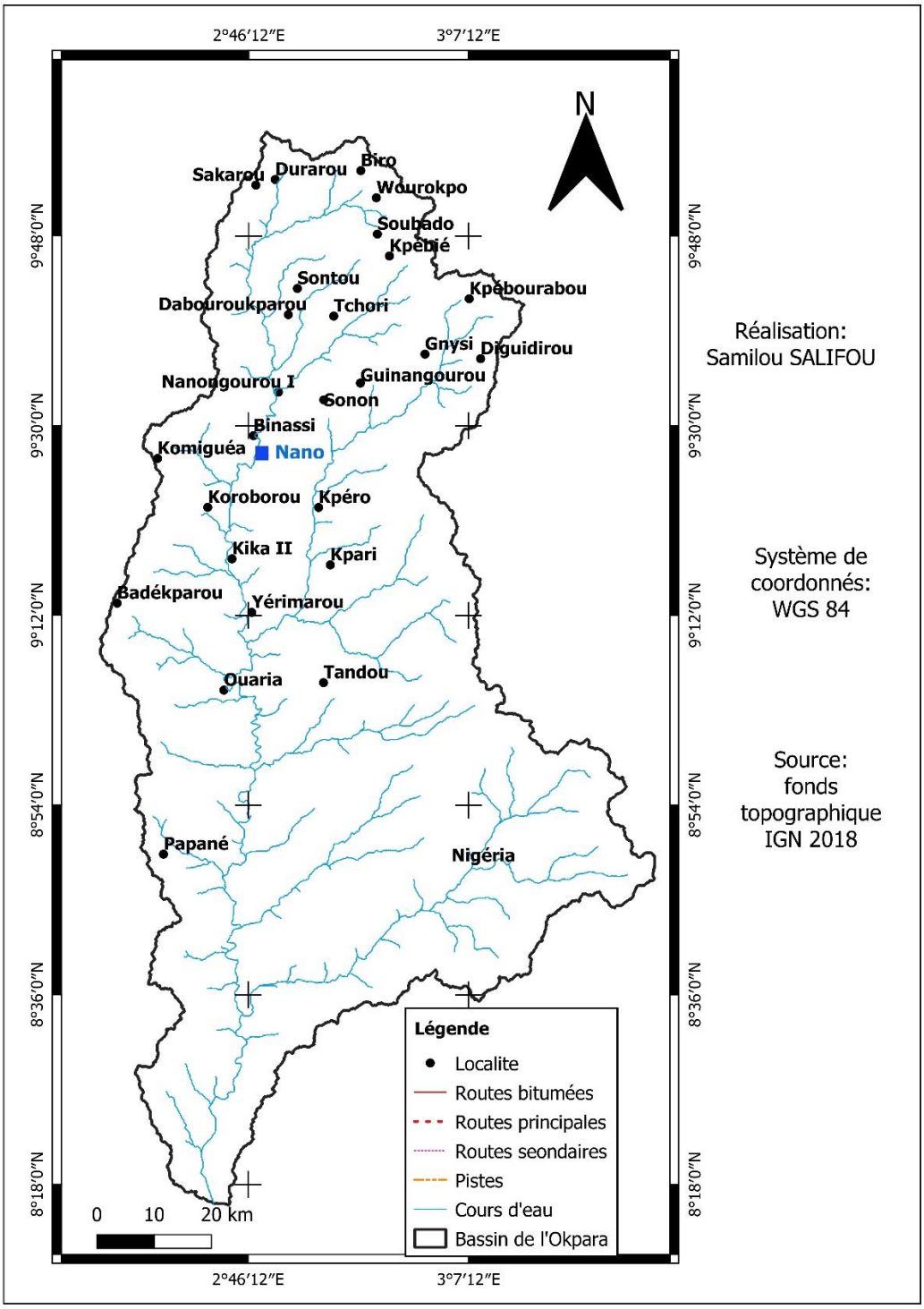


Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude

2.1.2. Géologie

Notre zone d'étude s'étend sur une seule formation géologique : la formation du socle. Ce secteur est dans le grand massif de granite syntectonique qui est pétrographiquement caractérisé par une grande hétérogénéité. Il est composé de gneiss, migmatite et de muscovite.

2.1.3. Végétation

La végétation de l'ensemble de notre zone d'étude telle qu'elle apparait, est une forêt claire et qui s'apparente à une savane arborée, le plus souvent arbustive. Les savanes arborées ou arbustives occupent tous le versant et correspondent aux zones de cultures. La végétation varie des savanes arbustives aux savanes arborées ; par endroits, des forêts classées, des forêts galeries et des plages complètement nues y sont rencontrées. (Zakari et al, 2022). Selon (INSAE,2016) la savane arborée et arbustive se rencontrent 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.

Les zones hydromorphes (dépression et thalwegs) ainsi que des bas de pente présentent des peuplements et des formations végétales bien caractéristiques de pédoclimat humide. Les versants sont occupés par une savane arbustive. Le paysage apparait donc dans son ensemble comme formé de petites collines à pentes légères, caractéristiques des zones granitiques. Cette savane qui ressemble à une jachère est plus ou moins dense suivant l'intensité de l'agriculture. Parmi les petits arbres et arbustes nous avons : le karité le plus caractéristique (Volkoff 1965).

2.1.4. Relief

Le relief est essentiellement constitué de plaines et plateaux surmontés par endroits de collines dont les hauteurs maximales tournent autour de 300 m (Zakari et al, 2022). Ce relief est accidenté et est composé de plaines et de collines favorable aux différentes activités des populations telles que l'agriculture.

2.1.5. Sols

Les sols sont ceux du socle granito-gneissique pour la plupart ferrugineux et généralement aptes à l'agriculture. Dans les plaines alluviales, dominent les sols alluviaux, argilo-sableux assez riches du fait de l'apport de matières organiques par les hautes eaux annuelles des fleuves (Zakari et al, 2022).

Les sols ferrugineux tropicaux qui occupent environ 44,53 % de la superficie totale du milieu sont dominants dans la zone d'étude, suivis des sols alluvionnaires (36,21 %) provenant des dépôts de sédiments laissés par la rivière Okpara et ses affluents. On distingue également les minéraux bruts lithiques d'origine non climatique provenant de l'érosion et formés sur des

cuirasses (13,16 %) et les sols peu évolués lithiques d'origine non climatique formés sur du quartzite et du micaschiste (4,72 % de la superficie de la zone). D'autres types de sol de moindre distribution sont également observés sur le bassin notamment les sols hydromorphes, les vertisols et les sols ferralitiques (Dossou-Yovo, 2009).

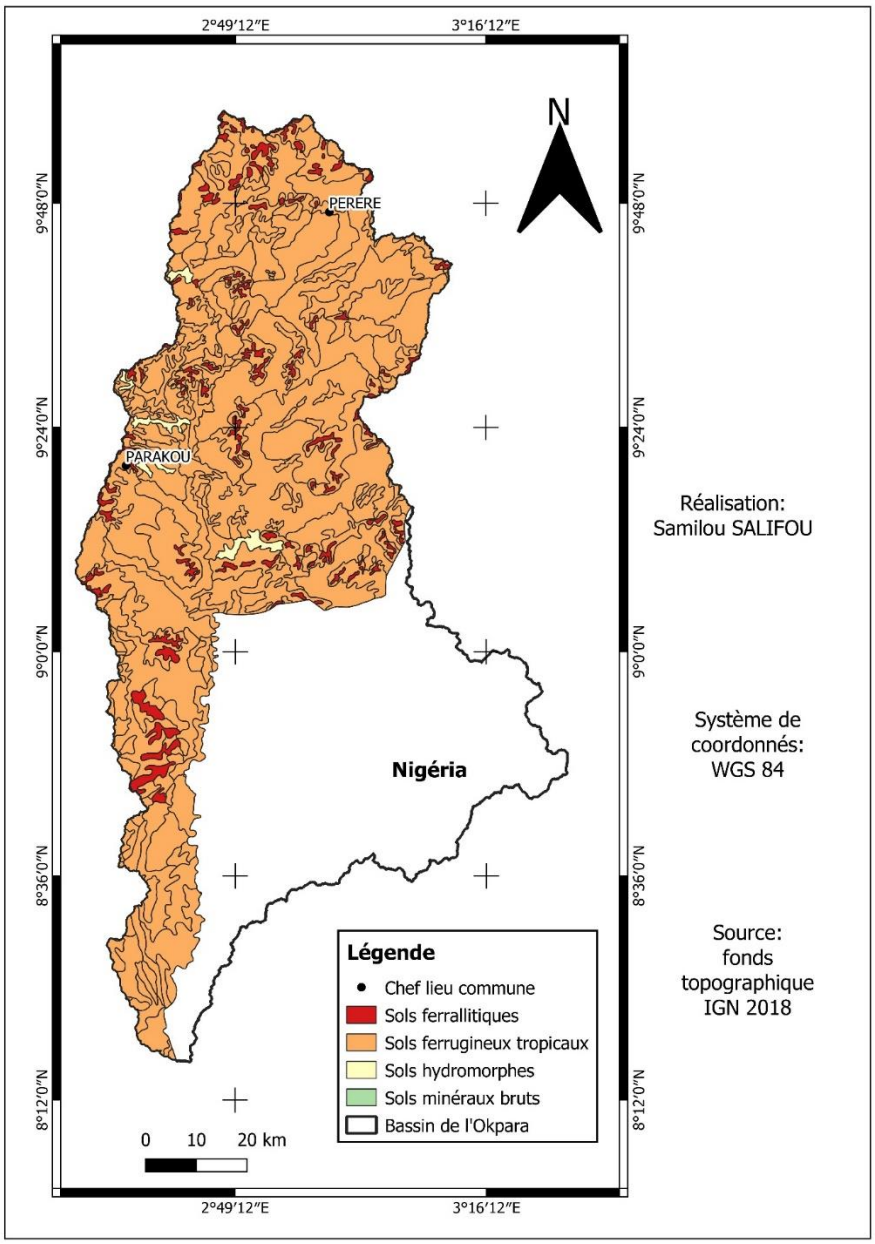


Figure 2*:* Type de sol du bassin versant de l'Okpara

2.1.6. Climat et hydrographie

La région se trouve dans la zone climatique soudano-guinéenne caractérisée par une saison des pluies et une saison sèche avec chacun une durée sensiblement égale. Selon (Zakari et al, 2022) le climat est du type continental soudano-guinéen avec l'alternance d'une saison pluvieuse et d'une saison sèche marquée par l'harmattan. On observe également l'harmattan qui varie entre

le mois d'octobre et de mai selon la commune (Boko et al., 2012). Ce climat de transition tend à laisser place à un climat de type soudanien marqué par une saison pluvieuse (d'avril à octobre) et une saison sèche (de mi-octobre à mi-avril) ; les hauteurs moyennes des pluies sont de 1 100 mm par an et les températures moyennes sont souvent comprises entre 24 et 30 °C (Akpo et al,2016).

En ce qui concerne l'hydrographie, la zone d'étude renferme plusieurs sous bassins notamment le sous bassin versant de Tassiné, de Yéli Maro, de Oli, de Sui et de l'Okpara supérieur qui influencent, d'une manière ou d'une autre, le bassin versant de l'Okpara. Cette zone d'étude est également constituée des rivières comme : la rivière Nano, Sui, etc…

2.1.7. Aspects socio-économiques

La zone d'étude compte cinq Communes avec une population d'une densité non négligeable. Cette population est estimée à 822440 habitants dont 151232 à Nikki, 78988 à Pèrèrè, 113604 à N'Dali, 255478 à Parakou et 223138 à Tchaourou (INSAE,2016).

Cette population est composée de Bariba, de Tchabè, de Peulh, de Dendi, de Wassangari et d'autre groupes socio-culturels. Mais il faut noter que les autochtones de cette population sont les Bariba et Tchabè. L'activité principale de cette population est l'agriculture ensuite, viennent l'élevage et la pêche. On remarque que la branche "agriculture, pêche et chasse" occupe plus des deux tiers de la population active de toutes les communes sauf celle de Parakou (11,8%) (INSAE,2016)

Plusieurs groupes socio-culturels sont présents dans le bassin. Il s'agit des Tchabè, Bariba, Fon et des migrants venus des départements du Zou, de l'Atacora et de la Donga. Ces migrants sont majoritairement les Fon, Lokpa et Ditamari à la recherche de terres agricoles fertiles. A ces groupes s'ajoutent les Peulhs venus du Borgou et du Nigeria qui s'adonnent aux activités agropastorales. Il faut retenir que ceux provenant du Nigeria sont des transhumants à la recherche du pâturage (Akpo et al, 2016)

2.2. Données utilisées

Pour notre étude, nous avons acquis les données de pluies et de débits journalières respectivement à la Météo-Bénin et à la DG-Eau. Ces données proviennent des stations climatiques et hydrologique installées et/ou proches du bassin versant de l'Okpara et s'étendent sur la période de 1985 à 2020 (Tableau1). Cette période est choisie en fonction de la disponibilité des données.

Les données climatiques futures sont données par deux Modèles Climatiques Régionaux (MCR) qui ont une meilleure résolution spatiale et couvrent la période de 2020 à 2050. Ces deux MCR sont : le modèle ECARTH et le modèle HADGEM2 avec pour scénario RCP4.5.

La présente étude étant une étude très localisée sur le bassin de l'Okpara à Nano et ses environs, le choix des MCR qui ont une échelle spatiale beaucoup plus fine que les MCG (Modèle Climatique Global) permet en première approximation, de limiter les incertitudes. Ainsi, les MCR à utiliser dans cette étude sont ceux obtenus dans le cadre du PAS-PNA (Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation) au Benin.

Tableau 1: Stations utilisées

STATIONS	LONGITUDE (°)	LATITUDE (°)	PERIODE
Ina	2,73	9,96	1985-2020
Kaboua	2.71	8.25	
Nikki	3,2	9,93	
Okpara	2,73	9,46	
Parakou	2,6	9,35	

2.3. Matériel utilisé

L'outil principal de travail qui nous a permis de mener à bien cette recherche scientifique est un ordinateur portatif muni des logiciels :

- Microsoft Word 2016 pour rédiger le document de mémoire ;
- Microsoft Excel 2016 pour le comblement des données ;
- QGIS 3.22. : pour la réalisation des cartes ;
- HYFRAN : HYdrological FRequency ANalysis pour l'analyse des valeurs hydroclimatiques extrêmes.

2.4. Méthodes

Dès le début de ce travail, nous avons acquis des documents en relation avec l'analyse fréquentielle des extrêmes hydroclimatiques dans la zone nord du Bénin. Ce qui a conduit à l'établissement de la méthodologie choisie dans cette étude. Les parties essentielles de cette méthodologie sont résumées dans la figure 3 :

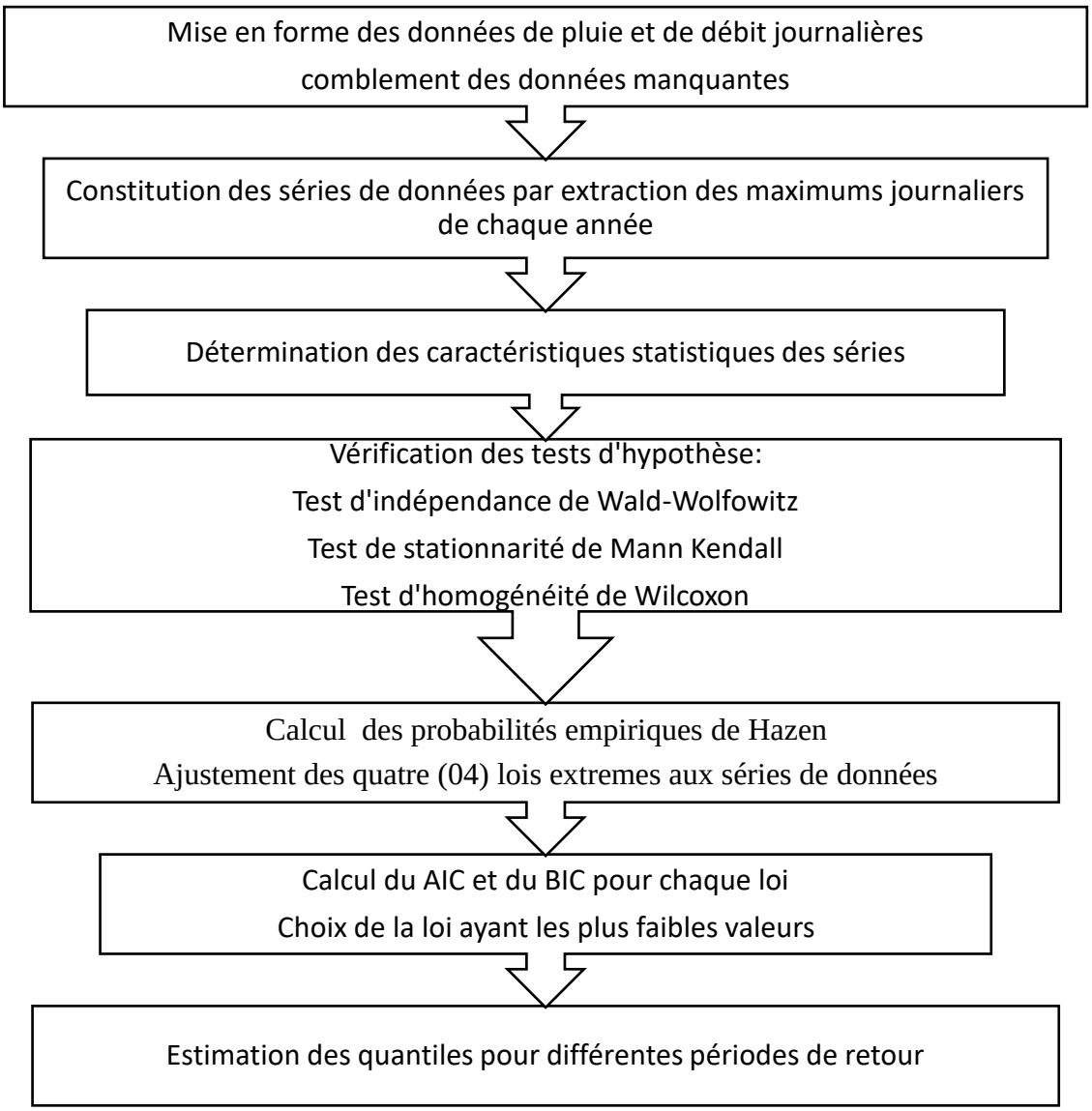


Figure 3: Etape fondamentale de l'analyse

Mais concernant les données hydrologiques (débits) nous avons extrait les 95è centile (Q95) de chaque année par calcul car il s'agira d'analyser les crues extrêmes dans notre zone d'étude. Ainsi, après cette partie viendra la présentation des variabilités actuelles et futures puis leurs comparaisons.

2.4.1. Collecte des données

Nous avons collecté les données pluviométriques à l'Agence Météo-Bénin et les données de débits à la DG-Eau. Les données futures proviennent de deux MCR à savoir le modèle ECARTH et le modèle HADGEM2.

2.4.2. Contrôle de la qualité des données

Comme pour tout type d'analyse statistique, la pertinence des résultats dépend en premier lieu de la qualité des données disponibles. Ainsi, nous avons déterminé le pourcentage de données manquantes des séries pluviométriques et de débits étudiés. Le régime de notre zone d'étude étant uni-modale, la saison de pluies commence en avril et s'installe entre juin et octobre. La recherche de données manquantes s'est donc focalisée sur cette période. Ainsi, pour chaque station et pour chaque année, nous avons déterminé le rapport du nombre de jours de données manquantes des mois de juin à octobre par rapport au nombre total de jours pluvieux.

Ensuite, nous avons procéder à l'élimination des années avec beaucoup de lacune en vue de constituer une série chronologique complète et fiable, exempte de toutes les valeurs aberrantes. Après avoir contrôler et combler les données manquantes nous avons effectué l'extraction des maximums de pluie et de débit journalière par année et pour chaque station. Les séries de données utilisées dans la suite sont constituées des maximums annuels de pluie et de débit journalière.

2.4.3. Présentation des caractéristiques des extrêmes

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

2.4.4. Ajustement de quatre (04) lois aux valeurs extrêmes et choix de la meilleure loi

Afin de choisir la loi qui représente mieux les séries de donner, nous avons effectué l'ajustement des quatre (04) lois aux séries de donner. Avant tout, les données ajustées doivent respecter des hypothèses de base et la meilleure loi sera choisie à partir des critères après l'ajustement. Nous présenterons respectivement les hypothèses de base, les quatre lois, les critères de choix et la meilleure loi.

2.4.4.1. Les hypothèses de base

Pour voir si une hypothèse est vraie en statistiques, il faut lui appliquer les tests statistiques. Ainsi, pour les trois tests nous avons :

- L'hypothèse H0 qui formule ce que l'on souhaite rejeter/réfuter,
- L'hypothèse H1qui formule ce que l'on souhaite montrer.

Par exemple, si on veut montrer l'hypothèse "lot non conforme", H0 et H1 s'opposent sous la forme : H0 : "lot conforme" contre H1 : "lot non conforme".

En effet, il existe plusieurs tests statistiques mais certains en particulier permettent de vérifier le caractère aléatoire de l'échantillon : tests de stationnarité, d'indépendance et d'homogénéité. Notons que les résultats de ces tests d'hypothèses sont généralement présentés sous forme de couple (statistique des tests, p-value) ; la p-value étant la probabilité au dépassement de la valeur calculée de la statistique du test que l'on compare ensuite avec le niveau de signification.

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

Dans ce test, on émet comme hypothèse qu'aucune observation dans la série de données n'a d'influence sur les observations suivantes. Même si les événements d'une série sont aléatoires, ils peuvent ne pas être indépendants. La dépendance varie en fonction du pas de temps des éléments successifs de la série ; elle sera souvent forte entre les valeurs journalières, alors qu'elle sera généralement faible entre les valeurs maximales annuelles (OMM, 2014).

- **Test de stationnarité de Mann-Kendall**

Une série chronologique est dite stationnaire si ses propriétés sont invariantes dans le temps. Le test de Mann-Kendall est le plus souvent utilisé dans la littérature pour la détection de tendances car il ne nécessite pas d'hypothèse quant à la normalité de la distribution et s'adapte donc bien aux données hydrologiques (Madsen, 2013). Mendonça et Castelhano (2019), après calcul, ont appliqué le test de tendance de Mann Kendall, révélant des tendances positives dans huit indices sur les douze.

- **Test d'homogénéité de Wilcoxon** :

Le problème d'homogénéité est le suivant : disposant de plusieurs échantillons distincts et indépendants, on veut savoir s'ils sont tirés de la même population.

2.4.4.2. Loi des valeurs extrêmes

A cette étape, nous avons choisi quatre (04) lois extrêmes pour ajuster les données de pluie journalière. Entre autres, nous avons : Log-normale, Gumbel, Pearson type III et log-Pearson type III.

- ✓ **Loi Log-normale**

Cette loi a été obtenue par le changement de variable Y= g(X) dans la loi de Gauss et peut avoir jusqu'à trois paramètres. Pour M. Roche (1963), on peut généraliser la loi de Gauss et la rendre dissymétrique, par des changements de variables appropriés. Le plus connu de ces changements

de variables consiste à prendre comme variable gaussienne, le logarithme ou une fonction linéaire du logarithme de la variable étudiée.

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

C'est une loi qui à une grande nécessité dans l'évaluation des paramètres (pluie, débit) extrêmes en hydrologie. Elle a été créée pour l'étude de la distribution des fréquences de valeurs extrêmes (maximums ou minimums annuels par exemple) (M. Roche,1963).

- ✓ **Loi Pearson type III**

C'est une loi statique a trois paramètres dont un paramètre de position m, un paramètre d'échelle α et un paramètre de forme λ utilisé dans l'analyse fréquentielle. Elle est encore appelée loi Gamma incomplète

- ✓ **Loi log-Pearson type III**

Comme la loi Pearson type III, elle a également trois paramètres : (un paramètre de position m ; un paramètre d'échelle α et un paramètre de forme λ. C'est une loi qui est beaucoup utilisée.

2.4.4.3. Choix de la meilleure distribution

Ils existent plusieurs critères permettant de comparer les différentes lois afin de choisir la loi qui s'ajuste au mieux à la série étudiée. Il s'agit du coefficient de détermination (R^2), le coefficient de détermination ajusté (R^2) ; les critères Critère d'Information d'Akaike (AIC) et le critère d'Information Bayésien (BIC). Ainsi, de nombreux auteurs ont utilisé les critère AIC et BIC pour faire leur choix. C'est le cas de : (Ague et Afouda, 2015 ; Ague, 2015 ; Hounkpè et al., 2015), qui ont sélectionné la meilleure distribution en comparant les critères AIC et BIC des lois testées. C'est pour cette raison que nous avons opter pour ces deux critères (AIC et BIC) dans notre étude.

- Le critère d'information Akaike (AIC)

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

L'expression de ce critère est la suivante :

$AIC = -2 \log (L) + 2 K$ (1)

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

- Le critère d'information bayésien (BIC)

Le critère BIC se place dans un contexte bayésien de sélection de modèles et est une approximation du calcul de la vraisemblance des données conditionnellement au modèle fixé. Bertrand et Maumy (2008) soulignent que l'AIC a été introduit pour retenir des variables pertinentes lors de prévisions, et que le critère BIC vise la sélection de variables statistiquement significatives dans le modèle.

L'expression de ce critère se note :

$BIC = -2 \log (L) + 2 K \log$ (2)

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

2.4.5. Paramètre des lois choisis

Pour déterminer les paramètres des lois retenues, différentes méthodes peuvent être utilisées. Il s'agit de la méthode graphique, la méthode des moments, le maximum de vraisemblance, la minimisation d'un test d'adéquation.

Les méthodes d'estimation des paramètres les plus utilisées sont en pratique la méthode du maximum de vraisemblance et la méthode des moments (Bobée et Perreault,1992). La première est employée généralement à cause de ses propriétés asymptotiques fort- intéressantes ; la seconde pour sa simplicité. Une variante de la méthode des moments qui s'est révélée efficace en hydrologie pour la distribution des valeurs extrêmes généralisées est la méthode des moments pondérés en fonction des probabilités ou méthode des L-moments (OMM, 2014). C'est ainsi que nous avons opté, dans notre travail, pour la méthode du maximum de vraisemblance puisqu'elle présente aussi l'avantage d'être applicable à toutes les distributions statistiques à l'exception de la distribution Log-Pearson type III qui a nécessité l'application de la méthode des L-moments.

- **Maximum de vraisemblance**

Cette méthode a des fondements statistiques. Selon OMM (2014), cette méthode permet de choisir les paramètres qui rendent la distribution ajustée aussi cohérente que possible (au sens statistique) avec l'échantillon observé.

- **Méthode des L-Moments**

Cette méthode permet de synthétiser les propriétés statistiques des jeux de données hydrologiques. Un avantage des estimateurs des L-moments, est qu'il s'agit de combinaisons linéaires des observations et que l'on ne doit donc pas calculer le carré ou le cube de ces observations. Donc, le L-coefficient de variation et le L-coefficient d'asymétrie ne sont pratiquement pas biaisés, alors que les estimateurs du coefficient de variation et du coefficient d'asymétrie obtenus au moyen de la méthode des moments mixtes sont fortement biaisés et extrêmement variables.

2.4.6. Les quantiles

La prévision d'une probabilité d'apparition d'un phénomène hydroclimatique (pluie extrême et débit extrême) donnée à partir de la fonction de répartition ou de la densité de probabilité s'obtient à partir de l'ajustement d'une loi statistique à ce phénomène.

Nous pouvons également observer à travers des graphes, l'évolution des débits qui caractérisent les crues très fortes et à travers la variabilité des quantiles.

En résumé, ce chapitre s'est essentiellement focalisé sur la zone d'étude et la méthodologie. En effet, il a permis de bien décrire le milieu d'étude et de présenter clairement la méthodologie qui a permis d'obtenir les résultats illustrés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction

Le présent chapitre présente les résultats de l'évaluation issus de l'application de la méthodologie énoncée dans le chapitre précédent ainsi que la discussion qui en résulte.

3.1. Etude statistique de base des données

3.1.1. Caractérisation des extrêmes pluviométriques dans la zone d'étude

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques statistiques des pluies extrêmes

Tableau 2 : Statistiques des stations étudiées

Caractéristiques / Stations	Min	Max	Moy	Ecart-type	Med	Cv	Cs	Ck
Ina (pluviométrique)	29	180	79	31	76	0.39	1.6	5.5
Kaboua (hydrométrique)	0.200	502	208	137	198	0.660	0.376	2.16
Nikki (pluviométrique)	25	170	71	29	64	0.40	1.7	5.7
Okpara (pluviométrique)	45	170	85	28	83	0.33	1.1	3.6
Parakou (pluviométrique)	47	180	91	30	86	0.33	1.3	3.9

Min : valeur minimale de la série Moy : valeur moyenne de la série Max : valeur maximale de la série Cv : coefficient de variation Cs : Coefficient d'asymétrie Ck : Coefficient d'aplatissement.

On constate dans ce tableau que les plus grandes valeurs de la moyenne et de la médiane des stations pluviométriques (Ina, Nikki, Okpara et Parakou) sont au niveau des stations de l'Okpara et de Parakou.

3.2. Tests d'hypothèses

Il s'agit de procéder à la vérification des tests statistiques pour voir l'indépendance, l'homogénéité ou la stationnarité de chaque station. Ainsi, les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de 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.

3.2.1. Vérification des trois tests pour les pluies extrêmes

Les tableaux : 3, 4 et 5 suivants, illustrent les résultats des trois tests appliqués aux données de pluie maximale journalière.

Tableau 3: Résultat du test de Wald-Wolfwitz

Test / Stations	Test d'indépendance		Nature de la station
	|U|	P	
Ina	0.96	0.34	Indépendante
Nikki	0.34	0.75	Indépendante
Okpara	0.73	0.47	Indépendante
Parakou	1.3	0.19	Indépendante

|U| : valeur de la statistique ; **P** : p-value

Il ressort de l'analyse des résultats de ce tableau, que la série chronologique (1985-2020) est indépendante, pour toutes les stations car il n'y a pas de liens entre les observations successives au seuil de défaillance de 5%.

Tableau 4 : Résultat du test de Mann-Kendall

Test / Stations	Test de stationnarité		Nature de la station
	|K|	P	
Ina	1.7	0.094	Stationnaire
Nikki	0.17	0.86	Stationnaire
Okpara	0.40	0.69	Stationnaire
Parakou	0.63	0.53	Stationnaire

|K| : valeur de la statistique ; **P** : p-value

L'application de ce test révèle qu'il n'y a pas de tendance dans les observations au seuil de défaillance de 5%.

Tableau 5 : Résultat du test de Wilcoxon

Test / Stations	Test d'homogénéité		Nature de la station
	|W|	P	
Ina	1.5	0.13	Homogène
Nikki	0.24	0.81	Homogène
Okpara	1.2	0.22	Homogène
Parakou	0.87	0.38	Homogène

|W| : valeur de la statistique ; **P** : p-value

Dans ce test particulièrement, nous avons subdivisé les observations de chaque station en deux sous échantillons égales pour le test d'homogénéité. L'hypothèse H0 considérée ici est : Les moyennes des deux sous-échantillons sont égales.

L'analyse des résultats de ce tableau révèle que la moyenne des deux sous-échantillons est égale au seuil de défaillance de 5% à toutes les stations. Par conséquent, pour toutes les stations, les données sont homogènes.

On remarque ici que toutes les stations sont : indépendantes, stationnaires et homogènes.

3.2.2. Vérification des trois tests pour les débits extrêmes (Q95)

Le tableau ci-dessous résume le résultat des trois tests appliqués aux données de débits extrêmes (Q95) :

Tableau 6 : Résultats des trois tests effectués sur les Q95

Test / Stations	Test d'indépendance		Nature du test
Kaboua	**|U|**	**P**	**Indépendant**
	1.03	0.301	
Kaboua	**Test de stationnarité**		**Stationnaire**
	|K|	**P**	
	0.125	0.900	
Kaboua	**Test d'homogénéité**		**Homogène**
	|W|	**P**	
	0.0728	0.942	

|U| ; |K| ; |W| : valeur de la statistique ; **P** : p-value

L'analyse de ce tableau montre que les observations de cette station sont indépendantes, stationnaires et homogènes.

Comparativement aux stations de pluie extrêmes on peut donc dire que toutes les stations sont donc indépendantes, stationnaires et homogènes.

3.2.3. Vérification des tests pour les données futures des deux modèles utilisés

Le tableau ci-dessous présente les résultats des tests effectués sur les données de pluie future du modèle ECARTH et du modèle HADGEM2.

Tableau 7 : Résultats des tests effectués des deux modèles utilisés

Test / Stations	**Test d'indépendance**		**Test de stationnarité**		**Test d'homogénéité**		**Nature du test**
	|U|	P	|K|	P	|W|	P	
Le modèle ECEARTH							
Ina	0.053	0.96	0.54	0.59	1.9	0.061	I ; S ; H
Nikki	1.0	0.31	0.50	0.62	1.1	0.26	I ; S ; H
Okpara	0.76	0.45	1.4	0.15	1.6	0.12	I ; S ; H
Parakou	0.76	0.45	1.4	0.15	1.6	0.12	I ; S ; H
Le modèle HADGEM2							
Ina	1.7	0.086	0.34	0.73	1.1	0.28	I ; S ; H
Nikki	2.0	0.050	0.41	0.68	0.68	0.50	I ; S ; H
Okpara	0.48	0.63	0.85	0.40	1.6	0.10	I ; S ; H
Parakou	0.48	0.63	0.88	0.38	1.6	0.10	I ; S ; H

|U| ; |K| ; |W| : valeur de la statistique ; **P** : p-value

I : indépendant ; S : stationnaire ; H : homogène

L'analyse de ce tableau révèle que les observations faites avec ce modèle au niveau de ces quatre stations, sont toutes indépendante, stationnaires et homogènes pour les deux MCR considérés.

3.3. Ajustement des lois extrêmes aux séries de données hydroclimatiques

3.3.1. Ajustement des lois extrêmes aux séries pluviométriques

Après la vérification des tests, nous avons procédé à l'ajustement des lois sur les séries pluviométriques maximales. La figure suivante présente un ajustement des séries pluviométriques par la loi Gumbel sur la période d'étude. 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%.

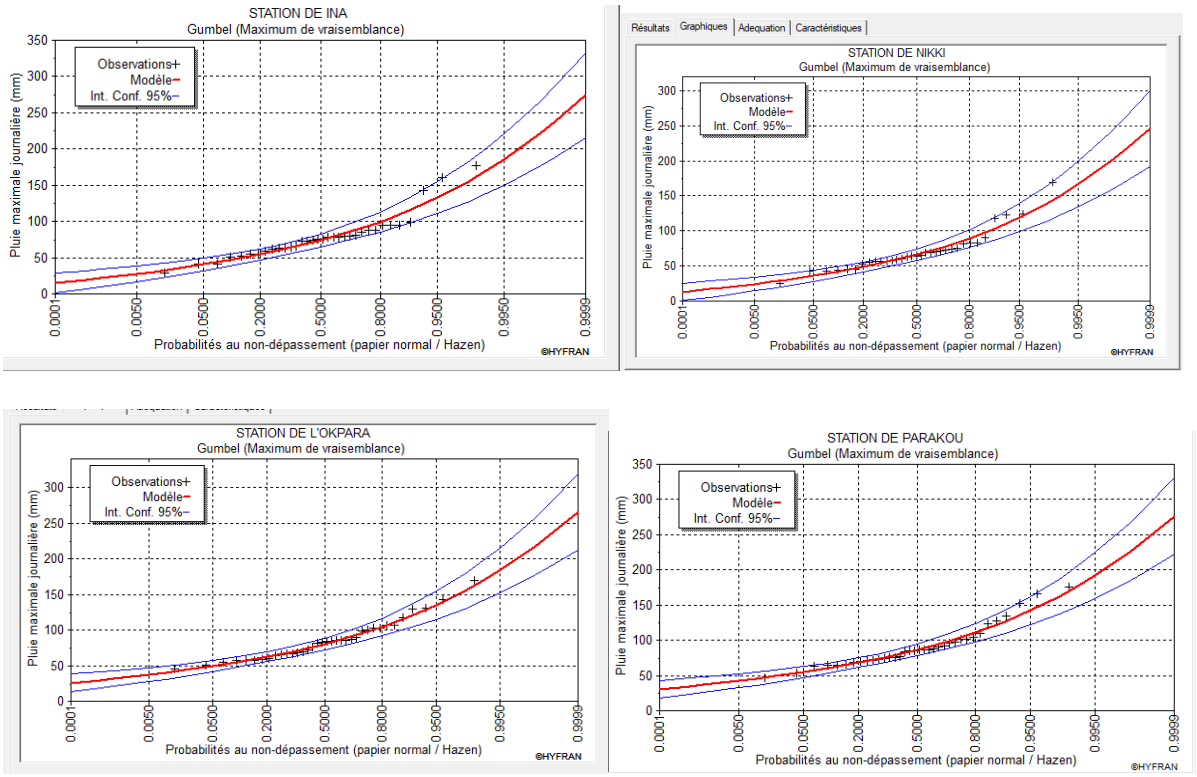


Figure 4 : Ajustement des quatre stations à la loi de Gumbel de 1985 à 2020

3.3.2. Ajustement des lois extrêmes aux Q95

Pour l'ajustement des Q95, la loi Pearson type III n'a pas marché car dans l'estimation des paramètres, le dérivé (dR/dM) est négatif.

L'analyse des graphes révèle que les Q95 suivent très bien la loi Log-Pearson type III pour cette station. Aussi, tous les points sont dans l'intervalle de confiance de 95% pour cette loi. On retient que les Q95 s'ajustent bien à la loi avec la même marge d'erreur.

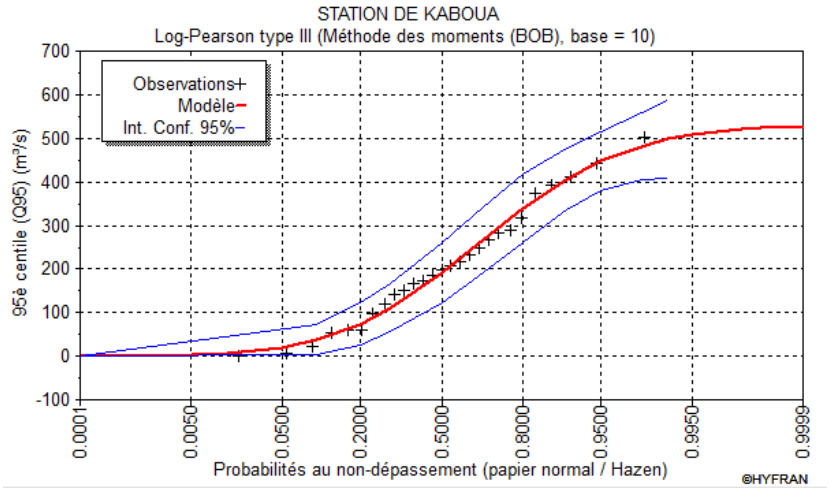


Figure 5 : Ajustement des lois extrêmes au Q95

3.3.3. Ajustement des séries pluies futures

A. Pour le modèle ECARTH

D'après les résultats de l'ajustement, les stations de Ina et Nikki s'adaptent à la loi de Gumbel alors que les stations de Parakou et Okpara s'adaptent au mieux à la loi Log-Pearson type III. Tous les points sont également dans l'intervalle de confiance de 95% pour cette loi.

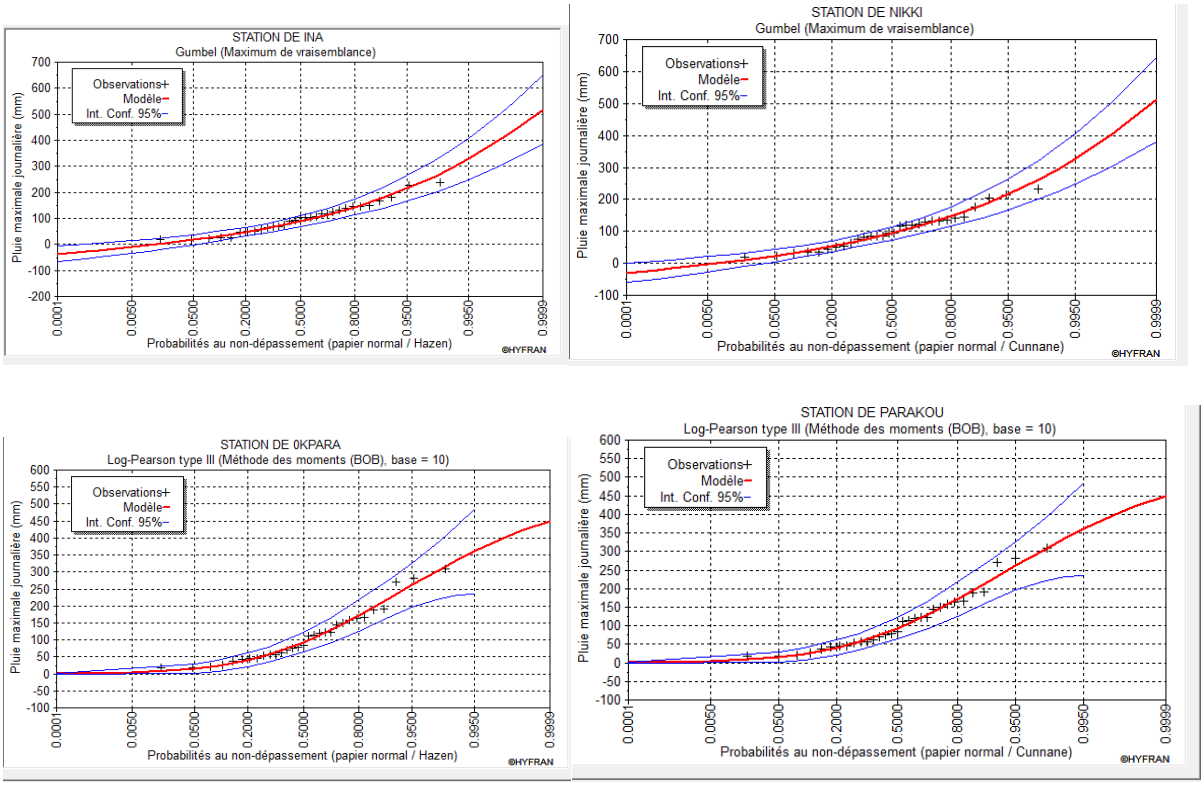
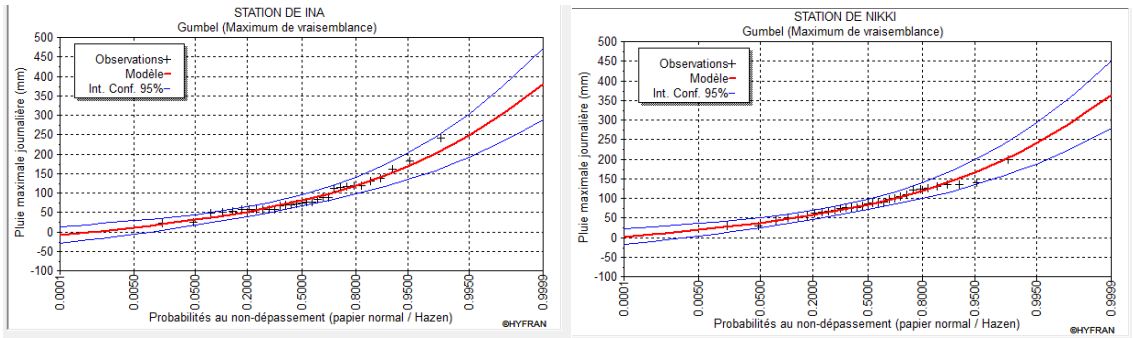


Figure 6 : Ajustement des lois aux données du modèle ECARTH de 2020 à 2050

B. Pour le modèle HADGEM2

Les résultats de l'analyse montrent que toutes les stations s'adaptent au mieux à la loi de Gumbel. De plus, tous les points sont dans l'intervalle de confiance de 95% pour cette loi.



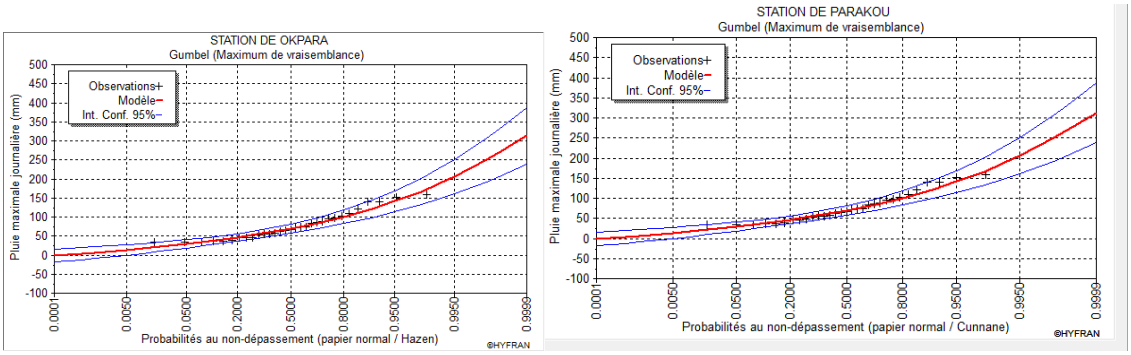


Figure 7 : Ajustement des lois au modèle HADGEM2 de 2020 à 2050

3.4. Choix de la loi de distribution

C. Pour les données d'observations

Pour le choix de la meilleure loi, 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 8 montre les différentes valeurs des critères.

Tableau 8 : Résultat des valeurs des paramètres BIC et AIC des données d'observations

Stations	Lois	Nombres de paramètres	BIC	AIC
Ina	Gumbel	2	325.321	322.268
	Log-normale	3	329.184	324.605
	Pearson type III	3	330.006	325.427
	Log- Pearson type III	3	329.382	324.803
Nikki	Gumbel	2	309.705	306.712
	Log-normale	3	313.615	309.125
	Pearson type III	3	314.692	310.202
	Log- Pearson type III	3	313.732	309.243
Okpara	Gumbel	2	339.961	336.794
	Log-normale	3	340.305	337.138
	Pearson type III	3	341.964	337.214
	Log- Pearson type III	3	343.857	339.107
Parakou	Gumbel	2	342.173	339.006
	Log-normale	3	345.415	340.664
	Pearson type III	3	345.981	341.230
	Log- Pearson type III	3	345.987	341.237

Kaboua	Gumbel	2	347.430	344.838
	Log-normale	3	368.444	365.852
	Log- Pearson type III	3	345.001	341.114

De l'analyse du tableau, il ressort que les valeurs de BIC et AIC sont faibles pour la loi Gumbel pour toutes les quatre stations des pluies alors que pour la station des observations des Q95 c'est la loi Log- Pearson type III. On en déduit que la loi de Gumbel s'ajuste mieux aux séries pluviométriques de ces stations tandis que la Log- Pearson type III s'ajuste mieux aux Q95. Donc le meilleur modèle pour les quatre stations pluviométriques est celui de Gumbel alors que pour les Q95 c'est la loi Log- Pearson type III.

D. Pour les données futures

Comme pour les données d'observations, le choix de la meilleure distribution s'est basé sur deux critères. 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.

Notons que la loi Pearson type III, n'a pas marché au niveau des stations de : Ina, Okpara et Parakou pour le premier modèle alors que pour le deuxième modèle, c'est au niveau des stations de l'Okpara et de Parakou que cette loi n'a pas marché.

Le tableau 9 montre les différentes valeurs des critères.

Tableau 9 : Résultat des valeurs des paramètres BIC et AIC des données futures

Stations	Lois	Nombres de paramètres	BIC	AIC
ECARTH				
Ina	Gumbel	2	343.272	340.404
	Log-normal	3	346.312	342.010
	Pearson type III	3		
	Log-Pearson type III	3	343.749	339.447
Nikki	Gumbel	2	331.023	328.220
	Log-normal	3	334.051	329.847
	Pearson type III	3	333.245	329.042
	Log-Pearson type III	3	332.0.37	327.833
Okpara	Gumbel	2	356.790	353.922
	Log-normal	3	357.363	353.061
	Pearson type III	3		
	Log-Pearson type III	3	356.350	352.048
Parakou	Gumbel	2	356.790	353.922
	Log-normal	3	357.363	353.061
	Pearson type III	3		
	Log-Pearson type III	3	356.350	352.048
HADGEM2				
	Gumbel	2	323.219	320.351

Ina	Log-normal	3	326.342	322.040
	Pearson type III	3	326.698	322.396
	Log-Pearson type III	3	326.486	322.184
Nikki	Gumbel	2	316.174	313.306
	Log-normal	3	319.088	314.786
	Pearson type III	3	319.004	314.702
	Log-Pearson type III	3	318.972	314.670
Okpara	Gumbel	2	310.821	307.953
	Log-normal	3	311.244	306.942
	Pearson type III	3		
	Log-Pearson type III	3	313.999	309.697
Parakou	Gumbel	2	310.736	307.868
	Log-normal	3	311.268	306.966
	Pearson type III	3		
	Log-Pearson type III	3	313.927	309.625

L'analyse de ce tableau révèle que pour le modèle ECARTH, les valeurs de BIC et AIC sont faibles pour la loi Gumbel pour toutes les stations à l'exception des stations de l'Okpara et Parakou où ces valeurs sont faibles pour la loi Log-Pearson type III ; tandis que pour le modèle HADGEM2, les valeurs de BIC et AIC sont faibles pour la loi Gumbel pour toutes les quatre stations.

On déduit que pour le modèle ECARTH, la loi de Gumbel et la loi Log-Pearson type III s'ajustent mieux, alors que pour le modèle HADGEM2 c'est la loi de Gumbel qui s'ajuste mieux.

3.5. Estimation des quantiles des séries hydroclimatiques extrêmes étudiées.

3.5.1. Pour les données d'observations

A partir de l'équation issue de l'ajustement de chaque loi, les quantiles ont été calculés pour différentes période de retour. Pour le calcul des quantiles, les périodes de retour retenues sont celles de 2 ans, 5 ans, 10 ans et 20 ans, 50ans et 100ans.

Le tableau 10 présente les valeurs des quantiles calculés pour les pluies maximales journalières et pour Q95. De son analyse, on remarque que l'évolution des quantiles est proportionnelle à celles des périodes de retour.

Au fur et à mesure que la période de retour augmente, les quantiles de pluie augmente également. En prenant l'exemple de la station de l'Okpara on remarque que, les quantiles de pluies maximales entre 91mm et 120mm et celle entre 120mm et 150mm, ont respectivement une période de retour de 5ans et 20ans.

Pour les faibles périodes de retour (2 ans, 5 ans et 10 ans), les minimums sont observés à la station de Ina tandis que les maximums sont enregistrés à la station de Parakou. Quant aux périodes de retour de 50 ans et 100 ans, les maximums des quantiles sont observés à la station de Parakou. Les minimums sont enregistrés à la station de Nikki.

C'est le même constat pour les Q95 aussi, plus la période de retour est grande, plus les quantiles pour les Q95 augmentent. On note également que les quantiles entre 262m3 /s et 418m3/s et entre 381m3/s et 514m3/s ont respectivement une période de retour de 5ans et 20ans.

Tableau 10 : Quantile estimé sur les stations étudiées

Période de Retour / Stations	Quantiles en (mm)					
	2ans	5ans	10ans	20ans	50ans	100ans
Loi de Gumbel Quantiles en (mm)						
Ina	74 65-83	99 86-110	120 99-130	130 110-150	150 130-180	170 140-200
Nikki	66 58-74	89 76-100	100 88-120	120 99-140	140 110-160	150 120-180
Okpara	80 72-88	100 91-120	120 100-140	130 120-150	150 130-180	170 140-200
Parakou	86 78-94	110 98-120	130 110-140	140 120-160	160 140-190	180 150-210
Loi Log- Pearson type III Quantiles en (m3/s)						
Kaboua	192 124-260	340 262-418	406 335-476	448 381-514	482 406-557	498 409-587

3.5.2. Pour les données futures

Nous avons retenu les mêmes périodes de retour à savoir : 2 ans, 5 ans, 10 ans et 20 ans, 50ans et 100ans.

Le tableau 11 présente les valeurs des quantiles calculés pour les données futures enregistrées par deux modèles. De son analyse, on note que :

Pour les deux modèles ECARTH et HADGEM2, l'évolution des quantiles est proportionnelle au période de retour c'est-à-dire au fur à mesure que le temp de retour augmente les quantiles augmente également. On retient aussi que pour le modèle ECARTH, les maximums sont enregistrés au niveau des stations de Okpara et Parakou contrairement au modèle HADGEM2 où les maximums sont enregistrés au niveau des stations de Ina et Nikki.

Tableau 11 : Quantiles estimés pour les données futures

Stations	Quantiles en (mm)					
	2ans	5ans	10ans	20ans	50ans	100ans
Le modèle ECARTH						
	Loi Gumbel					
Ina	89 69-110	140 110-170	180 140-220	220 170-260	260 200-320	290 220-360
Nikki	93 73-110	150 120-180	180 140-220	220 170-270	260 200-320	290 320-360
	Loi Log-Pearson type III					
Okpara	93 64-120	170 130-220	220 170-270	260 200-330	310 220-390	340 230-440
Parakou	93 64-120	170 130-220	220 170-270	260 200-330	310 220-390	340 230-440
Le modèle HADGEM2						
	Loi Gumbel					
Ina	80 66-94	120 97-140	140 120-170	170 130-200	200 160-240	220 170-270
Nikki	84 71-97	120 100-140	140 120-170	170 130-200	200 160-140	220 170-260
Okpara	70 58-81	100 83-120	120 99-140	140 110-170	170 130-200	190 150-230
Parakou	70 58-81	100 83-120	120 99-140	140 110-170	170 130-200	190 150-230

3.5.3. Présentation des variabilités

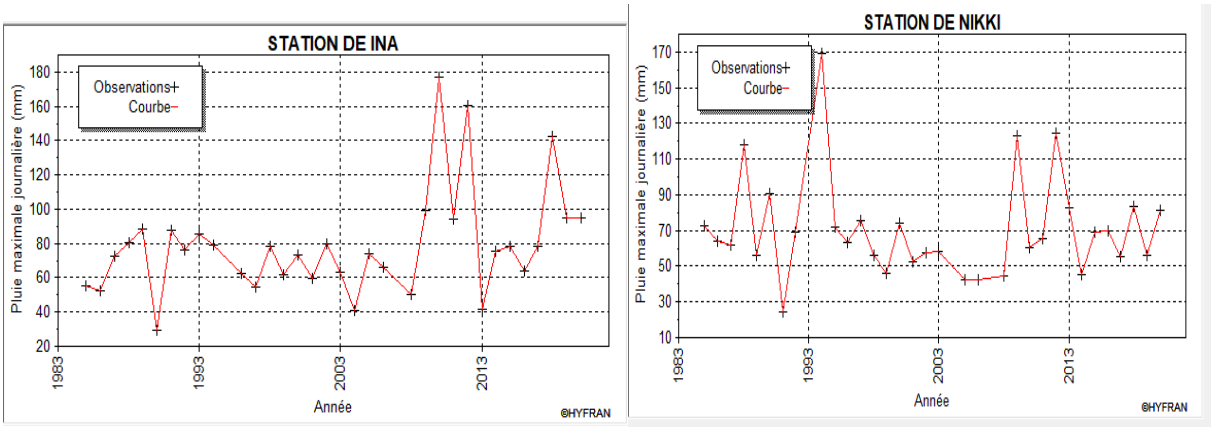
Ici, les pluies maximales journalières (PMJ) et les Q95 considérés sont celles capables d'entrainer une inondation.

E. Présentation de la variabilité des séries de pluies des stations étudiées

L'analyse de la figure 8 nous permet de révéler les variations au niveau des observations de chaque station. Ainsi, on note de cette analyse une forte variation des pluies maximales journalières au-dessus de la moyenne au niveau de :

- La station de Ina entre la période de 2009 à 2012 et entre 2018 à 2020 avec respectivement des valeurs de 94.3mm à 176.8mm et 94.6mm à 142.2mm. On note également trois (03) années de PMJ importantes : 2010 ; 2012 et 2018 avec une hauteur maximale de 176.8mm en 2010 ;
- La station de Nikki entre la période de 1988 à 1995 et entre 2009 à 2013 avec respectivement des valeurs de 24.6mm à 169.3mm et 60.3mm à124.5. On obtient donc trois années de PMJ : 1994,2009 et 2012avec un maximal de 169.3mm en 1994 ;
- La station de Okpara entre la période de 1985 à 1995 ; de 2004 à 2007 et de 2014 à 2020 avec respectivement des valeurs de 55.1mm à 168.8mm ; de 85.3mm à130.5mm et de 57mm à 143.3mm. Deux années de PMJ sont retenues : 1988 et 2019 avec comme maximum 168.8mm en 1988 ;
- La station de Parakou entre la période de 1987 à 1989 ; de 1994 à 2000 et de 2017 à 2018 avec respectivement les valeurs de 96.8mm à 134.9mm ; de 46.5mm à 165.5mm et de 91.9mm à 123.9mm. Trois années de PMJ sont observées : 1988, 1995 et 2000 avec le maximum de 165.5mm atteint en 1995.

De tout ce qui précède on retient que, toutes les stations (Ina, Nikki, Okpara et Parakou) de ce sous-bassin, ont une tendance pluviométrique à la baisse car plus de la moitié des années observées sont en dessous de la moyenne pluviométrique. Il y a donc une très forte variabilité de la pluviométrie dans le bassin.



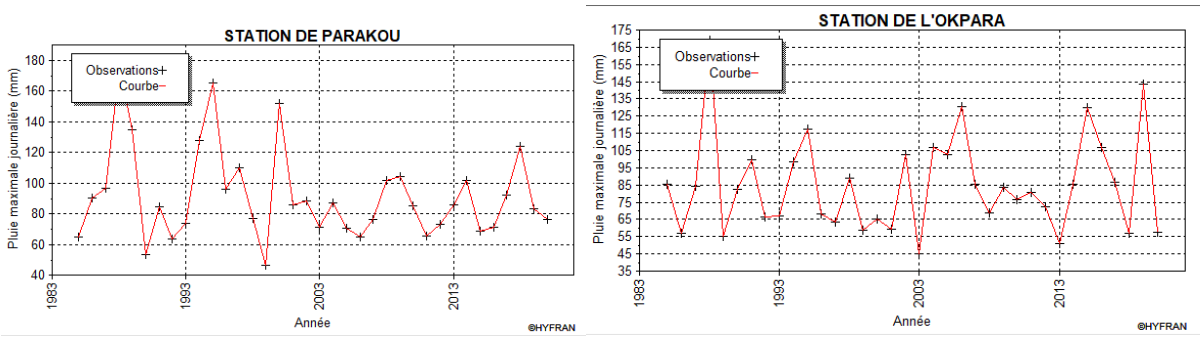


Figure 8 : Evolution des pluies maximales des stations

F. Variabilité des Q95

La figure suivante présente la variabilité des Q95 (95è centile). De l'analyse de cette figure, il ressort que les maximums des Q95 observés varient entre les périodes de : 1988 à 1995 avec une valeur de 215.955m3/s à 372.34m3/s ; de 2003 à 2004 avec 206.18m3/s à 501.6m3/s ; de 2007 à 2010 avec 233.275m3/s à 443.275m3/s et de 2016 à 2019 avec 99.2m3/s à 410.2m3/s. on constate alors une évolution en dents de scies des Q95 dans la période d'étude car par exemple de 432m3/s en 1988, ils ont chuté à 81.26m3/s en 1999 puis atteint 516.4m3/s en 2003 et ainsi de suite. Les Q95 les plus importants sont observés en 2003 et en 2010 avec un maximum de 516.4 m3/s en 2003.

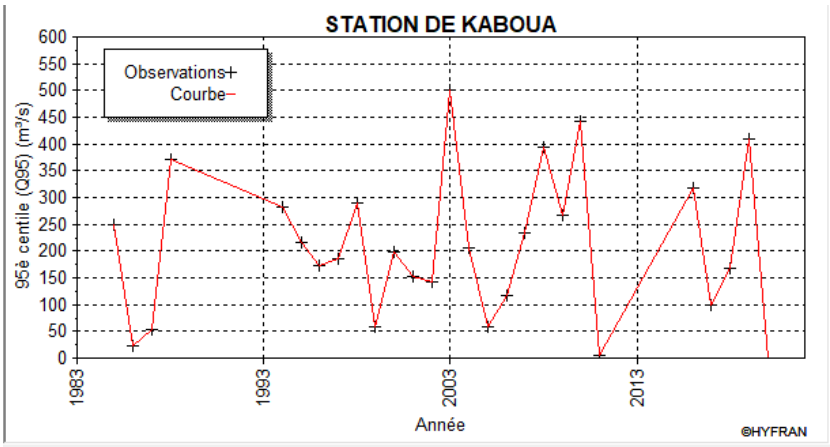


Figure 9: Variabilité des Q95

G. Présentation de variabilité des pluies futures

Les figures suivantes illustrent la variabilité des pluies futures enregistrée par les deux MCR

De l'analyse de la figure 10 qui présente la variabilité du ECARTH, on retient que les maximums de pluie journalière varient entre plusieurs années pour chaque station. Ainsi pour la station de :

- Ina, les pluies varient entre trois années : 2029, 2032 et 2039 avec respectivement des hauteurs de pluie de 236.38mm, 227.55mm et 182.09mm
- Nikki, les pluies maximales journalières varient entre trois années à savoir : 2021, 2029 et 2032 avec respectivement des hauteurs de : 205.16mm, 214.28mm et 233.4mm
- Okpara, les PMJ varient entre les années suivantes : 2032, 2039 et 2044 avec respectivement des hauteurs d'eau de 308.31mm, 270,33mm et 281.17mm
- Parakou, les variations sont les mêmes comme au niveau de la station de l'Okpara.

On retient alors que, toutes les stations de ce sous bassin ont une tendance pluviométrique à la hausse parce que plus de la moitié des années observées sont au-dessus de la moyenne pluviométrique.

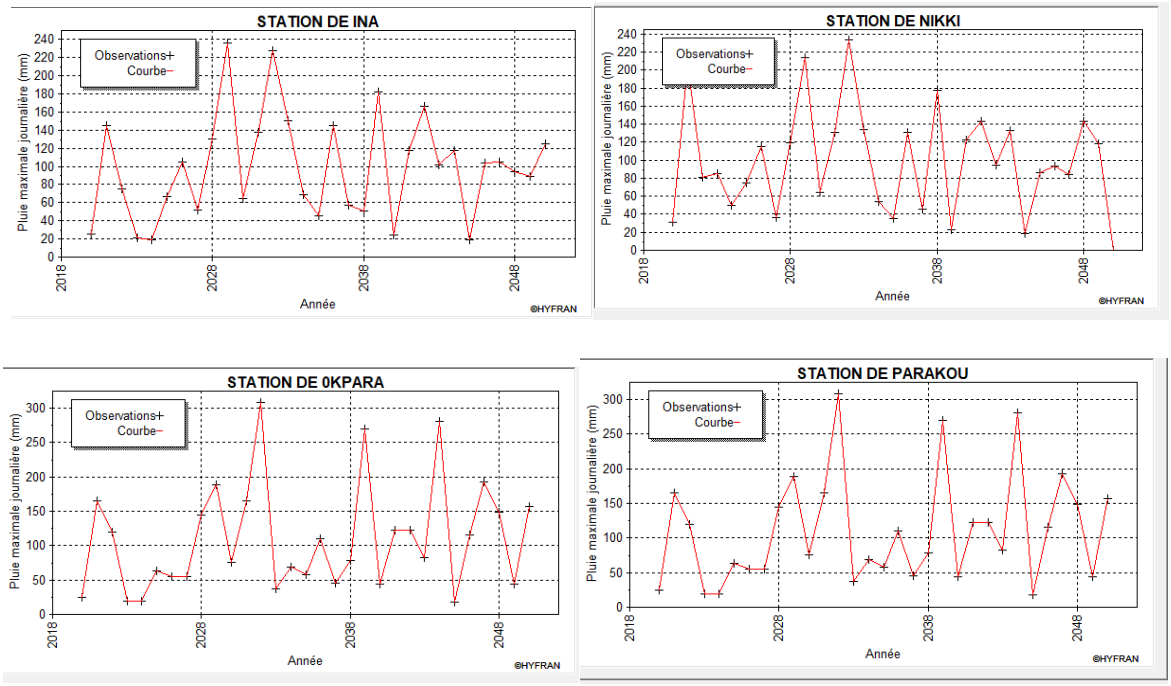


Figure 10 : Variabilité des pluies futures du modèle ECARTH

L'analyse de la figure 11 qui présente la variabilité du HADGEM2, révèle que les maximums de pluie journalière varient entre plusieurs périodes pour chaque station. Ainsi pour la station de :

- Ina, les PMJ varient entre les années 2021, 2033 et 2046 avec pour hauteur respective 240.31mm, 181.45mm et 161.53mm ;
- Nikki, les PMJ varient dans deux années : 2021 et 2029 avec des hauteurs de 198.62mm en 2021 et 140.01mm en 2029 ;

- Okpara, les variations sont en 2028 avec une hauteur de 139.44mm, en 2039 avec 140.97mm, en 2040 avec 151.08mm et en 2046 avec 159.36mm de hauteur d'eau ;
- Parakou, nous avons eu les mêmes variations qu'au niveau de la station de l'Okpara.

De tout ce qui précède on retient que, toutes les stations (Ina, Nikki, Okpara et Parakou) de ce sous bassin ont une tendance pluviométrique à la hausse car plus de la moitié des années observer sont au-dessus de la moyenne pluviométrique.

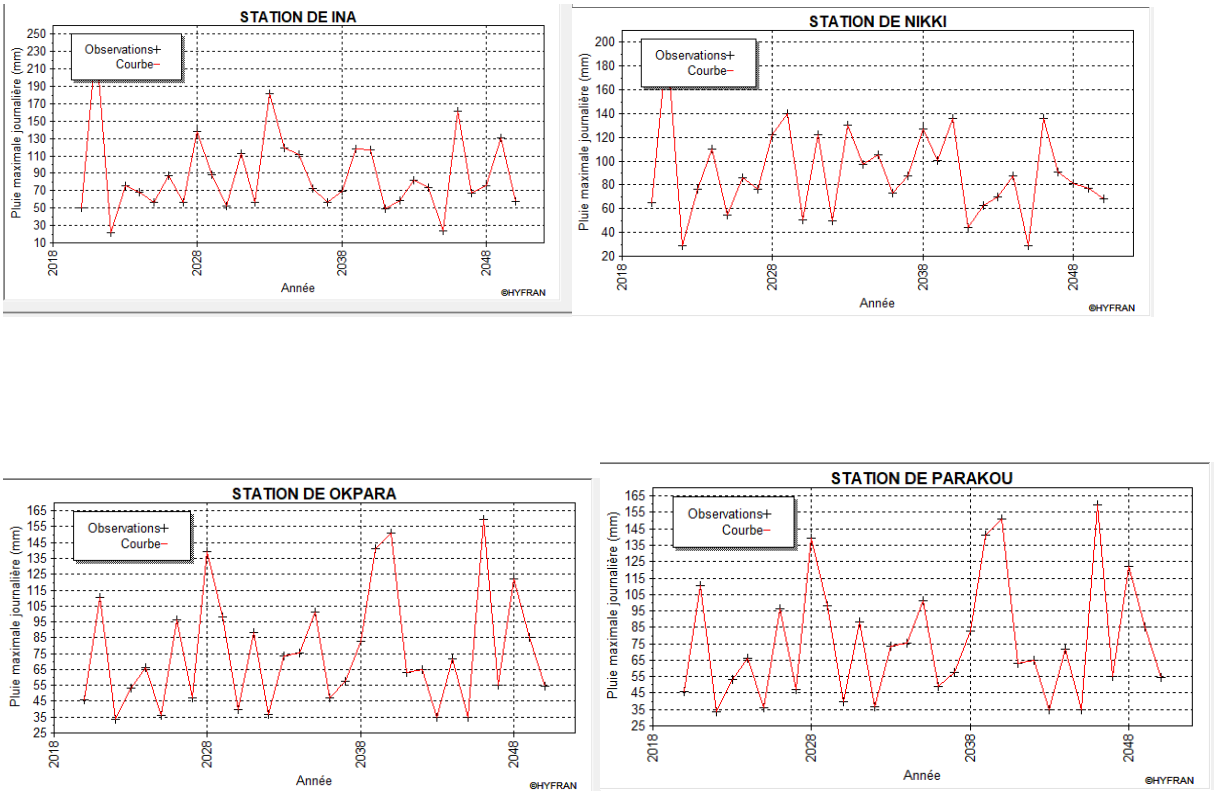


Figure 11 : Variabilité des pluies futures du modèle HADGEM2

3.6. Comparaison des variabilités actuelles et futures des PMJ

De l'ensemble des variations obtenues, nous remarquons que les données futures enregistrées par les deux MCR présentent plus de variabilité des PMJ importantes au niveau des stations que les données observées. En prenant l'exemple des stations de l'Okpara et de Parakou, nous avons quatre années de variations au niveau du modèle HADGEM2 (2028,2039,2040 et 2046) ; contrairement aux données d'observations où nous avons deux années à la station de l'Okpara (1988 et 2019) et trois années à la station de Parakou (1988,1995 et 2000). Aussi, au niveau des deux MCR nous avons une tendance pluviométrique à la hausse pour toutes les stations contrairement aux données d'observations où la tendance pluviométrique est à la baisse pour toutes les stations (Ina, Nikki, Okpara et Parakou).

De plus, les hauteurs d'eau enregistrés pour les données futures sont supérieures à celles enregistrés au niveau des données d'observations. En prenant l'exemple des deux stations précédentes (Okpara et Parakou), nous avons comme maximums 308.36mm au niveau des deux stations avec le modèle ECARTH alors que nous avons 168.8mm et 165.5mm respectivement au niveau des stations de l'Okpara et Parakou pour les données d'observations.

De tout ce qui précède on retient que les pluies futures seront non seulement plus variables mais aussi plus intense que les pluies actuelles d'ici 2050.

3.7. Discussions

L'évaluation de l'impact de la variabilité climatique sur les inondations dans le bassin versant de l'Okpara à Nano a été effectuée suivant l'analyse fréquentielle et une comparaison des données future et actuelle.

Ainsi, l'évaluation de la variabilité des pluies extrêmes des stations de l'étude a montré que les pluies extrêmes ont une faible variation au fil des années pour toutes les quatre stations (Ina, Nikki, Okpara et Parakou) et celles susceptibles d'inondation ne sont pas récurrentes ; ce qui entraine une tendance pluviométrique à la baisse pour ces stations. On peut dire que la zone d'étude a connu une faible variabilité des précipitations dans le temps. 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. Ce résultat est conforme avec les travaux de Kodja (2018).

Il ressort de l'analyse des pluies maximales journalières (PMJ) et des débits (Q95) de la période de 1985 à 2020, que les PMJ et Q95 susceptibles de créer des inondations ne sont pas récurrentes (2 à 4 années sur les 35ans) dans les différentes stations étudiées de notre milieu d'étude. Les crues en particulier ont une variation en dents de scies dans cette zone. Ce résultat est en conformité avec celui des travaux récents de Ogouwale et al (2021) effectués sur le même bassin versant de l'Okpara à Nano sur la période de 1961 à 2018.

Ensuite, d'après les comparaisons des pluies actuelles et futures effectuées, il ressort que les PMJ susceptibles d'engendrer les inondations ont une forte probabilité d'apparition sur le bassin versant de l'Okpara à Nano. Ce qui rend ce bassin versant plus vulnérable à la variabilité future des PMJ extrêmes. Ce résultat est en conformité avec celui des travaux effectués par Lawin et al. (2013). Cette zone serait vulnérable aux inondations pluviales dans le futur selon les travaux menés par Sintondji et al, (2019).

Au terme de ce chapitre, nous avons constaté que les pluies maximales journalières (PMJ) et les débits (Q95) de notre période d'étude varient de la même manière au fil des années au niveau de toutes les stations. Aussi, les PMJ futures sont plus récurrentes que les PMJ actuelles.

Conclusion générale et Perspectives

Conclusion

L'intérêt de ce travail est de chercher à comprendre l'impact de la variabilité des extrêmes hydroclimatiques sur les inondations dans le bassin versant de l'Okpara à Nano en étudiant les évènements passés et futures afin de mieux comprendre leurs évolutions futures.

Pour ce fait, nous avons effectué l'analyse fréquentielle sur les quatre (04) stations pluviométriques (Ina, Nikki, Okpara et Parakou) et la station hydrologique de Kaboua du milieu d'étude. Ainsi, nous avons appliqué les étapes fondamentales de l'analyse fréquentielle (déterminations des caractéristiques des séries ; vérification des tests d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité ; ajustement de quatre lois aux séries ; calcul du AIC et BIC ; choix de la meilleure loi puis estimation des quantiles des périodes de retour de 2ans, 5ans, 10ans, 20ans, 50ans et 100ans) à toutes ces stations à l'aide du logiciel HYFRAN puis la comparaison des variabilités actuelles et futures.

Au terme de ce travail, nous pouvons retenir que les pluies et les débits observés ont varié en fonction de l'année au niveau toutes les stations augmentant ainsi les risques d'inondations. Mais la variation des crues est en dents de scies. Après la comparaison des données futures et actuelles, nous avons retenus que le bassin versant étudier est plus vulnérable à la variabilité des pluies futures, car les pluies futures susceptibles de créer les inondations sont récurrentes.

Perspectives

Au vu de ces différents résultats, certaines dispositions idoines et pistes de recherche concrètes pour une meilleure connaissance des extrêmes hydroclimatiques de la zone d'étude, peuvent être proposées selon les lignes suivantes :

- ✓ Un suivi plus rigoureux dans la collecte des données hydroclimatiques principalement les données de pluies et de débits qui présentent un nombre non négligeable de lacunes ;
- ✓ La poursuite de cette étude pour tous les grands bassins d'une part et les sous-bassins du Bénin d'autre part avec de nouvelles séries temporelles plus étendues ;
- ✓ La modélisation pluie-débit dans certain grand bassin versant du Bénin.

Références bibliographiques

Agué, A. I., et Afouda, A. (2015). *Analyse fréquentielle et nouvelle cartographie des maxima annuels de pluies journalières au Bénin. Int. J. Biol. Chem. Sci, 9(1), 121–133.* https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v9i1.12

Agué, E. (2015). *Analyse fréquentielle des extrêmes pluviométriques dans la zone subéquatoriale du Bénin. Mémoire de Licence. Institut National de l'Eau/ Université d'Abomey-Calavi, Bénin*

Amoussou, E., Camberlin, P., Tramblay, Y., & Mahe, G. (2014). *Évolution des précipitations extrêmes dans le bassin versant du Mono (Bénin- Togo) en contexte de variabilité / changement climatique. (July). Retrieved from* www.researchgate.net/publication/281565491

B. V0LK0FF (octobre 1965) *: LES SOLS DE LAREGION DE PARAKOU (NORD-DAHOMEY). OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER. CENTRE DE COTONOU*

Bertrand, F & Maumy, M. (2008). *Choix du modèle. 1IRMA, Université Louis Pasteur*

Bois, P., & Obled, C. (2007). *Traitement de données en Hydrologie. ENSHMG Poly Version 22/01/2007,3p.*

Boko M., Kosmowski F., & Vissin E. W. (2012) *: Les enjeux du changement climatique au Bénin (Décembre 2015).* https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2825.4808

Decamps H. (2010). *Evénements climatiques extrêmes, réduire les vulnérabilités des systèmes écologiques et sociaux, Académies des sciences, 240 P*

Dègla Herve KOUMASSI, A. Eric TCHIBOZO, Expedit VISSIN et Christophe HOUSSOU. *Analyse fréquentielle des évènements hydro-pluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin. Afrique SCIENCE 10(2) (2014) 137 - 148 137 ISSN 1813-548X,* http://www.afriquescience.info

Dossou-Yovo, E. 2009. *Modélisation du fonctionnement hydrologique dans le bassin versant de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua dans un contexte de changement global : contribution à la gestion intégrée des ressources en eau. Thèse d'Ingénieur Agronome, Faculté des Sciences Agronomiques, Abomey-Calavi, Bénin. 106pp*

F. Métivier. *Hydrologie continentale. Notes de cours, problèmes et solutions, janvier 2010*

Filikibirou Tassou Zakari, Ibidon Firmin Akpo, Kassimou Issaka, Francis Oninkitan Agani, Jacob Afouda Yabi, (octobre 2022) *Typologie des systèmes de production de maïs (Zea mays L.) dans un contexte de changement climatique au Nord Bénin. Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture*

Gardes, L. (2017). *Théorie des valeurs extrêmes. Université de Strasbourg.*

Gildas Louis Djohy, Ange Honorat Edja. *Effet de la variabilité climatique sur les ressources en eau et stratégies d'adaptation des éleveurs et maraîchers au Nord-Bénin. Annales de l'Université de Parakou Série " Sciences Naturelles et Agronomie ", 2018, 8 (2), pp.83-91. Ffhal-02046892*

Habibi, B., Meddi, M., & Boucefiane, A. (2013). *Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales Cas du Bassin Chott-Chergui. Nature & Technologie, (08), 41 à 48.*

HLAOUI Z. et HENIA L. *: LES PLUIES QUI INONDENT DANS LE SAHARA TUNISIEN. Thessaloniki - Grèce 29 mai au 1 juin 2019*

HMIDI N., FEHRI N. et BACCAR A. *: INONDATION DEVASTATRICE DANS LA VILLE DE SOLIMAN (TUNISIE) : CAS DE SA ZONE INDUSTRIELLE LORS DE L'ÉVÉNEMENT PLUVIOMÉTRIQUE DU 22 SEPTEMBRE 2018. Thessaloniki - Grèce 29 mai au 1 juin 2019*

Hounkpè, J., Diekkrüger, B., Badou, D. F., & Afouda, A. A. (2015). *Non-Stationary Flood Frequency Analysis in the Ouémé River Basin, Benin Republic. 210–229.* *https://doi.org/10.3390/hydrology2040210*

Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE). Août 2016. *CAHIER DES VILLAGES ET QUARTIERS DE VILLE DU DEPARTEMENT DU BORGOU (RGPH-4, 2013). République du Benin.*

Jeanne Camirand et Christine Gingras | Dessins : Jeanne Camirand | Graphisme : Marie-Claude Chagno. *Projet Agriculture et climat : vers des fermes zéro carbone (www.naturequebec.org/alatonne), portant sur les changements climatiques, les GES et les pratiques de réduction des GES. Références disponibles en ligne : http://www.naturequebec.org/ressources/fichiers/Agriculture/fermes zerocarbone_2011/TXT11-03_refChangClimat.pdf © Nature Québec, mars 2011*

Kouassi A. M., 2011. *Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur le régimes pluviométriques saisonniers en afrique de l'Ouest.*

Kouassi, M. K., Ahoussi, K. E., Kouassi, K. L., Koffi, Y. B., & Biemi, J. (2018). *Estimation des quantiles de pluies extrêmes à différentes échelles de temps : comparaison des approches théoriques et pratiques. Actes de Conférence Sustain Eng 2018 "Science et Éco - Innovation Pour Une Gestion Durable Des Ressources Naturelles." Retrieved from* www.2ie-edu.org

Koumassi. CARACTERISATION SPATIALE DU RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN VERSANT DE LA VOLTA AU BENIN. Thessaloniki - Grèce 29 mai au 1 juin 2019

Lawin A. E., Akponikpè P. B. I., Jalloh A., Nelson C. G. and Thomas S. T. (2013). *In A Jalloh, G C. Nelson, T. S. Thomas, R. Zougmoré, and H. Roy-Macauley. In West African Agriculture and climate change: A Comprehensive Analysis. Chapter 3 : Benin. PP-448.*

M. Roche *Ingénieur Hydrologue à l'Electricité de France Chargé de la Direction des Études au Bureau Central Hydrologique de l'URSTOM Maitre de Conférences à l'Ecole Nationale du génie Rural : HYDROLOGIE DE SURFACE*

M.A. Akpo (1, 3*), A. Saïdou (1), I. Yabi (2), I. Balogoun (1) et L. B. Bio Bigou (3) *: Indicateurs paysans d'appréciation de la qualité des sols dans le bassin de l'Okpara au Bénin ; : janvier 2016. Étude et Gestion des Sols, Volume 23, 2016 - 53 à 64*

M.A. Akpo, A. Saïdou, I. Balogoun, I. Yabi, et L. B. Bio Bigou *: Evaluation De La Performance Des Pratiques De Gestion De La Fertilite Des Sols Dans Le Bassin De La Riviere Okpara Au Benin; November 2016. URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n33p370*

Madsen, M. R. (2013). *Towards a Sociology of International Courts. 1, 1–29.*

MENDONÇA F. et CASTELHANO F.*: LOCAL CLIMATE VARIABILITY: TREND ANALYSIS USING EXTREME INDICES IN CURITIBA, BRAZIL*

Ogouwale S., Séraphin C. A., & Luc O. C. Sintondji *: Déterminants hydro climatiques et disponibilités des ressources en eau superficielles dans le sous bassin versant l'Opkara à l'exutoire de Nano au Benin.Am.J. innov.res.appl.sci.2021 ;13(1) :1-13*

Ogouwale S., Séraphin C. A., & Luc O. C. Sintondji., (2022). *Etude de l'impact de la dynamique de l'occupation du sol sur les ressources naturelles dans le sous-bassin de l'Opkara*

à Nano au Nord Bénin European Scientific Journal, ESJ, 18 (17), 1. https://doi.org/10.19044/esj.2022.v18n17p1

Organisation Météorologique Mondiale (OMM). (2014). *Analyse des valeurs extrêmes. In Guide des pratiques hydrologiques : Hydrologie- De la mesure à l'information hydrologique (6e édition, Vol. 1, p. II.5-8). Genève.*

Ousmane, D. (1992*). Ajustement statistique à des échantillons de pluies et débits application aux données du bassin versant de la Faleme. Rapport de stage de DEA. Université Cheikh Anta Diop, Dakar*

Perreault, L., & Bobée, B. (1992). *Loi généralisée des valeurs extrêmes Propriétés mathématiques et statistiques Estimation des paramètres et des quantiles XT de période de retour T. Québec, Canada.*

R. Ababou et A. Al-Bitar. *INP/ENSEEIHT : Hydrologie statistique 2005-06*

Rapport d'évaluation des Besoins Post catastrophe *: INONDATION AU BENIN Préparé par le Gouvernement de la République du Benin avec l'appui de la Banque Mondiale et du système des Nations Unies Rapport Final Avril,2011*

Romaric OGOUWALE, Olivier KOUDAMILORO, Etienne AKAKPO, Expédit Wilfrid VISSIN et Jean-Marie *DIPAMA. STRATÉGIES D'ADAPTATION PAYSANNE AUX RISQUES HYDROCLIMATIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DU FLEUVE OUÉMÉ À BÉTÉROU AU BÉNIN, AFRIQUE DE L'OUEST. Rev. Ivoir. Sci. Technol., 35 (2020) 384 - 404 384 ISSN 1813-3290, http://www.revist.ci*

SINTONDJI L., BADOU F., AHOUANSOU M., HOUNKPE J., ASSOGBA BALLE R., GABA C., VISSIN E., 2019. *Etude de Vulnérabilité face aux changements climatiques du Secteur Ressources en Eau au Bénin. Report produced under the project "Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne", Climate Analytics gGmbH, Berlin.*

YAPI A.F., OGA Y.M.S., N'GUESSAN BI V.H., KPAN O.J.G. et BIEMI J. *: ANALYSE DES EXTRÊMES PLUVIOMÉTRIQUES PAR LA MÉTHODE DES INDICES CLIMATIQUES DANS LA RÉGION DE LA MARAHOUÉ (CENTRE OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE). Thessaloniki - Grèce 29 mai au 1 juin 2019*

Annexes

Tableau 12: Résultats du test de Khi Carré pour des différentes stations d'observations

Résultats / Stations	Résultats			
	X^2	P-value	Degré liberté	Nombre de classe
	Gumbel			
Ina	6.94	0.2251	5	8
Nikki	5.55	0.3530	5	8
Okpara	7.11	0.2125	5	8
Parakou	6.67	0.2466	5	8
Kaboua	Loi Log- Pearson type III			
	1.78	0.6198	3	7

Tableau 13 : Résultats de khi Carré pour les deux modèles

Modèle	**ECARTH.RCP4.5**				**HADGEM2.RCP4.5**			
Résultats / Stations	X^2	P-value	Degré liberté	Nombre de classe	X^2	P-value	Degré liberté	Nombre de classe
Gumbel					Gumbel			
Ina	2.65	0.6188	4	7	9.42	0.0514	4	7
Nikki	2.20	0.6990	4	7	1.74	0.7831	4	7
Log-Pearson type III								
Okpara	3.55	0.3145	3	7	1.29	0.8630	4	7
Parakou	3.55	0.3145	3	7	1.29	0.8630	4	7

Tableau 14 : Paramètre des lois retenues

Lois / Stations	Gumbel		
	U	A	
Ina	65.4087	22.6389	
Nikki	58.4679	20.4206	
Okpara	72.4569	20.9644	
Parakou	78.3601	21.4937	
Kaboua	Log- Pearson type III		
	A	L	M
	-2.76994	1.51996	2.71752