



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI
=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=====



**DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES
EN EAU**

Mémoire de fin de formation réalisé et présenté par
GNONLONFOUN SAGBO DIEUDONNE

Pour l'obtention du diplôme de
LICENCE Professionnelle en Hydrologie
OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

***VARIABILITE SPATIALE DES PLUIES
EXTRÊMES ET RISQUES D'INONDATION
DANS LE BASSIN VERSANT DE LA PENDJARI
À L'EXUTOIRE DE PORGA***

=====

Maître de Mémoire

Dr. Ir. D. Mathieu Maurice AHOUANSOU

Maître de Stage

M. Wilfried BOGNON



ANNEE ACADEMIQUE : 2023-2024



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI
=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=====



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES
EN EAU

Mémoire de fin de formation réalisé et présenté par
GNONLONFOUN SAGBO DIEUDONNE

Pour l'obtention du diplôme de
LICENCE Professionnelle en Hydrologie
OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

=====

***VARIABILITE SPATIALE DES PLUIES
EXTRÊMES ET RISQUES D'INONDATION
DANS LE BASSIN VERSANT DE LA PENDJARI
À L'EXUTOIRE DE PORGA***

=====

MENTION : TRES BIEN

MENBRES DU JURY	EMARGEMENT
Ir. D. Mathieu Maurice AHOUANSOU	
Dr. N'TCHA M'PO	
Dr. BONGOU Ernesto	

ANNEE ACADEMIQUE : 2023-2024

DEDICACE

Je dédie ce mémoire, en témoignage de mon profond amour, à mon feu père M. Koffi GNONLONFOUN et ma mère, Mme SAIZONOU Isabelle qui a consenti à de nombreux sacrifices pour assurer notre éducation, à mes frères, mes sœurs et moi. Que Dieu te bénisse mère.

REMERCIEMENTS

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. La réalisation de ce mémoire a été possible grâce à la contribution de certaines personnes et institutions. En signe de gratitude, nous adressons de manière spéciale :

- Au Dr. Ir. D. M. Maurice AHOUANSON, 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 ;
- À mon maître de stage M. Wilfried BOGNON, Ingénieur et Hydro-barragiste à SETEM-BENIN pour ses précieux conseils et le temps consacré pour mon encadrement ;
- À M. Vincent ATEGUI l'Administrateur délégué de SETEM-BENIN pour m'avoir accepté dans son établissement pour 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 pour leur aide lors de ma rédaction en occurrence : Fructueux EHOUINSOU et Samilou SALIFOU ;
- À tous mes camarades de promotion pour l'ambiance et l'entraide qui ont régné tout au long de notre formation, bonne suite à tous ;
- À tous mes camarades de promotion qui m'ont apporté leur aide au cours de ma rédaction surtout : Hermionne BOKOSSA, Fabrice AGADJI et Ziadi DJINADOU ;
- À toute la famille GNONLONFOUN de Porto et à mes proches pour leur soutien constant en occurrence : Mr Dossou MITCHODIGNI et Mme Solange SAIZONOU ;
- À tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce document, qu'ils trouvent ici toute ma gratitude.

RÉSUMÉ

Les populations ouest-africaines sont de plus en plus exposées à des épisodes pluviométriques intenses qui provoquent des inondations dévastatrices. La présente étude a pour but de comprendre l'évolution spatiale des pluies extrêmes et leurs conséquences sur les risques d'inondations dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga. Pour y parvenir, les données pluviométriques des stations (Banikoara, Boukoumbé, Dassari, Kérou, Kouandé, Natitingou et Tanguiéta) ont été collectées à Météo-Bénin toutes sur une période de 1978 à 2023. Ensuite, nous avons eu les données futures du modèle HADGEM2 de la période de 2023 à 2060. Notre étude a combiné une analyse fréquentielle (utilisant les lois Log-normale, Gumbel, GEV et Log-Pearson type III), une analyse spatiale par krigeage et une comparaison des moyennes des PMJ avec les seuils d'alerte d'inondation à la station de N'Dali pour évaluer les risques d'inondation puis la comparaison de la variabilité et du risque d'inondation des pluies futures et actuelles. Nos résultats sur la répartition spatiale présentent un gradient décroissant des pluies extrêmes du sud vers nord du bassin, les précipitations les plus intenses sont concentrées dans la partie ouest du bassin, tandis qu'une variabilité importante caractérise les séries temporelles de chaque station. De plus, les zones d'influence des stations les plus pluvieuses sont exposées à un risque d'inondation élevé. Les résultats des comparaisons ont aussi permis de noter que non seulement les pluies extrêmes ont une forte probabilité d'apparition dans le futur, mais aussi le bassin versant sera plus vulnérable au risque d'inondation dans le futur.

Mots clés : pluies extrêmes, Inondation, Analyse fréquentielle, analyse spatiale, bassin versant de la Pendjari à Porga, seuil d'alerte

ABSTRACT

West African populations are increasingly exposed to intense rainfall events that cause devastating floods. The aim of this study is to understand the spatial evolution of extreme rainfall and their consequences on flood risks in the Pendjari watershed at the Porga outlet. To achieve this, rainfall data from stations (Banikoara, Boukoumbé, Dassari, Kérou, Kouandé, Natitingou and Tanguiéta) were collected at Météo-Bénin all over a period of 1978 to 2023. Then, we had the future data through the HADGEM2 model from the period from 2023 to 2060. Our study combined a frequency analysis (using the Log-normal, Gumbel, GEV and Log-Pearson type III laws), a spatial analysis by kriging and a comparison of the PMJ means with the flood alert thresholds at the N'Dali station to assess the flood risks and then the comparison of the variability and flood risk of future and current rainfall. Our results on the spatial distribution present a decreasing gradient of extreme rainfall from the south to the north of the basin. The most intense rainfall is concentrated in the western part of the basin, while significant variability characterizes the time series of each station. In addition, the influence zones of the rainiest stations are exposed to a high flood risk. The results of the comparisons also noted that not only do extreme rainfall events have a high probability of occurring in the future, but also the watershed will be more vulnerable to the risk of flooding in the future.

Keywords : extreme rainfall, flood, frequency analysis, spatial analysis, Pendjari watershed in Porga, alert threshold

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte de la situation géographique du bassin versant de Pendjari	12
Figure 2 : Carte du relief du bassin versant de la Pendjari	13
Figure 3 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de Pendjari	15
Figure 4 : Carte pédologique du bassin versant de Pendjari	16
Figure 5 : Etape fondamentale de l'analyse	18
Figure 6: Ajustement des trois stations à la loi de Gumbel	32
Figure 7 : Ajustement de la station à la loi de Log-Normal et de la station à la loi de GEV	33
Figure 8 : Ajustement des stations à la loi de Log- Pearson type III.....	33
Figure 9 : Ajustement des sept stations à la loi de GEV du modèle HADGEM2	34
Figure 10 : Ajustement des sept stations à la loi de Gumbel du modèle HADGEM2.....	34
Figure 11 : Evolution des pluies maximales des stations.....	41
Figure 12 : Variabilité des pluies futures du modèle HADGEM2	43
Figure 13 : Spatialisation des valeurs maximales des PMJ	44
Figure 14 : Spatialisation des valeurs moyennes des PMJ	45
Figure 15 : Spatialisation des valeurs maximales des PMJ	46
Figure 16 : Spatialisation des valeurs moyennes des PMJ	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Stations utilisées	17
Tableau 2 : Stations et données utilisées pour la spatialisation des données observées	25
Tableau 3 : Stations et données utilisées pour la spatialisation des données Futures ...	25
Tableau 4: Statistiques des stations étudiées	28
Tableau 5 : Statistiques des données manquantes	28
Tableau 6 : Résultat du test de Wald-Wolfwitz.....	29
Tableau 7 : Résultat du test de Mann-Kendalll	30
Tableau 8 : Résultat du test de Wilcoxon	30
Tableau 9 : Résultats des tests effectués du modèle utilisé	31
Tableau 10 : Résultat des valeurs des paramètres BIC et AIC des données d'observations.....	35
Tableau 11 : Résultat des valeurs des paramètres BIC et AIC des données futures.....	36
Tableau 12 : Quantiles estimés sur les stations étudiées	38
Tableau 13 : Quantiles estimés pour les données futures	39
Tableau 14 : Résultats de l'analyse sur la variation des PMJ des données d'observations	40
Tableau 15 : Résultats de l'analyse sur la variation des PMJ des données futures.....	42
Tableau 16: Niveaux d'alertes de chaque station des données pluies observées.....	48
Tableau 17 : Niveaux d'alertes de chaque station des données de pluies futures.....	49

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

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

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

BV : Bassin Versant

DWD : Deutscher Wetterdienst

ESGF : Earth System Grid Federation

FSA : Faculté des Sciences en Agronomie

HYFRAN : HYdrological FREquency Analysis

INE : Institut National de l'Eau

MCG : Modèle Climatique Global

MCR : Modèle Climatique Régional

MNT : Modèle Numérique de Terrain

PMJ : Pluie Maximale Journalière

UAC : Université d'Abomey-Calavi

SAP : Système d'Alerte Précoce

SETEM : Service des Etudes, Travaux, Équipement et Maintenance du Bénin

Table des matières

DEDICACE.....	II
REMERCIEMENTS	III
RÉSUME.....	IV
ABSTRACT	V
LISTE DES FIGURES.....	VI
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	VIII
TABLE DES MATIERES.....	IX
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GENERALE.....	1
1.1. CONTEXTE ET JUSTIFICATION	2
1.2. REVUE DE LITTERATURE.....	4
1.2.1. CLARIFICATION CONCEPTUELLE	4
1.2.2. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	6
1.3. BUT DE LA RECHERCHE.....	8
1.4. QUESTIONS DE RECHERCHES.....	8
1.5. OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	9
1.5.1. OBJECTIF GENERAL.....	9
1.5.2. OBJECTIFS SPECIFIQUES	9
1.6. HYPOTHESES DE TRAVAIL.....	9
1.7. ORGANISATION DU MEMOIRE	9
CHAPITRE 2 : DONNEES, MATERIELS ET METHODES.....	10
2.1. MILIEU D'ETUDE	11
2.1.1. PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE LA PENDJARI.....	11

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

2.1.2.	PRESENTATION : CLIMAT, VEGETATION, RELIEF	12
2.1.3.	HYDROGRAPHIE.....	14
2.1.4.	OCCUPATION DES SOLS ET ACTIVITES SOCIO-ECONOMIQUES	15
2.1.5.	SOLS.....	16
2.2.	METHODOLOGIE	16
2.2.1.	DONNEES UTILISEES.....	16
2.2.2.	MATERIEL UTILISE	17
2.2.3.	METHODES.....	18
2.2.4.	COLLECTE DES DONNEES	18
2.2.5.	CONTROLE DE LA QUALITE DES DONNEES	18
2.2.6.	PRESENTATION DES CARACTERISTIQUES DES EXTREMES.....	19
2.2.7.	AJUSTEMENT DE QUATRE (04) LOIS AUX VALEURS EXTREMES ET CHOIX DE LA MEILLEURE LOI.....	19
2.2.7.1.	LES HYPOTHESES DE BASE	19
2.2.7.2.	LOI DES VALEURS EXTREMES.....	21
2.2.7.3.	CHOIX DE LA MEILLEURE DISTRIBUTION	22
2.2.8.	PARAMETRE DES LOIS CHOISIS	23
2.2.9.	LES QUANTILES.....	24
2.3.	SPATIALISATION DES PLUIES EXTREMES SUR LE BASSIN VERSANT	24
2.4.	CARACTERISATION DU RISQUE D'INONDATION.....	25
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS		27
3.1.	ETUDE STATISTIQUE DE BASE DES DONNEES.....	28
3.1.1.	CARACTERISATION DES EXTREMES PLUVIOMETRIQUES DANS LA ZONE D'ETUDE.....	28
3.2.	TESTS D'HYPOTHESES.....	29
3.2.1.	VERIFICATION DES TROIS TESTS POUR LES PLUIES EXTREMES	29

3.2.2.	VERIFICATION DES TESTS POUR LES DONNEES FUTURES	31
3.3.	AJUSTEMENT DES LOIS EXTREMES AUX SERIES DE DONNEES PLUVIOMETRIQUES	32
3.3.1.	AJUSTEMENT DES LOIS EXTREMES AUX SERIES PLUVIOMETRIQUES	32
3.3.2.	AJUSTEMENT DES SERIES PLUIES FUTURES	33
3.4.	CHOIX DE LA LOI DE DISTRIBUTION	34
A.	POUR LES DONNEES D'OBSERVATIONS	34
B.	POUR LES DONNEES FUTURES.....	36
3.5.	ESTIMATION DES QUANTILES DES SERIES PLUIES EXTREMES ETUDIEES.	37
3.5.1.	POUR LES DONNEES D'OBSERVATIONS	37
3.5.2.	POUR LES DONNEES FUTURES.....	38
3.5.3.	PRESENTATION DES VARIABILITES.....	39
C.	PRESENTATION DE LA VARIABILITE DES SERIES DE PLUIES DES STATIONS ETUDIEES	39
D.	PRESENTATION DE VARIABILITE DES PLUIES FUTURES.....	41
3.6.	SPATIALISATION DES SERIES DE DONNEES	43
3.6.1.	REPARTITION SPATIALE DES SERIES DE DONNEES DE PLUIES D'OBSERVATIONS	44
E.	POUR LES MAXIMAS DE PMJ.....	44
3.6.2.	REPARTITION SPATIALE DES SERIES DE DONNEES DE PLUIES FUTURES.....	46
F.	POUR LES MAXIMAS DE PMJ.....	46
G.	POUR LES MYENNES DES PMJ.....	47
3.7.	EVALUATION DU RISQUE D'INONDATION	48
H.	DETERMINATION DU NIVEAU D'ALERTE DES SERIES DE PLUIES DES STATIONS ETUDIEES	48
I.	DETERMINATION DU NIVEAU D'ALERTE DES SERIES DE PLUIES FUTURES	48
3.8.	COMPARAISON DES VARIABILITES ACTUELLES ET FUTURES DES PMJ	49

3.9. DISCUSSION	51
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	53
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	55
ANNEXE.....	59
ANNEXE 1 : RESULTATS DU TEST DE KHI CARRE POUR DES DIFFERENTES STATIONS D'OBSERVATIONS	59
ANNEXE 2 : RESULTATS DE KHI CARRE POUR LE MODELE ECARTH	59
ANNEXE 3 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALLL POUR LES DONNEES D'OBSERVATIONS	60
ANNEXE 4 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALLL POUR LES DONNEES FUTURES	60

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GENERALE

1.1. Contexte et justification

L'Afrique de l'Ouest est l'une des régions du monde les plus vulnérables aux variabilités climatiques. Depuis quelques décennies, l'effet des variations climatiques sur les systèmes naturels et humains s'observe sur tous les continents et les océans ce qui entraîne des événements extrêmes. Ces phénomènes extrêmes sont de plus en plus fréquents depuis la fin des années 1960 (Houghton et al., 2001 ; Gachon et al., 2007), et plusieurs d'entre eux ont causé d'importants dégâts au cours des dernières années (Ozer et al., 2003 ; Sene et Ozer, 2002). Les pluies extrêmes sur un bassin versant peuvent être provoquées par diverses situations météorologiques, notamment des orages, des dépressions, des fronts chauds et froids. Au Maroc, le risque des extrêmes pluviométriques ne montre pas de tendance généralisée vers l'augmentation (Filahi et al., 2015). Cependant, toujours au Maroc l'intensité de ce risque n'a cessé d'augmenter au cours du début du 21ème siècle et ces pluies extrêmes surviennent après une période de sécheresse, persistante depuis le milieu des années 70 (Sebbar et al., 2011 ; Hanchane, 2010). Les variations climatiques entraînent l'augmentation de la fréquence des événements hydroclimatiques extrêmes (Koumassi et al., 2014). Un des principaux facteurs expliquant les inondations est les précipitations extrêmes. 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). En 2010, plus de 178 millions de personnes ont été touchées par les inondations et les pertes économiques excèdent 40 milliards de dollars américains (Jha et collab., 2012). Du point de vue de Jalbert (2015), en zone urbaine, les inondations sont la plupart du temps causées par des événements de précipitations dont l'intensité dépasse la capacité de drainage des réseaux d'évacuation des eaux pluviales. Selon Hmidi et al, (2019), plusieurs villes et localités tunisiennes de la péninsule du Cap Bon, la ville de Soliman a été touchées par de graves inondations survenues le 22 septembre 2018 ; des dégâts très importants ont été enregistrés en particulier dans la zone industrielle. Les inondations constituent le risque naturel prédominant dans le monde et les dégâts qu'elles causent sont les plus importants parmi les catastrophes naturelles.

En effet, le Benin un pays de l'Afrique de l'Ouest a connu une grave inondation en 2010 comme d'autre pays de la sous-région. Les inondations ont touché environ 600 000

personnes, environ 200 000 ont dû fuir leurs foyers et environ 100 000 ont perdu leurs maisons. Les pertes économiques ont été évaluées à environ 200 millions de dollars. Elles ont endommagé ou détruit des infrastructures essentielles telles que des routes, des ponts, des écoles et des hôpitaux. Elles ont également endommagé ou détruit des récoltes agricoles, entraînant des pénuries alimentaires et des problèmes de sécurité alimentaire. (Salifou, 2022) Cependant, pour parvenir à comprendre ce problème de variabilité des pluies extrêmes et risques d'inondation plusieurs recherches ont été faites sur cette étude. Koumassi et al (2014) ont montré que les zones à très fort risque sont situées aux abords immédiats des cours d'eau et occupent 16 % du bassin versant de la Sota, l'étude a été fait en combinant par codification des cartes de vulnérabilité et des aléas aux inondations des données satellitaires et d'un MNT pour la cartographie des zones à risque d'inondation dans le bassin. Pour comprendre le comportement de l'impact de la variabilité climatique sur les inondations dans le bassin versant de l'Okpara à Nano, Salifou (2023) a effectué une l'analyse fréquentielle et une comparaison des données future et actuelle et l'étude a montré que les pluies extrêmes ont une faible variation au fil des années pour toutes les stations (Ina, Nikki, Okpara et Parakou) utilisée pour l'étude. Des études ont été aussi menées dans le bassin de la Pendjari. Le bassin versant de la Volta, qui traverse les pays de l'Afrique de l'Ouest dont le Bénin est l'une des pays dont la variabilité spatiale des pluies extrêmes et les risques d'inondation revêtent une importance particulière en raison des caractéristiques géographiques et climatiques uniques de la région. Au regard de la variabilité spatiale des extrêmes climatiques dans le bassin de la Pendjari, Djossou, Kodja et Vissin (2020), ressortent que, la zone d'étude est plus exposée à l'augmentation des températures et à une diminution des précipitations. Ouassa, Ogouwalé et Koudamiloro (2021) ont utilisées des méthodes statistiques, l'analyse fréquentielle et le calcul des indices de sécheresse pour caractériser les risques hydroclimatiques dans le bassin béninois de la Pendjari à l'exutoire de Porga. Leur travail a montré que pour l'ensemble de la série 1965-2017, il y a eu une année (1968) d'humidité extrême et deux années (1978, 2015) de sécheresse extrême ce qui favorise l'existence de risques hydroclimatique dans le bassin béninois de la Pendjari à Porga. Les inondations causées par les pluies extrêmes peuvent avoir des dommages importants aux infrastructures, aux cultures et aux biens des populations locale, conduisant les plus vulnérables à la famine et à des conséquences néfastes telles que : le ralentissement des activités socio-économiques et la destruction des habitats. Le bassin de la Pendjari est exposé aux effets

des événements hydroclimatiques extrêmes qui affectent négativement les activités des populations (Ouassa, Ogouwalé et Koudamiloro, 2021). Pour compléter les travaux de ces chercheurs et scientifiques, notre travail sera basé sur la compréhension de la variabilité des pluies extrêmes dans l'espace et comment ces variations affectent les risques d'inondations dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga ; d'où le thème : VARIABILITE SPATIALE DES PLUIES EXTREMES ET RISQUES D'INONDATION DANS LE BASSIN VERSANT DE LA PENDJARI À L'EXUTOIRE DE PORGA. Notre travail porte donc sur l'analyse de la variation des données de pluies de quarante-trois (43) années, allant de 1978 à 2023 (selon la disponibilité des données), du bassin versant de la Pendjari, et a pour but, d'identifier les zones les plus vulnérables aux inondations, et à fournir des informations essentielles pour la gestion des ressources hydriques et la prévention des catastrophes naturelles dans cette région.

1.2. Revue de littérature

1.2.1. Clarification conceptuelle

- **Variabilité spatiale** : La variation d'un phénomène à travers un espace donné. Dans ce contexte, il s'agit de la variation des précipitations extrêmes d'un endroit à l'autre dans un bassin versant.
- **Analyse fréquentielle** : aussi appelée analyse de fréquences, est une méthode statistique utilisée dans divers domaines, notamment la cryptanalyse, la linguistique et l'hydrologie. Elle consiste à examiner la fréquence d'apparition de certains éléments, 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). En hydrologie, l'analyse fréquentielle est utilisée pour étudier les précipitations et les crues. Elle peut être utilisée pour estimer la probabilité d'occurrence d'événements hydrologiques extrêmes, tels que des inondations ou des sécheresses. 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).

- **Inondation** : est Submersion rapide ou lente, d'une zone habituellement hors d'eau. C'est-à-dire que l'eau déborde de son lit normal (rivière, lac, etc.) et envahit les terres environnantes. Ce phénomène peut être causé par divers facteurs, tels que : crues des cours d'eau, surges marines, rupture de digues et pluies intenses (Patrice M. et Corinne L., 2008).
- **Pluies extrêmes** : Ce sont des événements météorologiques caractérisés par une intensité de précipitation particulièrement élevée sur une courte durée. Ces épisodes de fortes pluies peuvent entraîner des inondations rapides, des glissements de terrain et d'autres catastrophes naturelles. Elles peuvent causer des inondations, des glissements de terrain et d'autres dommages.
- **Risques d'inondation** : C'est la probabilité qu'une inondation se produise dans un lieu donné et les conséquences potentielles de cet événement sur les personnes, les biens et l'environnement. Le risque d'inondation est la rencontre entre un phénomène naturel (l'eau qui déborde) et ce qui peut être endommagé par ce phénomène (les maisons, les infrastructures, etc.).
- **Tendance** ce mot est souvent utilisé pour décrire des changements ou des évolutions en cours. C'est une variation graduelle dans les propriétés d'une variable aléatoire.
- **La période de retour**, ou **temps de retour**, est la durée moyenne au cours de laquelle, statistiquement, un événement d'une même intensité se reproduit. Elle est considérée comme étant l'intervalle de temps qu'il faudra pour que le degré entre deux événements atteigne ou dépasse un certain seuil. C'est également l'inverse de la fréquence d'apparition de l'évènement (la fréquence d'apparition noté $F(x)$ dépend de la loi a utilisée). La période de retour T d'un débit QT , correspond à l'inverse de la probabilité de dépassement de cet événement (F. Métivier, 2010). Soit : $T = \frac{1}{1-F(x)}$
- **Quantile de pluie** : c'est une valeur qui divise une série de données de précipitations en Q groupes de taille égale. C'est la hauteur de pluie qui correspondent à des valeurs de probabilité ou de période de retour donnée. Autrement dit, pour un quantile Q donné, on classe les valeurs de précipitations de la plus petite à la plus grande, et on détermine la valeur telle que $Q\%$ des données lui sont inférieures ou égales, et les $(100 - Q) \%$ restantes lui sont supérieures.
- **Le réseau hydrographique** est l'ensemble des cours d'eau (rivières, ruisseaux), des lacs, des zones humides et de tous les milieux aquatiques qui s'interpénètrent sur un

territoire donné. Il comprend tous les éléments qui contribuent à l'écoulement de l'eau, depuis les plus petits ruisseaux jusqu'aux plus grands fleuves.

- **Les lois de valeurs extrêmes, aussi appelées lois des valeurs extrémales**, sont un ensemble de lois de probabilité qui permettent de modéliser les événements extrêmes, c'est-à-dire les événements qui se produisent rarement mais qui peuvent avoir des conséquences importantes. 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). Ces lois sont utilisées dans de nombreux domaines, notamment en météorologie, en hydrologie, en finance et en assurance. Comme lois de valeurs extrêmes utilisées en hydrologie nous avons 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

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). Les pluies extrêmes peuvent avoir des conséquences désastreuses sur les inondations, notamment en provoquant des crues rapides des rivières et des torrents, des éboulements de terrain, des glissements de terrain et des inondations urbaines. Ces événements peuvent endommager ou détruire des infrastructures vitales telles que des routes, des ponts, des systèmes d'égout, des réseaux électriques et des systèmes d'alimentation en eau potable. Ils peuvent également causer des dommages aux biens et aux propriétés, entraîner des pertes économiques importantes et mettre en danger la vie des personnes. Les inondations extrêmes peuvent avoir des conséquences à long terme sur l'environnement, en modifiant les cours d'eau, en déplaçant les sédiments et en affectant la biodiversité. Selon Gildas et Ange (2018), les conditions climatiques actuelles compromettent la disponibilité des ressources en eau, le développement des activités économiques et la durabilité environnementale. Cependant, pour parvenir à comprendre ce problème de variabilité des pluies extrêmes qui conduit aux inondations, plusieurs lois d'ajustements ont été utilisées et pour pouvoir choisir la meilleure loi, des tests sont

effectués pour déterminer enfin la période de retour. Selon Katz et al. (2002), Hanchane (2016), les valeurs extrêmes convergent toujours vers l'une des trois lois de distribution : Gumbel, Fréchet, ou Weibull et que leur combinaison est réalisée au sein d'un modèle de valeurs extrêmes généralisées (GEV : Generalized Extreme Value). Pour analyser les valeurs extrêmes, Azioune, Tatar et Nouaceur (2018), ont utilisé la « Matrice Bertin » MGCTI, matrice graphique. Cela a permis d'analyser la répartition spatio-temporelle du paramètre météorologique, puis de déterminer les dates de changement de cycle, cette analyse des précipitations extrêmes à Biskra leur a permis d'étudier les risques d'inondations dans la région. À partir de plusieurs indices pluviométriques, Hangnon, De Longueville, Ozer (2015) ont analysé des tendances temporelles et ont utilisé la méthode de Gumbel pour déterminer les périodes de retour des précipitations. Les résultats obtenus révèlent que le nombre de jours pluvieux et les précipitations connaissent une tendance à la baisse sur la période 1950-2012 et que les inondations survenues à Ouagadougou résultent donc plus de la croissance urbaine non planifiée. Hounnondaho (2023) a constaté que les valeurs de précipitation varient de 0,112 à 0,176 mm par heure après une analyse spatiale des précipitations sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou. Ouassa, Ogouwalé et Koudamilo (2021) ont effectué un ajustement statistique des hauteurs de pluies maxima sur le bassin versant de la Pendjari sur la période 1965-2017 et il ressort que les pluies extrêmes ont tendance à mieux s'ajuster à la loi de Gumbel, ils ont aussi effectué des tests statistiques tels que le test d'indépendance, test d'homogénéité de Wilcoxon et le test stationnarité de Kendall pour la caractérisation des risques d'inondations. Koumassi (2019) après une représentation spatiale du risque d'inondation dans le BV de la Volta montre que les zones à fort risque d'inondation représentent environ 32 % de la superficie du bassin et sont situées au nord-ouest du bassin notamment sur les formations sédimentaires ayant une densité de drainage élevée. Kieffer et Bois (1996) pour analyser la variabilité spatiale du gradex selon les pas de temps, ils ont réalisé des cartes des gradex par krigeage à partir des données de pluies extrêmes de 65 stations dans les Alpes françaises et ils ont montré que les valeurs de gradex augmentent lorsque l'on se déplace vers l'Ouest, le Nord dont les valeurs moyennes sont homogènes et le Sud qui enregistre toujours les valeurs les plus fortes. Pour cartographier et identifier des zones à risque d'inondation dans le bassin de la Sota, Koumassi et al. 2014, ont utilisé la méthode d'analyse multicritères à l'aide du logiciel surfer 11 et Arcgis 9.3 et ont effectué une analyse fréquentielle des pluies maximales

journalières, cette étude a été réalisée en combinant les données de pentes, de la densité de drainage, des aires d'influences et de géologique. Azioune, Tatar et Nouaceur (2018), ont fait aussi une approche cartographique qui a permis grâce aux SIG de réaliser la carte du risque d'inondation. La carte obtenue du risque est en fait la combinaison des cartes de l'aléa et de la vulnérabilité, cette analyse cartographique a été basée sur la décomposition de l'espace, en l'occurrence, les plaines inondables, en cellules hydro-économiques dont les limites sont les côtes d'inondation des périodes de retour 20 et 100 ans.

Pour comprendre le comportement des pluies extrêmes actuelles et futures et la variation des inondations. Lawin et al, (2013) ont indiqué 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. Kouassi (2011), quant à lui, a relevé une très forte variabilité de la pluviométrie et des écoulements. Salifou (2023) en utilisant les données climatiques futur de deux MCR (le modèle ECARTH et le modèle HADGEM2), il a remarqué que les données futures présentent plus de variabilité des PMJ importantes au niveau des stations que les données observées.

1.3. But de la recherche

Le principal but de ce travail est d'identifier les zones les plus vulnérables aux inondations, et à fournir des informations essentielles pour la gestion des ressources hydriques et la prévention des catastrophes naturelles dans cette région.

1.4. Questions de recherches

- Comment les pluies extrêmes varient-elles dans le temps et dans l'espace dans le bassin versant de la Pendjari ?
- Quelles sont les risques d'inondation provoqué par ces pluies extrêmes dans le bassin versant de la Pendjari ?
- Quelles sont les probabilités futures d'apparition des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari ?

1.5. Objectifs de l'étude

1.5.1. Objectif général

Comprendre comment les pluies extrêmes variant-elle dans l'espace et leurs conséquences sur les risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari.

1.5.2. Objectifs spécifiques

- Analyser la variabilité spatiale des pluies extrêmes dans le bassin versant de la Pendjari ;
- Evaluer les risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari ;
- Analyser les tendances futures et actuelles des pluies extrêmes et risques d'inondation.

1.6. Hypothèses de travail

- La variabilité spatiale des pluies extrêmes augmente d'une station pluviométrique à une autre ;
- Les risques d'inondations sont particulièrement élevés dans les zones basses et les plaines inondables ;
- Le bassin de la Pendjari est vulnérable à la variabilité future des pluies extrêmes et aux risques d'inondations.

1.7. Organisation du mémoire

Notre étude est structurée en trois (03) chapitres (sans pris en compte, 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, matériels et méthodes. Il est composé de 4 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 9 sections dont 8 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

2.1.1. Présentation du bassin versant de la pendjari

Le bassin versant de la Pendjari se situe au nord-Ouest du Bénin, couvrant une superficie d'environ 15000 km² s'étirant entre la chaîne de montagne de l'Atacora et la plaine de Gourma. Il s'étend sur les départements de l'Atacora et de l'Alibori, et est délimité au nord par le BURKINA FASO, au sud par le bassin de la KERAN, à l'est par le bassin du NIGER et à l'ouest par le bassin de la D'OTI SUPERIEUR. Le bassin de la Pendjari est situé entre les parallèles 10°21' et 10°46' de latitude nord et les méridiens 1°12' et 1°38' de longitude est (Ouassa, Ogouwalé et Koudamiloro, 2021). Les communes concernées sont Cobly, Banikoara, Boumkombé, Matéri, Tanguiéta, Natitingou, Kouandé, Kérou et Toukoun touna.

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

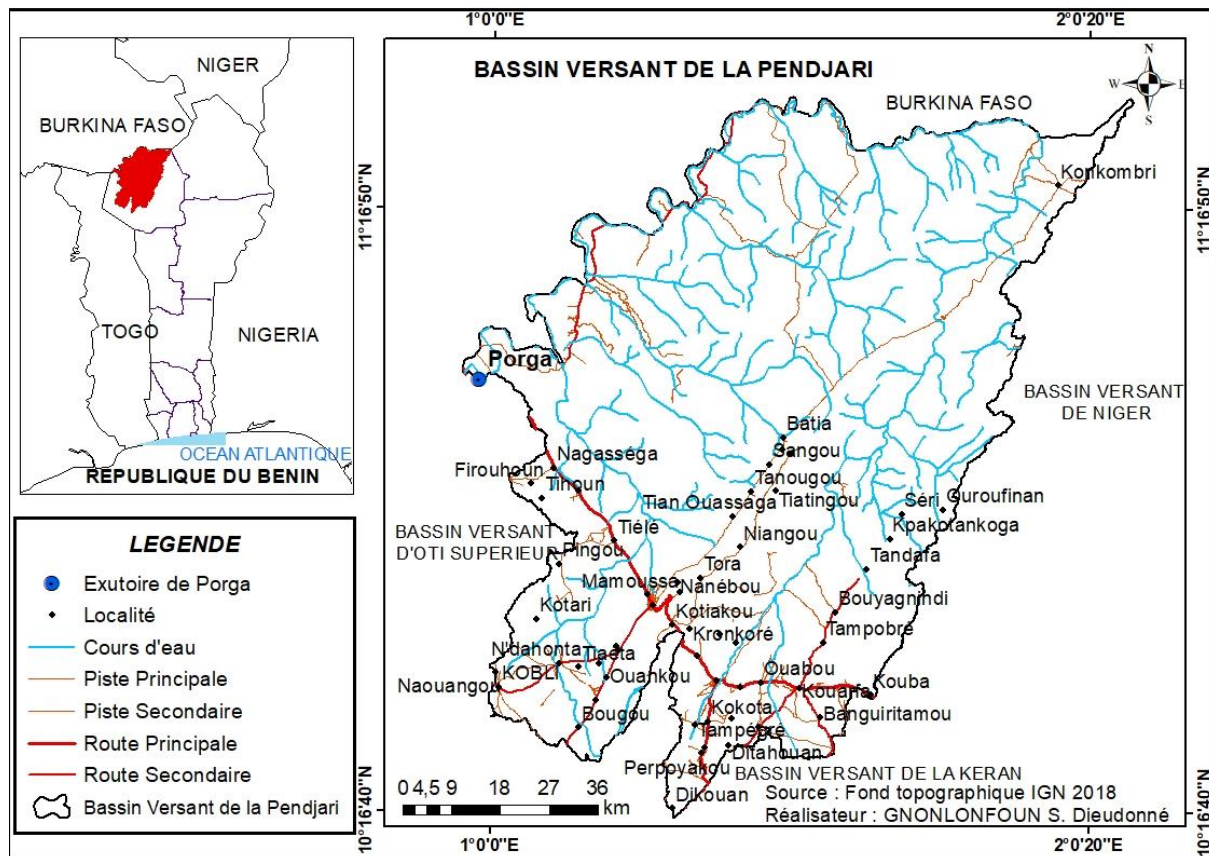


Figure 1: Carte de la situation géographique du bassin versant de Pendjari

2.1.2. Présentation : climat, végétation, relief

▪ Climat

Le bassin versant de la Pendjari est sous l'influence du climat soudanien (climat tropical chaud et humide) ou soudano-guinéen qualifié d'atacorien (Houndenou, 1999). Il est caractérisé par une alternance d'une saison sèche et d'une saison pluvieuse. La saison pluvieuse de 5 à 6 mois (mai à octobre) est dominée par les flux de mousson, mais aussi ceux liés aux lignes de grains, génératrices de fortes averses sur la région. La pluviosité est de 1131,3 mm. Les mois de juillet, août et septembre sont les plus pluvieux avec une moyenne de 227,5 mm par mois (Ouassa, Ogouwalé et Koudamiloro, 2021). Les températures restent élevées toute l'année mais elles ne sont jamais excessives. Les moyennes annuelles varient de 26,8 °C à 27,7°C, soit une augmentation de 0,9 °C sur la période 1965-2017. Ces moyennes, constamment élevées et presque homogènes pour l'ensemble de la région ne constituent pas un facteur limitant pour les activités agricoles (Ouassa, Ogouwalé et Koudamiloro, 2021).

▪ Relief

Le relief du bassin versant est varié, avec des altitudes allant de 200 à 500 mètres. On y trouve des plaines, des collines, des plateaux et des massifs montagneux. Les sols sont majoritairement ferrallitiques et peu fertiles.

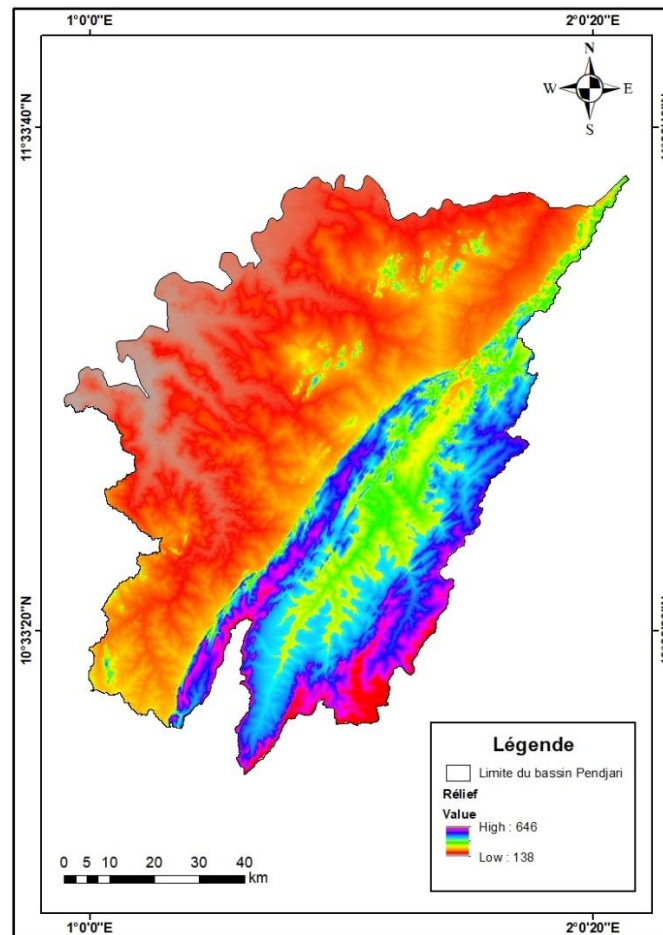


Figure 2 : Carte du relief du bassin versant de la Pendjari

▪ Végétation

Le bassin versant de la Pendjari abrite une diversité de végétations, influencée par le climat, la topographie et les sols. On peut distinguer trois zones principales : La zone soudano-guinéenne : située au sud et à l'est, elle se caractérise par une savane arborée dense, avec des arbres comme le karité, le baobab et le tamarinier. On y trouve également des forêts galeries le long des cours d'eau. La zone soudanienne : située au nord et à l'ouest, elle est caractérisée par une savane herbeuse, avec des graminées comme l'*impérata cylindrica* et le *Pennisetum purpureum*. On y trouve également des arbres clairsemés, tels que les acacias et les combretaceae.

La zone sahélienne : située à l'extrême nord, elle se caractérise par une steppe arborée, avec des arbres comme le *jujubier* et le *Ziziphus mauritiana*. On y trouve également des arbustes et des herbacées.

2.1.3. Hydrographie

Le bassin versant de la Pendjari est drainé par un réseau hydrographique dense, comprenant la rivière Pendjari, ses affluents et de nombreux cours d'eau temporaires. Il est drainé par les cours d'eau suivants : la Pendjari (440 km) et ses affluents Mangou (109 km²) et Bori (55,2 km), le Kara (31 km), le Kéran (77 km), le Binao (32 km) et le Koumangou (59 km) (Koumassi, 2019). Les rivières comme Sarga, Perma, Sina-Issiré, Kiatiko coulent en permanence des flancs de la chaîne montagneuse de l'Atacora, dans leurs cours supérieurs. La Pendjari prend sa source dans les monts Atacora et se jette dans le fleuve Niger au niveau de la localité de Porga. Les rivières du bassin versant ont un régime torrentiel, caractérisé par des crues soudaines et violentes pendant la saison des pluies. Le réseau hydrographique du bassin versant de la Pendjari est contrôlé par la rivière Pendjari qui prend sa source à Pèporiakou (dans la Commune de Natitingou). En effet, longue de 420 km au Bénin, la Pendjari est le principal cours d'eau de la portion nationale du Bassin. Ce fleuve est alimenté par de nombreux affluents et sous affluents pour la plupart temporaires (ne coulant qu'en saison des pluies) (Alé et al, 1993 et Houndenou, 1999).

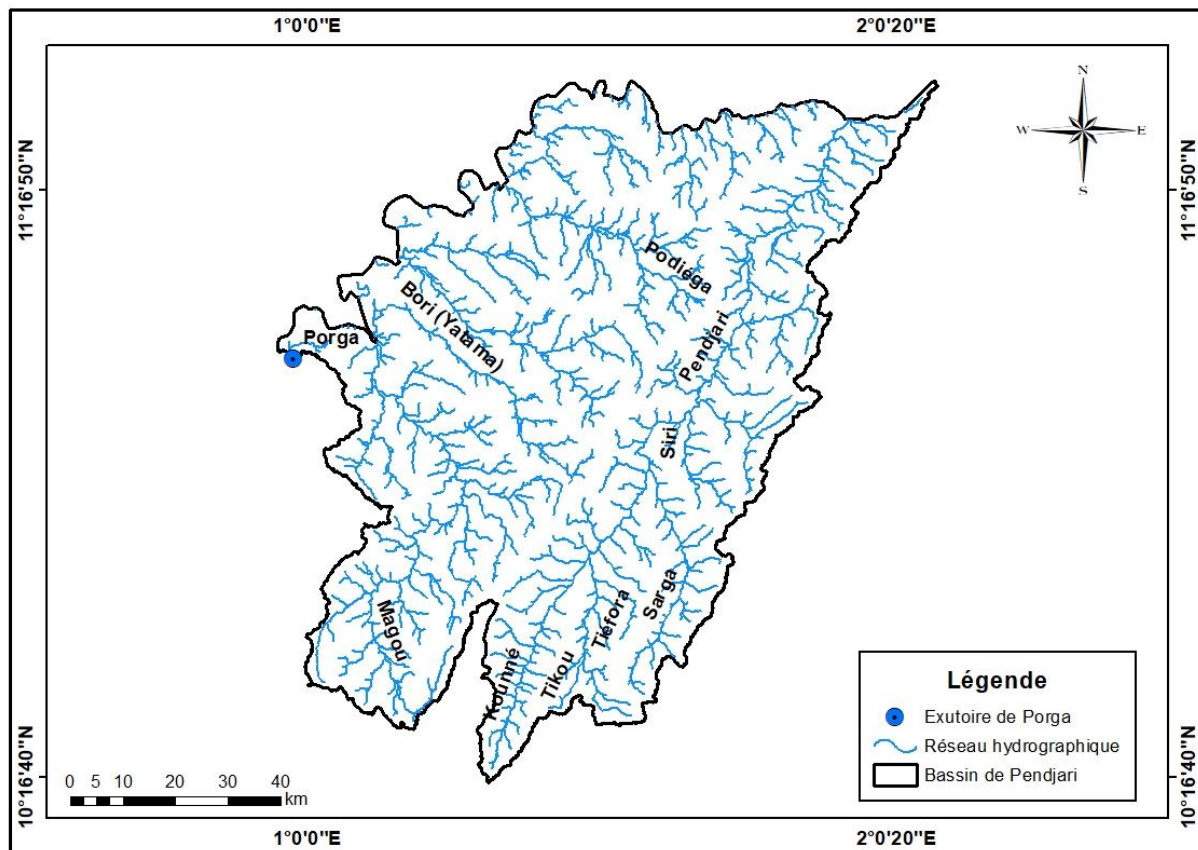


Figure 3 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de Pendjari

2.1.4. Occupation des sols et activités socio-économiques

L'occupation des sols dans le bassin versant de la Pendjari est dominée par l'agriculture, pratiquée essentiellement en petites exploitations familiales. Le bassin versant de la Pendjari est peuplé d'environ 1 million de personnes, réparties dans des villages et des hameaux. Les principales cultures sont le maïs, le sorgho, le mil, le coton, le sésame, le riz et l'arachide. L'élevage est également une activité importante, avec des troupeaux de bovins, ovins et caprins. Le commerce : se fait essentiellement au niveau local, avec des marchés hebdomadaires où les produits agricoles, d'élevage et de pêche sont échangés. Le bassin versant de la Pendjari est également une zone touristique importante, avec le Parc national de la Pendjari, qui abrite une faune riche et variée, notamment des éléphants, des lions, des girafes et des buffles.

2.1.5. Sols

Les sols rencontrés dans le bassin de la Pendjari sont généralement latéritiques, gravillonnaires, graveleux, sablonneux, argileux (Alé et al, 1993). Ces sols sont pour la plupart lessivés, ce qui a considérablement réduit leur fertilité à cause de la forte dégradation dont ils sont l'objet et qui est liée, entre autres, aux techniques culturales inadaptées pratiquées par les populations et la faible capacité de gestion des eaux de drainage. Les sols lessivés à concrétion et les sols lessivés indurés sont caractéristiques de la plaine de Gourma et sont modérément aptes à la plupart des spéculations agricoles cultivées dans le bassin béninois de la Pendjari (Idieti , 2012).

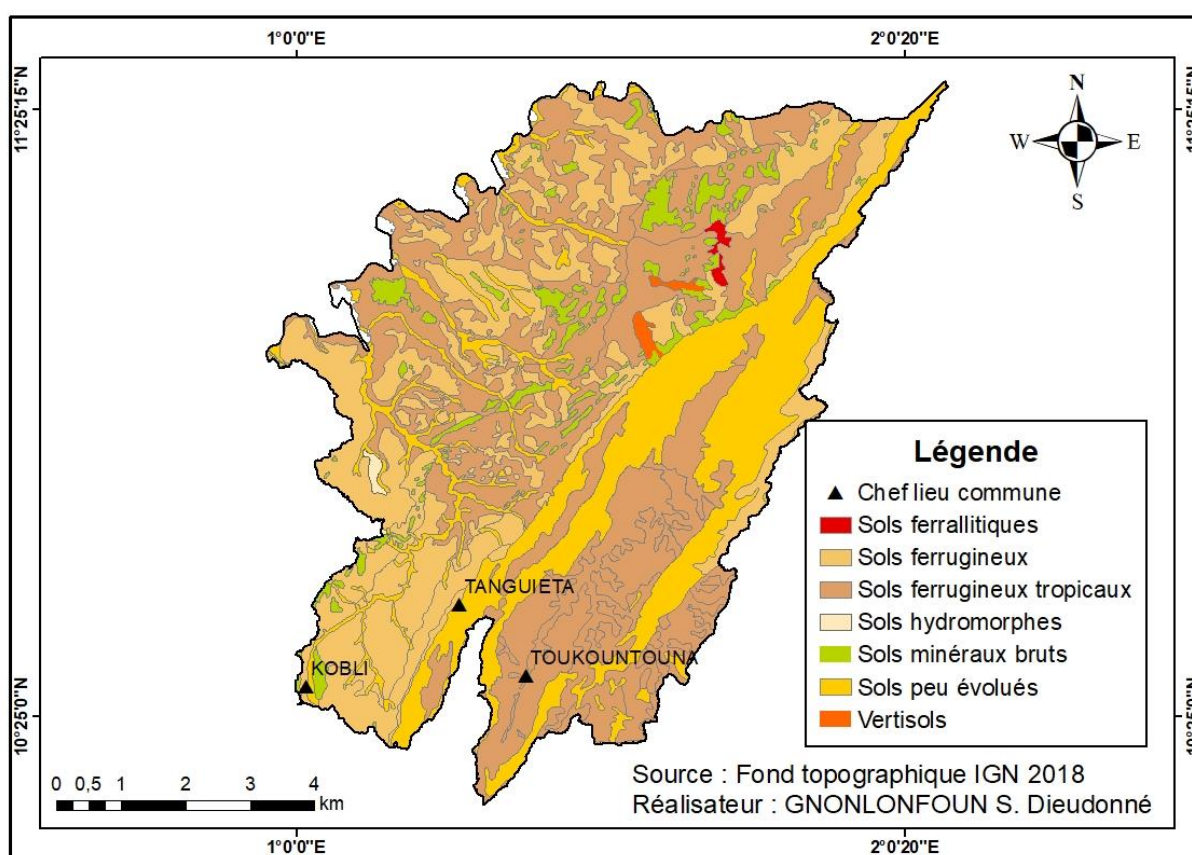


Figure 4 : Carte pédologique du bassin versant de Pendjari

2.2. Méthodologie

2.2.1. Données utilisées

Les données nécessaires dans le cadre de notre étude sont les données des stations pluviométriques de Tanguiéta, Boukoumbé, Banikoara, Dassari, Kouandé, Kérou et Natitingou. Le choix de la période d'étude des données est de 1978 à 2023, pour plus de

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

fiabilité dans les résultats. Cette période est choisie en fonction de la disponibilité des données. La collecte de données se répartie de la manière suivante : des données de hauteur de pluies des stations pluviométriques selon la disponibilité des données ; les données climatiques futures sont données par le Modèle Climatique Régional (MCR) qui a une meilleure résolution spatiale et couvrent la période de 2023 à 2060. Ce MCR est : le modèle HADGEM2 avec pour scénario RCP4.5. Le MCR à utiliser dans cette étude sont ceux obtenus dans le cadre du projet DWD (*Deutscher Wetterdienst*) sur le ESGF.

Tableau 1 : Stations utilisées

N°	NOMS	LONGITUDE (UTM)	LATITUDE (UTM)	PERIODE
1	Kouande	355800	1142528	1978-2023
2	Natitingou	322936	1140909	
3	Boukoumbe	291840	1124486	
4	Tanguieta	310413	1174160	
5	Dassari	295860	1192608	
6	Banikoara	438121	1249211	
7	Kerou	401622	1197660	

2.2.2. Matériel utilisé

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

- Microsoft Word 2016 pour rédiger le document de mémoire ;
- Microsoft Excel 2016 pour le comblement des données ;
- QGIS 3.22 et ARC-GIS 10.8 : pour la réalisation des cartes ;
- HYFRAN : HYdrological FREquency ANalysis pour l'analyse des valeurs des pluies extrêmes ;
- Surfer 9 pour le krigeage
- Langage de programmation R

2.2.3. Méthodes

Pour ce travail, nous avons acquis des documents en relation avec l'analyse fréquentielle, la spatialisation des pluies extrêmes et des documents sur l'évaluation des risques d'inondation dans la zone 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 :

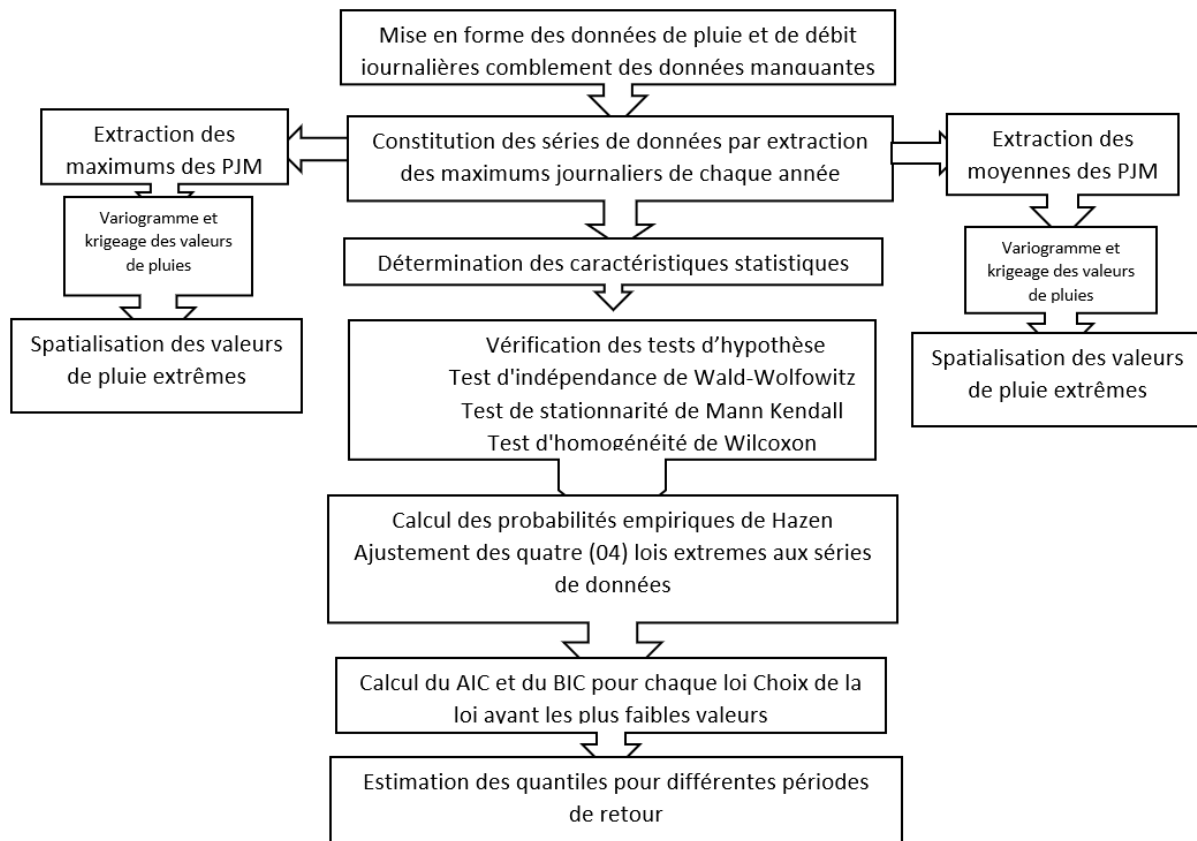


Figure 5 : Etape fondamentale de l'analyse

2.2.4. Collecte des données

Nous avons collecté les données pluviométriques à l'Agence Météo-Bénin et les données futures proviennent du Modèle Climatique Régional à savoir le modèle HADGEM2.

2.2.5. Contrôle de la qualité des données

Pour 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. Le régime de notre zone d'étude étant uni-modale, la saison de pluies commence en mai se termine en octobre, les mois les plus

pluvieux sont entre juillet, août et septembre. La recherche de données manquantes s'est donc focalisée sur cette période, pour cela nous avons déterminé le rapport du nombre de jours de données manquantes des mois de mai à octobre par rapport au nombre total de jours pluvieux pour chaque station et pour chaque année.

Ensuite, nous avons procédé 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. Pour cela les années dont le taux de données manquantes des mois pluvieux dépasse 5% ne sont pas pris en compte lors des analyses. Après avoir contrôler et combler les données manquantes nous avons effectué l'extraction des maximums de pluie journalière par année et pour chaque station. Les séries de données utilisées dans la suite sont constituées des maximums annuels de pluie journalière.

Pour finir nous avons eu utilisé la méthode de quantile de mapping pour pouvoir corriger les données de prévisions futures du modèles HADGEM2. Pour ce fait nous avons utilisé les données historiques de 1981 à 2020 obtenues sur ce même modèle et les données actuelles pour pouvoir corriger les données futures de 2021 à 2060.

2.2.6. 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).

2.2.7. 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.

2.2.7.1. 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 H_0 qui formule ce que l'on souhaite rejeter/réfuter,
- L'hypothèse H_1 qui formule ce que l'on souhaite montrer.

Par exemple, si on veut montrer l'hypothèse "lot non conforme", H_0 et H_1 s'opposent sous la forme : H_0 : "lot conforme" contre H_1 : "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 Castelhana (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.

2.2.7.2. 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, GEV 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. Si une variable aléatoire X suit une loi log-normale, alors son logarithme naturel $\ln(X)$ suit une loi normale. La fonction de répartition de X , notée $F(x)$, est donnée par :

$$F(x) = \frac{\Phi((\ln(x) - \mu))}{\sigma} \quad (1)$$

où : $F(x)$ est la probabilité qu'une variable aléatoire X soit inférieure ou égale à x , Φ est la fonction de répartition de la loi normale standard, μ est la moyenne du logarithme de X , σ est l'écart-type du logarithme de X

Note : La fonction de répartition de la loi normale standard n'a pas d'expression analytique simple, mais elle peut être calculée numériquement ou à l'aide de tables.

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

C'est une loi qui a 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). C'est une loi très importante, qui sert dans l'analyse fréquentielle des valeurs. Selon Koutsoyiannis (2004b), sa simplicité et la facilité à déterminer ses deux paramètres (paramètre de position μ et paramètre d'échelle α) justifient en partie son usage commune. La fonction de répartition de la loi de Gumbel $F(x)$ s'exprime de la manière suivante :

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

avec la variable réduite suivante : $U = \frac{x-a}{b}$ où a et b sont les paramètres du modèle de Gumbel. La distribution s'écrit alors de la manière suivante :

$$F(x) = \exp(-\exp(-u)) \text{ et } u = -\ln(F(x)) \quad (3)$$

Où a est le paramètre de position, b le paramètre d'échelle et c le paramètre de forme et x la variable, ici les hauteurs de pluie.

✓ Loi log-Pearson type III

Elle a 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.

✓ GEV

La loi GEV (Generalized Extreme Value) c'est-à-dire loi de Valeur Extrême Généralisée a été proposée par Jenkinson et à l'avantage de combiner les trois types de lois des valeurs extrêmes EV1, EV2 et EV3 développées par Fisher et Tippet. (Perreault et Bobée, 1992). Le type utilisé dans cette étude est EV2 à trois paramètres (paramètre de position μ , paramètre d'échelle α et paramètre de forme κ) qui est souvent utilisée pour modéliser les maxima annuels de pluies journalières. Plusieurs auteurs (Amoussou et al, 2014 ; Habibi et al, 2013 ; Hamzaoui, 2016 ; Koutsoyiannis, 2004b) s'en sont servi pour leurs études. La fonction de répartition de la loi GEV, notée $F(x)$, donne la probabilité qu'une variable aléatoire X soit inférieure ou égale à une valeur x . Elle est définie par :

$$F(x) = e^{-\{1 + \xi[(x - \mu)/\sigma]\}^{-1/\xi}} \quad (4)$$

où : x est la valeur de la variable aléatoire, μ est le paramètre de location, σ est le paramètre d'échelle, ξ est le paramètre de forme

2.2.7.3. 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 critères 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 :

$$AIC = -2 \log (L) + 2 K \quad (1) \tag{5}$$

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 :

$$BIC = -2 \log (L) + 2 K \log (2) \tag{6}$$

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

2.2.8. 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 (Salifou, 2023). 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.

2.2.9. Les quantiles

La prévision d'une probabilité d'apparition d'un phénomène hydroclimatique (pluie 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.

2.3. Spatialisation des pluies extrêmes sur le bassin versant

La spatialisation des données de pluie consiste à transformer des données ponctuelles de précipitations (mesurées en des points précis par des pluviomètres) en une carte continue de la distribution spatiale des précipitations sur une zone donnée, comme un bassin versant. En visualisant la distribution spatiale des précipitations, on peut mieux comprendre les mécanismes à l'origine des crues, de l'érosion des sols, de la recharge des nappes phréatiques, etc. Pour ce fait nous avons utilisé la méthode de l'inverse des distance en puissance.

La **méthode des inverses des distances** de puissance, également connue sous le nom de méthode **IDW (Inverse Distance Weighting)**, est une technique d'interpolation spatiale

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

couramment utilisée en géostatistique et en cartographie. Cette méthode permet de prédire la valeur d'une variable à un point donné en utilisant les valeurs connues des points environnants.

Principe de la méthode IDW

L'idée principale est que l'influence d'un point diminue avec la distance. Plus un point est éloigné, moins il influence la prédiction de la valeur au point cible.

Tableau 2 : Stations et données utilisées pour la spatialisation des données observées

STATIONS	LONGITUDE	LATITUDE	Moyenne des PMJ	Maximas des PMJ
BANIKOARA	2,433333	11,3	66,86	105,3
BOUKOUMBE	1,1	10,166667	76,3	197,7
DASSARI	1,133333	10,783333	89,08	155
KEROU	2,11	10,824833	69,52	101,4
KOUANDE	1,692409	10,33185	70,55	132,2
NATITINGOU	1,358889	10,378333	65,92	158,6
TANGUIETA	1,266561	10,617122	68,79	120
MALAVILLE	3,36	11,86	69,27	159,6

Tableau 3 : Stations et données utilisées pour la spatialisation des données Futures

STATIONS	LONGITUDE	LATITUDE	Moyenne des PJM	Maximas des PJM
BANIKOARA	2,433333	11,3	63,17009054	130,67568
BOUKOUMBE	1,1	10,166667	72,36811579	170,5815081
DASSARI	1,133333	10,783333	78,20654061	173,21312
KEROU	2,11	10,824833	75,25012464	236,7528
KOUANDE	1,692409	10,33185	66,3896539	131,0580913
NATITINGOU_PEPORIYAKOU	1,358889	10,378333	65,05321737	156,926602
TANGUIETA	1,266561	10,617122	67,35762722	167,54592
MALAVILLE	3,36	11,86	31,880736	71,93664

2.4. Caractérisation du risque d'inondation

Pour évaluer le risque d'inondation nous allons utiliser le seuil et le niveau d'alerte associables aux inondations de la station de N'Dali du rapport final (de 2015) du projet SAP sur l'étude de la détermination des seuils et les niveaux d'alerte relatifs des risques d'inondation pluviales du Bénin. La station de N'dali a été choisie parce qu'elle est la station la plus proche du nord Bénin et de notre zone d'étude.

L'analyse des chroniques des données pluviométriques sur trois jours combinés aux informations recueillies sur le terrain, au relief et à la nature du sol de chacune des communes ont permis de déterminer les seuils des quatre niveaux d'alerte (vert, jaune, orange et rouge) pour le risque inondation pluviale (Projet n°00086748, 2015)

En ce qui concerne la station de N'dali les seuils sont vert lorsque la pluie est < 30 mm, jaune lorsque la pluie est entre 30 – 60 mm, orange lorsque la pluie est entre 60 – 80 mm et rouge lorsque la pluie est supérieure à 80 mm.

Pour notre étude, pour pouvoir définir le risque d'inondation dans le bassin versant de Pendjari nous allons utiliser la moyenne des pluies journalières maximales sur les cinq dernières années des données existantes pour pouvoir comparer les valeurs par rapport au seuil et au niveau d'alerte associables aux inondations de la station de N'Dali.

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 4: Statistiques des stations étudiées

Caractéristiques Stations	Min	Max	Moy	Ecart- type	Med	Cv	Cs	Ck
Banikoara	27,7	105	66,9	20,5	65,7	0,307	0,133	2,22
Boukoumbé	42,8	198	76,3	30,8	70,5	0,404	2,07	7,77
Dassari	25,3	155	87,7	26,3	89	0,299	0,486	3,54
Kérou	26	101	69,5	21,1	74,9	0,303	0,368	2,13
Kouandé	36,7	132	71,3	21,8	66,2	0,305	0,659	2,84
Natitingou	42,2	159	65,9	19,4	61,7	0,294	2,68	12,6
Tanguiéta	25,3	120	68,8	24,1	61,5	0,350	0,366	2,14

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

On constate dans ce tableau que les plus grandes valeurs de la moyenne et de la médiane des stations pluviométriques (Banikoara, Boukoumbé, Dassari, Kérou, Kouandé, Natitingou et Tanguiéta) sont au niveau des stations de Boukoumbé, de Natitingou et de Dassari.

Tableau 5 : Statistiques des données manquantes

Stations	Taux de lacune	Années manquantes
Banikoara	0.9062907	2019
Boukoumbé	1.0721478	1997 et 2021

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

Dassari	4.2767445	2016, 2019 et 2022
Kérou	1.0721478	2015, 2017, 2022
Kouandé	0.7226632	0
Natitingou	0.4798010	0
Tanguiéta	9.1399123	2013, 2014 et 2015

Ce tableau montre le taux de lacunes de données manquantes sur chaque stations, et les années manquantes ont été obtenu en calculant le taux le lacunes des mois pluvieux de chaque stations. Les années manquantes sont les années dont on n'a pas les données ou le taux de lacunes et supérieure à 5%

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 ou non à l'aide du test de Wald-Wolfowitz. Les tests d'homogénéité et de stationnarité utilisés sont respectivement ceux de Wilcoxon et de Kendall.

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 6 : Résultat du test de Wald-Wolfwitz

Test Stations	Test d'indépendance		Nature de la station
	U	P	
Banikoara	2,47	0,0134	Indépendante 1%
Boukoumbé	1,22	0,224	Indépendante
Dassari	0,225	0,822	Indépendante
Kérou	2,83	0,00473	Dépendante
Kouandé	2,39	0,0167	Indépendante 1%
Natitingou	0,947	0,344	Indépendante

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

Tanguiéta	0,266	0,790	Indépendante
-----------	-------	--------------	--------------

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

Il ressort de l'analyse des résultats de ce tableau que, la série de données est indépendante pour toutes les stations à un niveau de signification de 5% ou 1% sauf pour la station de Kérou dont la série de données est dépendante avec un seuil de 1%.

Tableau 7 : Résultat du test de Mann-Kendall

Test Stations	Test de stationnarité		Nature de la station
	K	P	
Banikoara	1,11	0,267	Stationnaire
Boukoumbé	0,858	0,391	Stationnaire
Dassari	1,12	0,263	Stationnaire
Kérou	1,87	0,0608	Stationnaire
Kouandé	0,848	0,397	Stationnaire
Natitingou	1,74	0,0823	Stationnaire
Tanguiéta	1,12	0,263	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 8 : Résultat du test de Wilcoxon

Test Stations	Test d'homogénéité		Nature de la station
	W	P	
Banikoara	0,135	0,892	Homogène
Boukoumbé	0,230	0,818	Homogène
Dassari	0,417	0,676	Homogène
Kérou	0,505	0,613	Homogène
Kouandé	0,238	0,812	Homogène
Natitingou	1,24	0,214	Homogène

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

Tanguiéta	0,331	0,41	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 : stationnaires et homogènes mais ne sont pas toutes indépendantes.

3.2.2. Vérification des tests pour les données futures

Tableau 9 : Résultats des tests effectués du modèle utilisé

Tests Stations	Test d'indépendance		Test de stationnarité		Test d'homogénéité		Nature du test
	U	P	K	P	W	P	
Banikoara	0,816	0,414	0,390	0,697	0,392	0,770	I ; S ; H
Boukoumbé	2,42	0,0154	1,07	0,285	1,59	0,111	I 1% ; S ; H
Dassari	2,18	0,0292	0,515	0,606	1,21	0,225	I 1% ; S ; H
Kérou	1.18	0.239	0,289	0,772	0,453	0,650	I ; S ; H
Kouandé	2,23	0,0255	0,101	0,920	0,541	0,589	I 1% ; S ; H
Natitingou	2,55	0,0108	0,101	0,920	0,541	0, 589	I 1%;; S ; H
Tanguiéta	1,42	0,155	0,895	0,371	1,44	0,151	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 sept stations, sont toutes stationnaires et homogènes avec un niveau de signification de 5% mais aussi indépendantes avec un niveau de signification de 5% ou de 1% pour certaines stations.

3.3. Ajustement des lois extrêmes aux séries de données Pluviométriques

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, la loi de Log-Normal, la loi de Log- Pearson type III et la loi de GEV sur la période d'étude de chaque station. Il résulte de l'analyse des graphes que les séries pluviométriques suivent très bien la loi de Gumbel pour les stations "Dassari, Natitingou et Tanguieta". De même les lois de Log-Normal, de Log- Pearson type III et de GEV ajuste mieux respectivement les stations de "Kouandé", "Banikoara et Kérou" et "Boukoumbé". De plus, tous les points sont dans l'intervalle de confiance de 95% pour chaque loi. On conclut donc que toutes les séries pluviométriques s'ajustent bien à chacun de ces lois selon la station (la loi Gumbel, la loi de Log-Normal, la loi de Log-Pearson type III et la loi de GEV) avec un niveau de confiance de 95%.

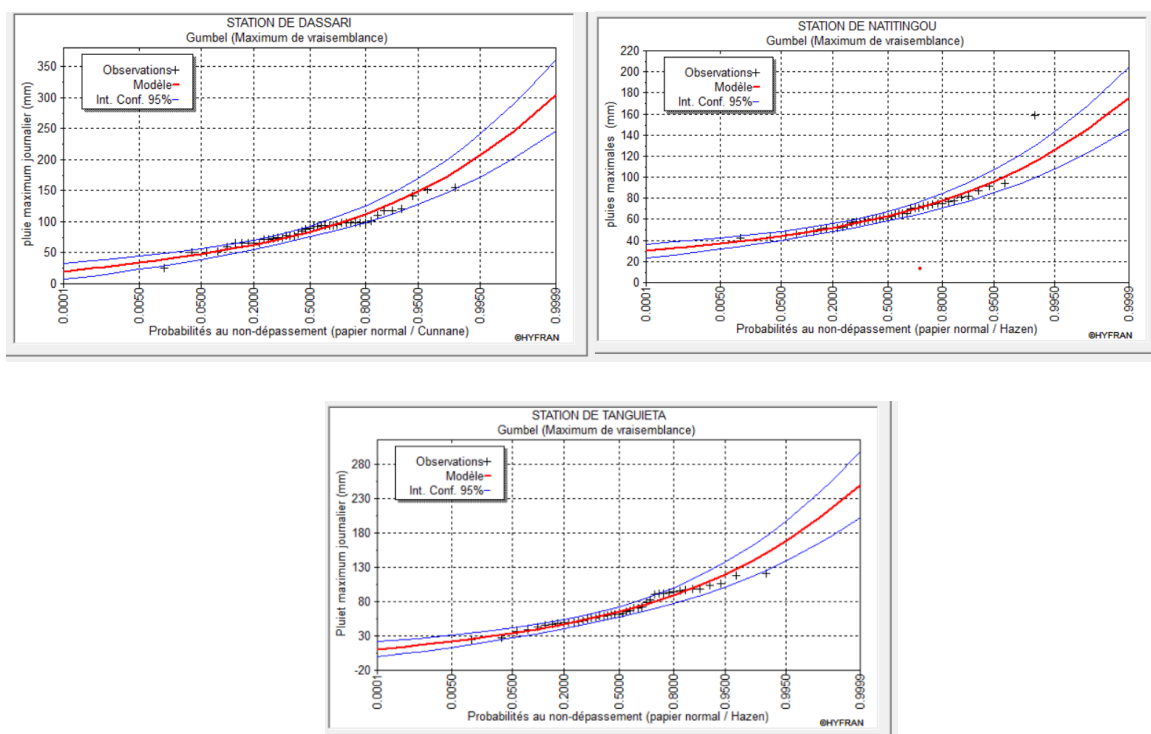


Figure 6: Ajustement des trois stations à la loi de Gumbel

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

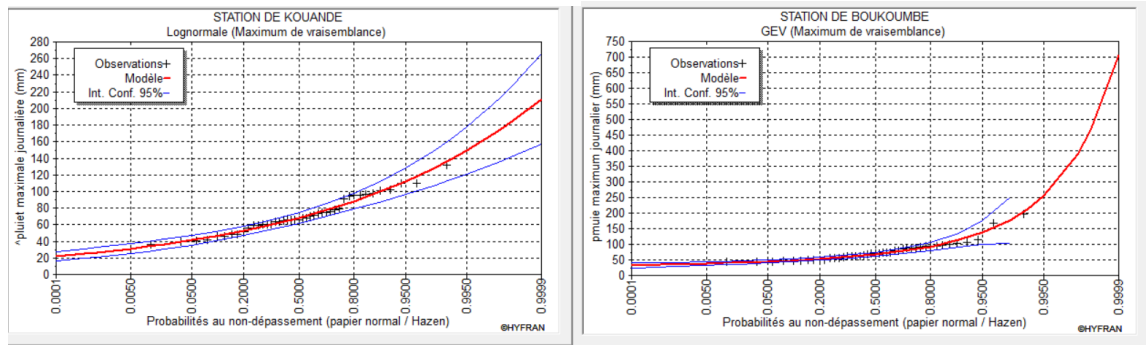


Figure 7 : Ajustement de la station à la loi de Log-Normal et de la station à la loi de GEV

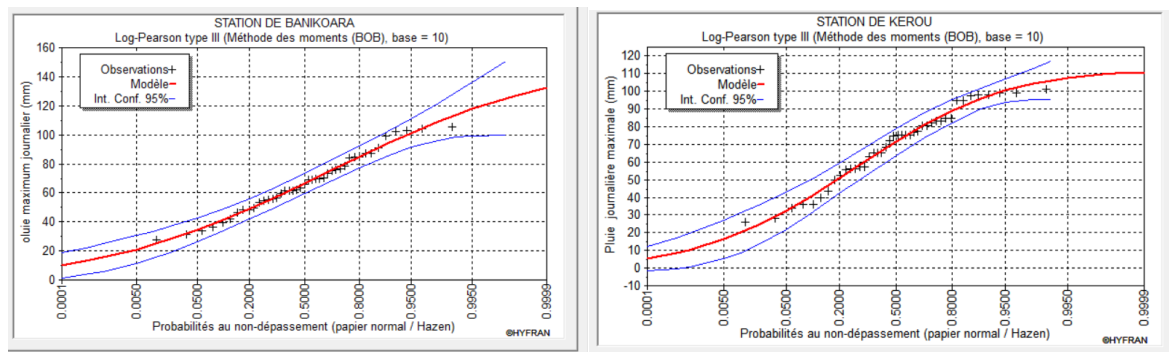
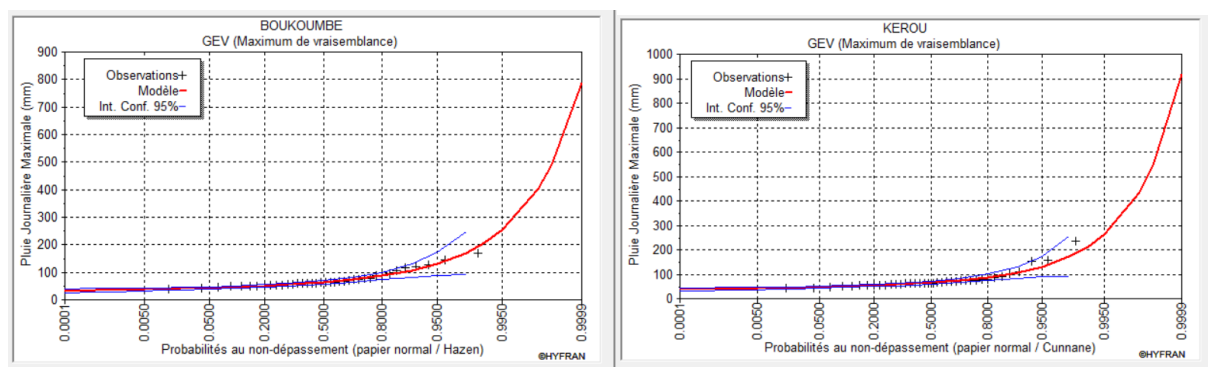


Figure 8 : Ajustement des stations à la loi de Log- Pearson type III

3.3.2. Ajustement des séries pluies futures

Les résultats de l'analyse avec les données du modèle HADGEM2 montrent que les stations de Boukoumbé, Kérou, Natitingou et Tanguiéta s'adaptent au mieux à la loi de GEV et les stations de Banikoara, Dassari et Kouandé s'adaptent au mieux à loi de Gumbel avec un niveau de confiance de 95%.



Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

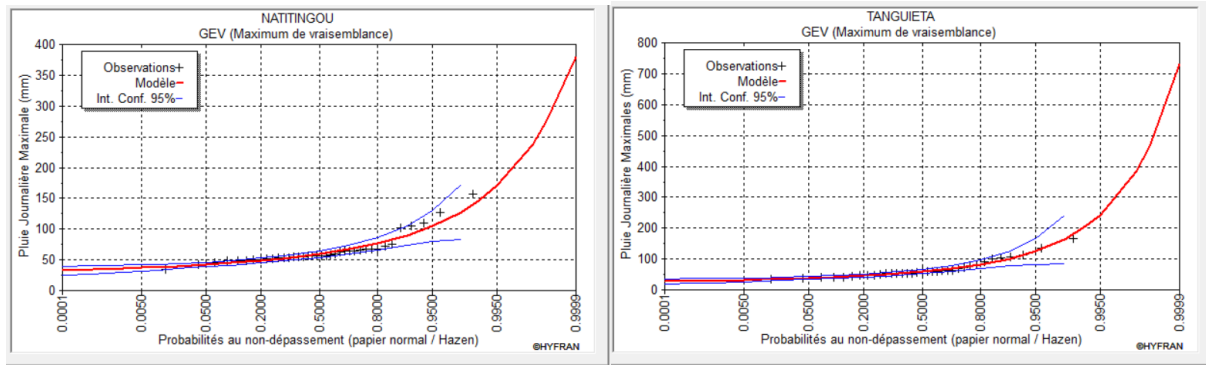


Figure 9 : Ajustement des sept stations à la loi de GEV du modèle HADGEM2

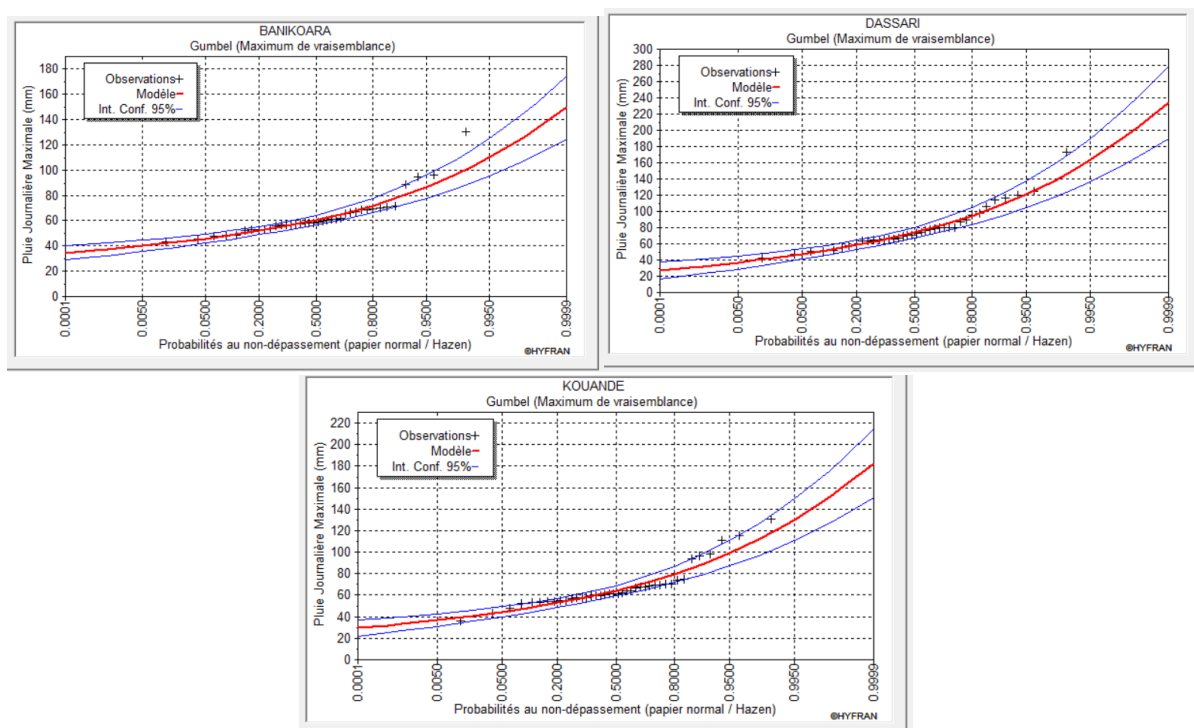


Figure 10 : Ajustement des sept stations à la loi de Gumbel du modèle HADGEM2

3.4. Choix de la loi de distribution

A. 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 montre les différentes valeurs des critères.

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

Tableau 10 : Résultat des valeurs des paramètres BIC et AIC des données d'observations

Stations	Lois	Nombres de paramètres	BIC	AIC
Banikoara	Gumbel	2	391.262	388.739
	GEV	3	391.157	385.875
	Log-Normal	2	390.828	387.305
	Log- Pearson type III	3	390.802	385.518
Boukoumbé	Gumbel	2	403.744	400.221
	GEV	3	403.592	400.308
	Log-Normal	2	404.139	400.617
	Log- Pearson type III	3	404.902	399.619
Dassari	Gumbel	2	412.144	408.622
	GEV	3	412.371	407.087
	Log-Normal	2	412.979	409.457
	Log- Pearson type III	3	414.429	408.143
Kérou	Gumbel	2	390,112	386637
	GEV	3	380,422	375,209
	Log-Normal	2	390,405	386,930
	Log- Pearson type III	3	380,088	374,875
Kouandé	Gumbel	2	389.591	386.068
	GEV	3	393.129	387.181
	Log-Normal	2	389.275	385.753
	Log- Pearson type III	3	393.231	387.947
Natitingou	Gumbel	2	362.868	359.346
	GEV	3	365.038	359.754
	Log-Normal	2	365.890	362.367
	Log- Pearson type III	3	367.409	362.125
Tanguiéta	Gumbel	2	401.314	397.792
	GEV	3	403.842	398.553
	Log-Normal	2	401.547	398.025
	Log- Pearson type III	3	403.376	398.093

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

De l'analyse du tableau, il ressort que les valeurs de BIC et AIC sont faibles pour la loi Gumbel pour les stations "Dassari, Natitingou et Tanguiéta" alors que pour les stations de "Kouandé", "Banikoara et Kérou" et "Boukoumbé" les valeurs de BIC et AIC sont respectivement faibles pour les lois de Log-Normal, de Log- Pearson type III et de GEV. On en déduit que le meilleur modèle pour les stations pluviométriques de Dassari, de Natitingou et de Tanguiéta est celui de Gumbel alors que le meilleur modèle pour les stations pluviométriques de "Kouandé", " Kérou et Banikoara" et "Boukoumbé" est respectivement la loi de Log-Normal, la loi de Log- Pearson type III et la loi de GEV. Donc il n'y a pas un modèle spécifique qui ajuste mieux les séries pluviométriques de ces stations.

B. 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.

Tableau 11 : Résultat des valeurs des paramètres BIC et AIC des données futures

Stations	Lois	Nombres de paramètres	BIC	AIC
Banikoara	Gumbel	2	305,451	302,176
	GEV	3	305,998	301,085
	Log-Normal	2	311,409	308,134
	Log- Pearson type III	3	306,988	302,075
Boukoumbé	Gumbel	2	353,07	350,332
	GEV	3	351,154	346,242
	Log-Normal	2	354,400	351,125
	Log- Pearson type III	3	356,676	351,763
Dassari	Gumbel	2	348,304	345,029
	GEV	3	350,903	345,990
	Log-Normal	2	349,473	346,198
	Log- Pearson type III	3	351,282	346,370
Kérou	Gumbel	2	355,605	352,330

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

	GEV	3	346, 821	341, 908
	Log-Normal	2	357,418	354,142
	Log- Pearson type III	3	356,480	351,568
Kouandé	Gumbel	2	342,205	338,827
	GEV	3	345,093	340,027
	Log-Normal	2	345,038	341,661
	Log- Pearson type III	3	346,968	341,058
Natitingou	Gumbel	2	332,898	329,623
	GEV	3	331,078	326,165
	Log-Normal	2	336,504	333,229
	Log- Pearson type III	3	335,080	330,167
Tanguiéta	Gumbel	2	326,006	322,895
	GEV	3	324,879	320,213
	Log-Normal	2	325,870	322,760
	Log- Pearson type III	3	328,619	323,953

L'analyse de ce tableau révèle que pour le modèle HADGEM2, les valeurs de BIC et AIC sont faibles pour la loi GEV pour les données des stations pluviométriques de Boukoubé, Kérou, Natitingou et Tanguiéta et sont aussi faibles pour la loi de Gumbel, pour les données des stations pluviométriques de Banikoara, Dassari et Kouandé.

On déduit que pour les données du modèle HADGEM2 c'est la loi de GEV et Gumbel qui s'ajustent mieux.

3.5. Estimation des quantiles des séries pluies 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 présente les valeurs des quantiles et les intervalles de confiance calculés pour les pluies maximales journalières.

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

Tableau 12 : Quantiles estimés sur les stations étudiées

Période de retour Stations	Quantiles en (mm) et intervalle de confiance					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Log- Pearson type III						
Kérou	71,3 63,5-79,1	88.9 82,3-95,6	95,9 89,9-102	100 93,8-107	104 95,4-113	106 95,5-117
Banikoara	66.3 59.4-73.2	84.6 76.9-92.3	93.9 85.5-102	101 91.5-111	109 96.3-122	114 98.3-129
Loi de Log-Normal						
Kouandé	77,7 78,7-97,4	88.1 78.7-97.4	101 88.3-113	112 96.7-128	127 107-148	138 114-163
Loi de Gumbel						
Dassari	84.2 75.5-92.8	112 98.9-126	131 114-148	149 128-170	172 145-198	189 159-220
Natitingou	62.9 58.4-67.4	77.3 70.4-84.2	86.9 78-95.7	96 85.2-107	108 94.4-121	117 101-132
Tanguiéta	64.8 57.5-72.2	88.5 77.2-99.9	104 89.7-119	119 101-137	139 116-161	153 128-178
Loi de GEV						
Boukoumbé	67.9 60.9-74.8	92.6 78.9-106	113 90.1-137	138 98.5-177	176 104-249	212

3.5.2. Pour les données futures

Les mêmes périodes de retour ont été retenu à savoir : 2 ans, 5 ans, 10 ans et 20 ans, 50ans et 100ans.

Le tableau présente les valeurs des quantiles calculés pour les données futures enregistrées par le modèle HADGEM2. De son analyse, on note que pour le modèle 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 HADGEM2, les maximums sont enregistrés au niveau des stations de Tanguiéta, de Kérou et de Boukoumbé.

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

Tableau 13 : Quantiles estimés pour les données futures

Période de retour Stations	Quantiles en (mm) et intervalle de confiance					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Loi de GEV						
Boukoumbé	63,7 57-70,5	86,6 72,9-100	107 82,5-131	130 89-172	170 90,7-249	207
Kérou	65,3 59-71,6	87,3 73,8-101	107 82,8-131	131 88,7-174	172 88,9-256	213
Natitingou	59,2 54-64,5	76,2 66,6-85,8	89,7 74-105	105 79,5-130	127 82,7-172	148
Tanguiéta	59 51,9-66,1	82,1 67,7-96,4	102 77,1-127	125 83,1-167	163 83,1-167	199
Loi de Gumbel						
Banikoara	60,5 56,7-64,2	71,9 66,1-77,7	79,4 72-86,9	86,7 77,5-95,6	96 84,6-107	103 89,9-116
Dassari	73,8 67,1-80,8	94,4 83,9-105	108 94,5-121	121 105-138	138 117-159	151 127-174
Kouandé	64,1 59,2-68,9	79,3 71,8-86,8	89,3 79,6-99	99 87,1-111	111 96,7-126	121 104-138

3.5.3. Présentation des variabilités

Comme nous le savons, les pluies maximales journalières sont capables d'entraîner des inondations

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

L'analyse de la figure 11 nous permet de révéler les variations au niveau des observations de chaque station. Ainsi, le tableau suivant présente les résultats de l'analyse du figure 10 où on note une variation des pluies maximales journalières au-dessus de la moyenne au niveau de chaque station.

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

Tableau 14 : Résultats de l'analyse sur la variation des PMJ des données d'observations

Stations	Période de variation des PMJ	Variations (mm)	Année des pics des PMJ	Pic des PMJ (mm)
Banikoara	1981 à 1991	69,8 à 105,3	1984	105,3
	1996 à 2004	70 à 103	1998 et 1999	102 et 103
	2017 à 2022	69,1 à 104,2	2018	104,2
Boukoumbé	1991 à 1995	87,4 à 168,2	1994	168,2
	2008 à 2015	80 à 197,7	2013	197,7
Dassari	1984 à 2000	92 à 155	1985	142
			1996	155
			2018	152
Kérou	1978 à 1983	80,7 à 99,2	1982	92,2
	1989 à 1994	75,3 à 94,8	2012	97,5
	2000 à 2004	75,3 à 94,8	2016	101,4
	2012 à 2020	77,3 à 101,4		
Kouandé	1990 à 1999	75,5 à 110,2	1991	110,2
	2003 à 2005	71,6 à 132,2	1993	109,7
			2004	132,2
Natitingou	2005 à 2011	72,9 à 86,9	1995	93,8
	2016 à 2022	70,9 à 158,6	2020	158,6
Tanguiéta	1979 à 1983	91,4 à 98,2	1991	118,1
	1995 à 2005	70 à 120	1996	120

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

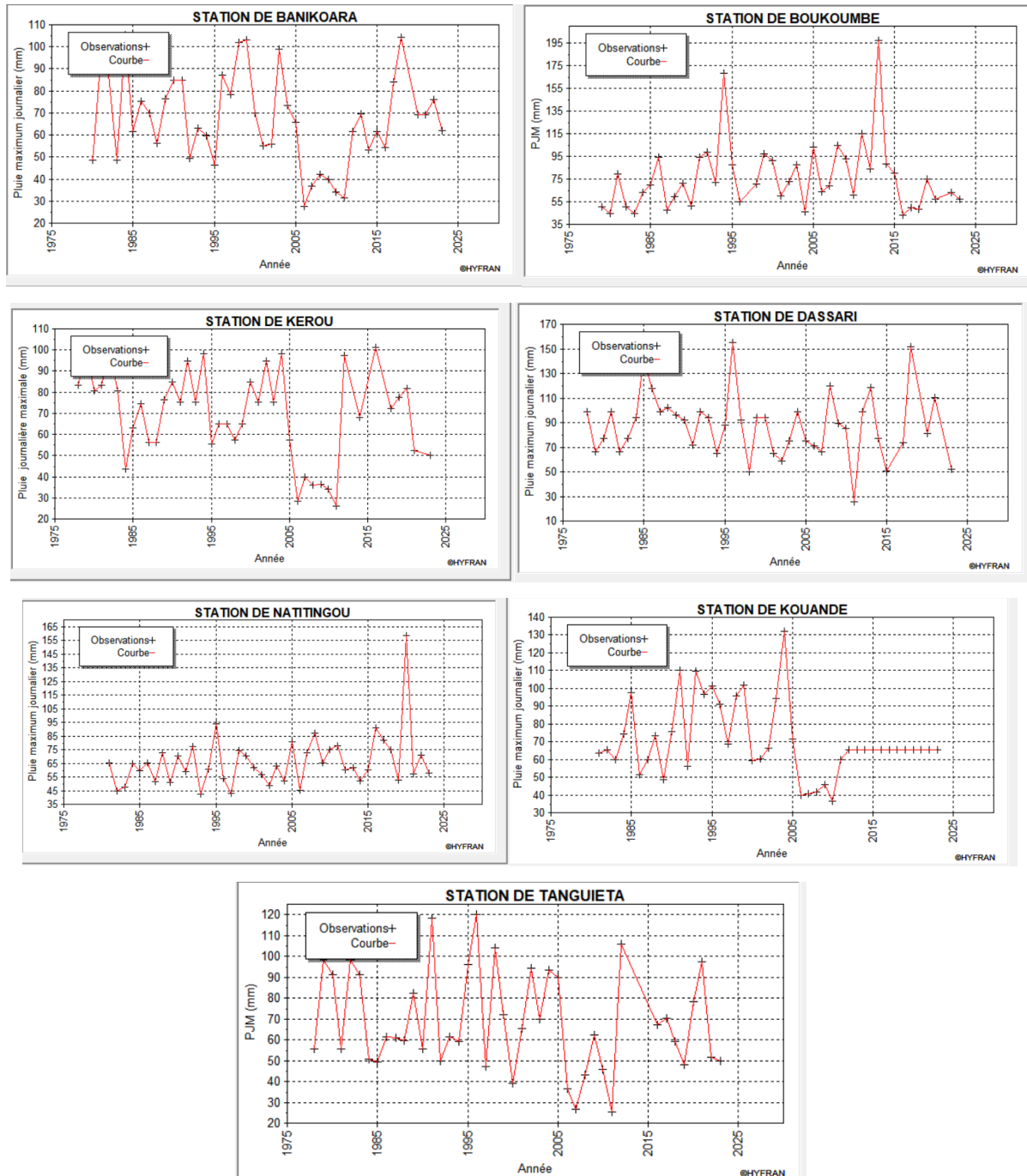


Figure 11 : Evolution des pluies maximales des stations

D. Présentation de variabilité des pluies futures

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

De l'analyse de la figure 11 qui présente la variabilité du modèle HADGEM2, on retient que les maximums de pluie journalière varient entre plusieurs années pour chaque station. Ainsi, le tableau suivant présent les résultats de l'analyse du figure 11 où on note

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

une variation des pluies maximales journalières au-dessus de la moyenne au niveau de chaque station.

Tableau 15 : Résultats de l'analyse sur la variation des PMJ des données futures

Stations	Période de variation des PMJ	Variations (mm)	Année des pics des PMJ	Pic des PMJ
Banikoara	2035 à 2037	68,19 à 130,68	2031 2037 2049	95,94 130,68 94,28
Boukoumbé	2030 à 2032 2035 à 2037 2045 à 2050	86,99 à 125,62 86,88 à 170,58 72,81 à 116,46	2031 2036 2037	125,62 143,79 170,58
Dassari	2030 à 2032 2035 à 2037 2045 à 2050	95,21 à 119,9 88,89 à 173,21 79,26 à 124,29	2031 2037 2050	119,79 173,21 124,29
Kérou	2030 à 2032	88,49 à 158,59	2031 2037 2049	158,59 236,75 152,11
Kouandé	2030 à 2032 2035 à 2037 2049 à 2051	75,18 à 96,08 70,44 à 131,06 67,62 à 98,42	2036 2037	110,57 131,06
Natitingou	2030 à 2032 2035 à 2037	75,05 à 105,66 68,09 à 156,93	2036 2037	126,91 156,93
Tanguiéta	2032 à 2034 2037 à 2039 2049 à 2051	91,59 à 111,53 72,21 à 167,55 79,23 à 106,53	2024 2039	135,74 167,55

On constate de l'analyse de ce tableau on observe, un pic élevé des PMJ de l'année 2037 pour presque toutes les stations.

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

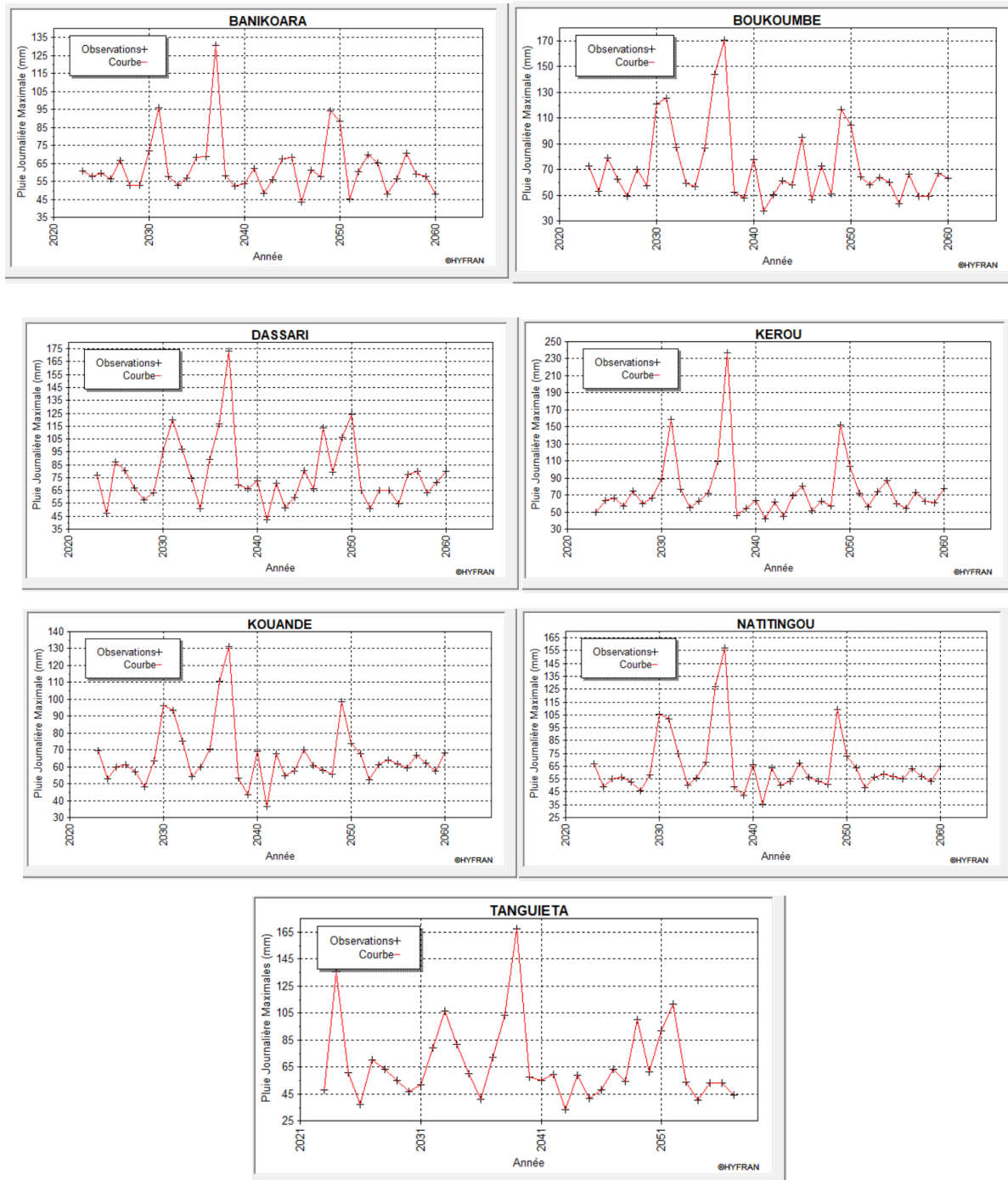


Figure 12 : Variabilité des pluies futures du modèle HADGEM2

3.6. Spatialisation des séries de données

Afin d'évaluer la variabilité spatiale des précipitations extrêmes sur le bassin versant de la Pendjari, nous avons utilisé la méthode de l'inverse des distance en puissance des hauteurs de pluie maximales enregistrées par l'ensemble des stations pluviométriques. Cette méthode a permis de cartographier la distribution spatiale des événements extrêmes et d'analyser leur évolution d'une station à l'autre. Deux approches de krigeage

ont été utilisées : l'une basée sur les valeurs maximales annuelles de PMJ, l'autre sur leurs valeurs moyennes. Les figures 12 à 15 illustrent les résultats obtenus pour les données observées et simulées.

3.6.1. Répartition spatiale des séries de données de pluies d'observations

E. Pour les maximas de PMJ

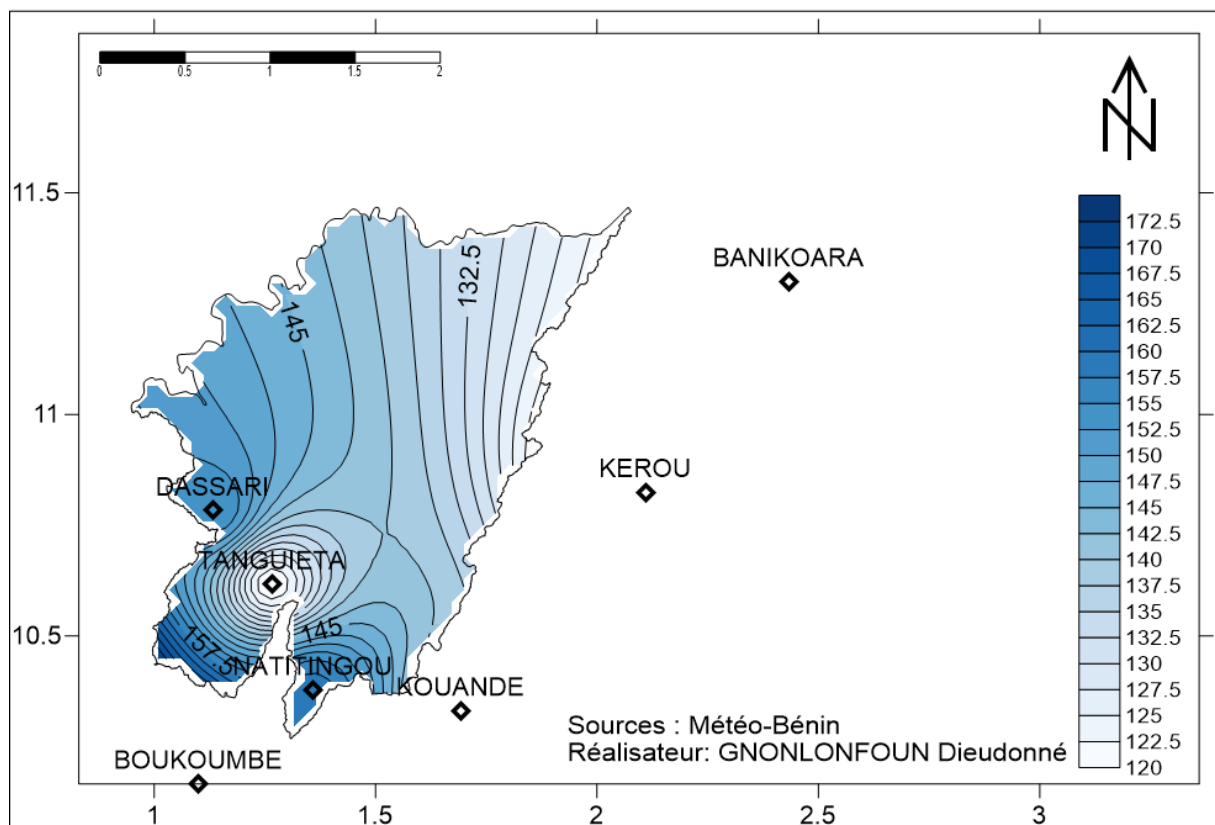


Figure 13 : Spatialisation des valeurs maximales des PMJ

Cette Figure met en évidence une faible variabilité spatiale des précipitations sur le BV. Les stations de Boukoubmé et Natitingou enregistrent les plus fortes précipitations qui varient de 157 mm à 172,5 mm (couleur bleu foncé), tandis que les autres stations présentent une faible précipitation ou modérée, c'est le cas des stations de Banikoara et Dassari. De plus, on constate que la quantité de pluie diminue de la station de Boukoubmé à la station de Banikoara.

On en déduit que les précipitations diminuent d'une station à une autre dans la direction sud-nord du bassin.

E. Pour les moyennes des PMJ

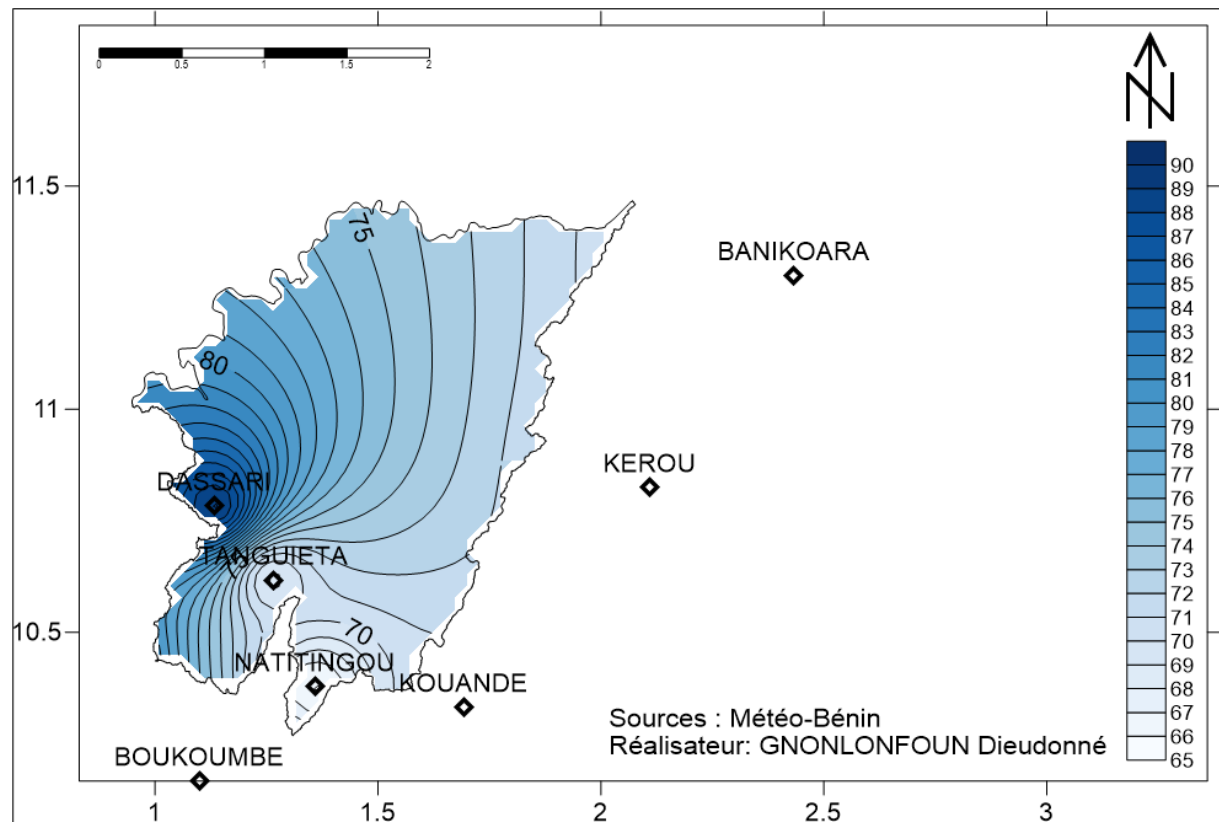


Figure 14 : Spatialisation des valeurs moyennes des PMJ

De l'analyse de cette Figure, on observe une forte précipitation au niveau des stations de Dassari et de Boukoubmé avec une valeur qui varie 80 mm à 90 mm (couleur bleu foncé), contrairement aux autres stations où les pluies sont faibles ou moyennes ; c'est le cas des stations de Banikoara et de Natitingou. On note également une diminution des précipitations de la station de Dassari à la station de Banikoara.

On en déduit que les précipitations diminuent d'une station à une autre de l'ouest à l'est du bassin.

Des deux Figures pour les données observées, il ressort que les stations de Boukoubmé, de Natitingou et de Dassari située à l'ouest du bassin enregistrent les précipitations les plus fortes contrairement aux stations de Kérou, de Kouandé et de Banikoara située à l'est du bassin qui enregistrent des faibles pluies, de même, on constate un gradient de diminution des pluies extrêmes du sud vers le nord du bassin.

3.6.2. Répartition spatiale des séries de données de pluies futures

F. Pour les maximas de PMJ

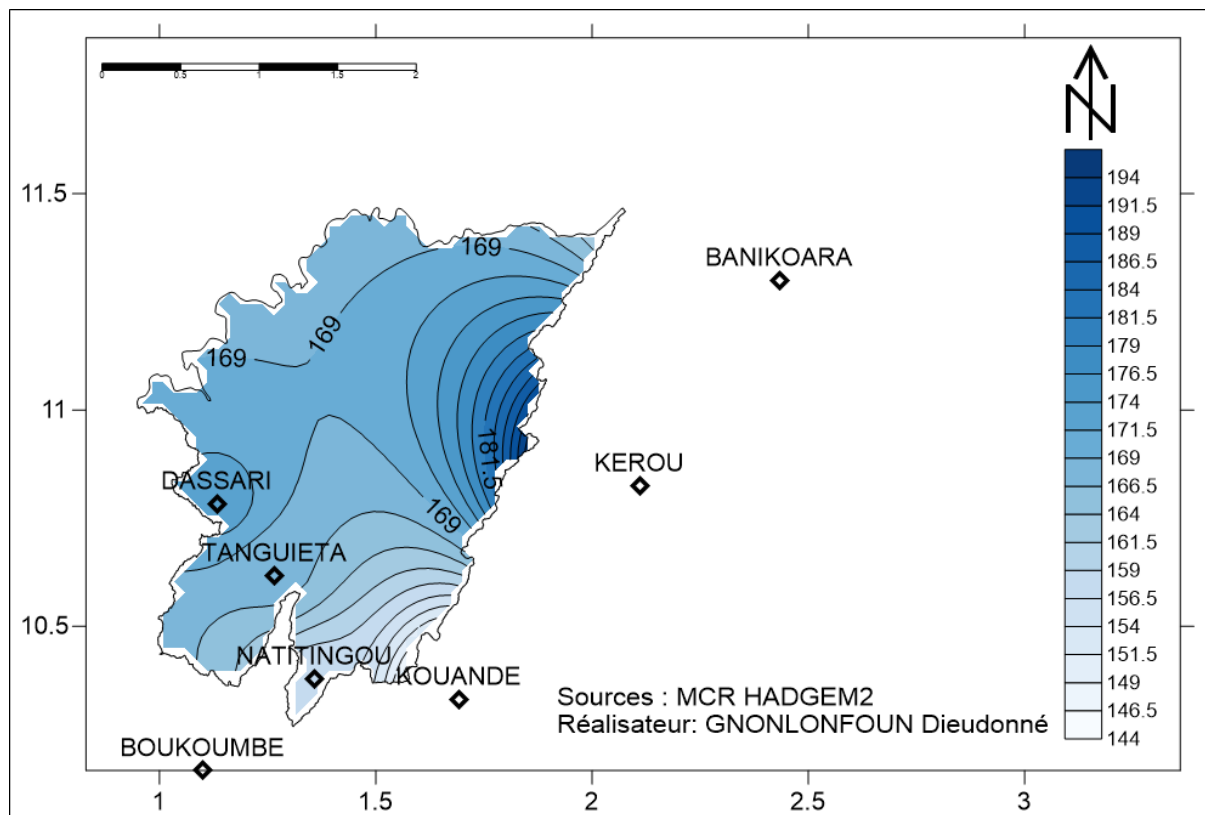


Figure 15 : Spatialisation des valeurs maximales des PMJ

De l'analyse de cette figure, on observe une forte variabilité spatiale des précipitations sur le BV qui varie de 169 mm à 194 mm (couleur bleu et couleur bleu foncé). Les stations de Boukoumbé, de Kérou et Dassari enregistrent les plus fortes précipitations de même que certaines stations qui enregistrent des valeurs plus faibles ou moyennes (Natitingou, Kouandé). On observe également une augmentation des précipitations de la station de Boukoumbé à la station de Kérou.

On en déduit que les précipitations augmentent d'une station à une autre dans la direction sud-nord du bassin.

G. Pour les moyennes des PMJ

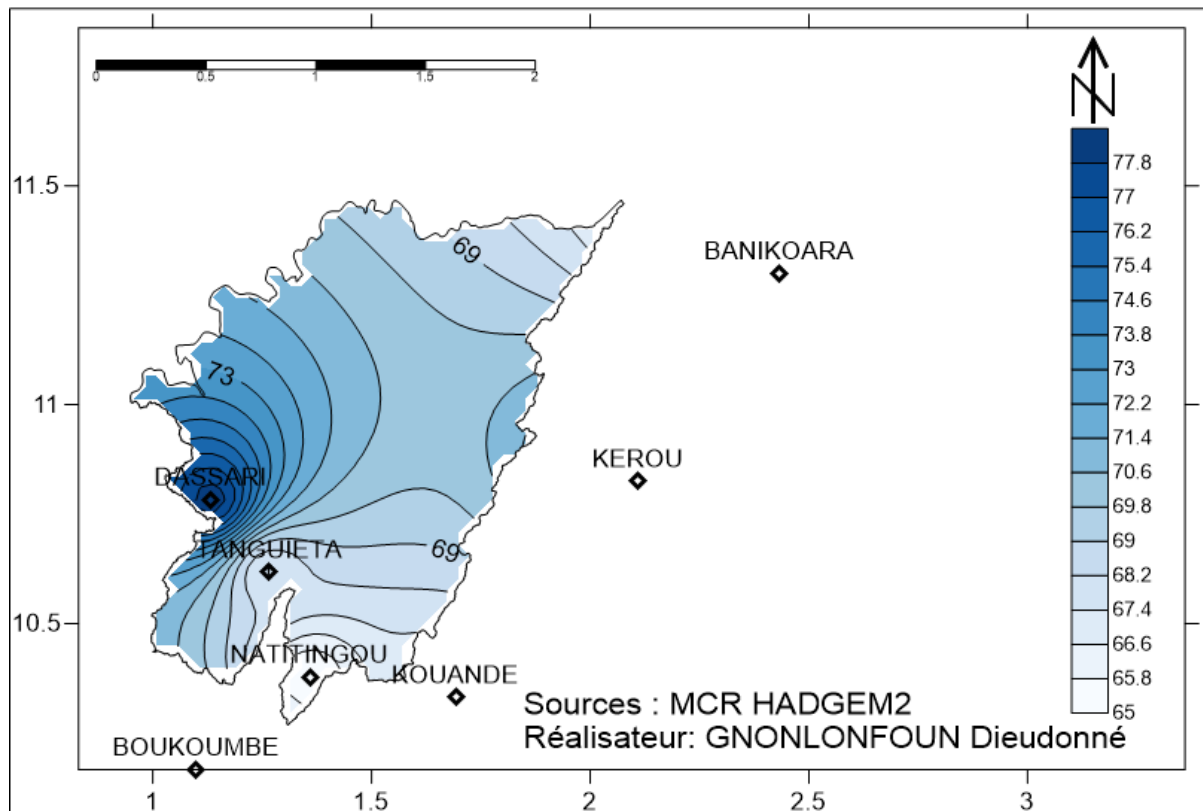


Figure 16 : Spatialisation des valeurs moyennes des PMJ

De l'analyse de cette Figure, on observe une forte variabilité spatiale des précipitations sur le BV. Les stations de Boukoumbé, de Kérou et Dassari enregistrent les plus fortes précipitations avec une portée 73 mm à 77,8 mm (couleur bleu et couleur bleu foncé), de même que d'autres stations présentent une faible précipitation ou moyenne, c'est le cas de et de Tanguéta. On observe également une diminution des précipitations de la station de Banikoara à la station Dassaride excepter celle de Kérou

On en déduit que les précipitations diminuent d'une station à une autre de l'ouest vers l'est du bassin.

De l'analyse ces Figures pour les données futures, on observe des précipitations abondantes sur la quasi-totalité des stations, les plus fortes pluies se trouvent dans la partie ouest du bassin et on constate un gradient de diminuent des pluies extrêmes du sud vers le nord du bassin.

3.7. Evaluation du risque d'inondation

H. Détermination du niveau d'alerte des séries de pluies des stations étudiées

Le tableau suivant nous présente les niveaux d'alertes de chaque station des données pluies observées

Tableau 16: Niveaux d'alertes de chaque station des données pluies observées

Stations	Banikoara	Boukoubé	Dassari	Kérou	Kouandé	Natitingou	Tanguiéta
Niveaux d'alertes (Risque)							
Vert (faible) Pluie < 30 mm							
Jaune (moins élevé) Pluie entre 30 – 60 mm							
Orange (élevé) Pluie entre 60 – 80 mm	76,18	60,04		66,82	65,47	79,5	65,1
Rouge (très élevé) Pluie > 80 mm			93,82				

On constate de l'analyse de ce tableau que toutes les stations ont une valeur supérieure à 60 mm, on peut dire qu'on observe un risque d'inondation élevé sur le bassin de la Pendjari ; de même, on constate que tous les stations sauf celle de Dassari ont une hauteur moyenne de pluie compris entre 60 – 80 mm (niveau d'alerte de couleur orange) avec un risque d'inondation élevé tandis qu'au niveau de la station de Dassari, le niveau d'alerte est de couleur rouge (pluie > 80 mm) donc le risque d'inondation est très élevé.

On en déduit que les zones d'influence de la station la plus susceptible aux inondations sont celles de Dassari et les autres stations sont aussi susceptibles aux inondations, mais avec un risque moins élevé à celui de Dassari.

I. Détermination du niveau d'alerte des séries de pluies futures

En ce qui concerne les données de pluies futures, nous avons pris en compte la moyenne des valeurs de PMJ des années de 2036 à 2040.

Le tableau suivant nous présente les niveaux d'alertes de chaque station des données de pluies futures

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

Tableau 17 : Niveaux d'alertes de chaque station des données de pluies futures

Stations	Banikoara	Boukoumbé	Dassari	Kérou	Kouandé	Natitingou	Tanguiéta
Niveaux d'alertes (Risque)							
Vert (faible) Pluie < 30 mm							
Jaune (moins élevé) Pluie entre 30 – 60 mm							
Orange (élevé) Pluie entre 60 – 80 mm	72,75148085						
Rouge (très élevé) Pluie > 80 mm		98,5019386	99,6583133	101,874815	81,5394824	88,324417	88,4275114

On constate de l'analyse de ce tableau que toutes les stations ont une valeur supérieure au seuil de 70 mm, on peut dire qu'on observe un risque d'inondation élevé sur le bassin de la Pendjari ; de même, on constate que toutes les stations pluviométriques ont une hauteur de pluie supérieure au seuil de 80 mm (niveau d'alerte de couleur rouge) avec un risque d'inondation très élevé, excepter la station de Banikoara où on note une hauteur de pluie comprise entre 60 – 80 mm (le niveau d'alerte est de couleur orange) donc le risque d'inondation est élevé.

On en déduit que les zones d'influence de toutes les stations pluviométriques du bassin versant sont susceptibles aux inondations.

3.8. Comparaison des variabilités actuelles et futures des PMJ

Les variations des PMJ sont similaires entre les données observées et celles simulées par le modèle HADGEM2 pour la plupart des stations.. En prenant l'exemple des stations de Kérou et de Dassari, nous avons trois années de variations au niveau du modèle HADGEM2 (2031,2037 et 2049 pour Kérou et 2050 pour Dassari) , de même pour les données observées (les années 1985, 1996 et 2018 pour Banikoara et 1982, 2016 et 2012 pour Kérou) ; contrairement à la station de Boukoumbé dont nous avons trois années de variations au niveau du modèle HADGEM2 (2036,2037 et 2031) et deux années au niveau des données d'observations (1994 et 2013). L'analyse des PMJ et du test de Mann-Kendall révèlent une tendance à la hausse généralisée, tant pour les données observées que pour les projections futures sur toutes les stations à l'exception de Dassari (pour les

données d'observations) et Boukoumbé (pour les données simulées). Les hauteurs d'eau maximale futures sont généralement supérieures ou proches aux observations, sauf à Boukoumbé où le modèle HADGEM2 enregistre une hauteur inférieure à celle des observations. En prenant l'exemple des stations de Banikoara et de Kérou nous avons respectivement comme maximums 130,68mm et 236,75mm pour le MCR alors que nous avons 105,3mm et 101,4mm pour les données d'observations et pour la station de Boukoumbé nous avons comme maximum 170,58mm pour le MCR alors que nous avons 197,7mm pour les données d'observations.

Ensuite, l'analyse spatiale révèle une tendance inverse entre les pluies actuelles et futures ; les premières diminuent d'une station à l'autre, tandis que les secondes augmentent. Ce cas s'observe pour les valeurs maximas des PMJ contrairement aux données des moyennes des PMJ qui ont même tendance. Les maximas observés diminuent en direction du nord du bassin, alors que les maximas simulés augmentent dans la même direction. Par ailleurs, les moyennes observées et futures décroissent d'ouest en est. Néanmoins, certaines stations ayant connu des pluies modérées par le passé ont subi des précipitations plus intenses à l'avenir, comme le cas des stations de Banikoara et de Kérou de l'exemple précédent. Cela peut être dû à la variabilité climatique qui a provoqué des changements dans l'orientation géographique des zones touchées par les fortes précipitations.

L'analyse des moyennes des PMJ par rapport au seuil d'inondation de N'Dali montre que les données d'observation révèlent un risque d'inondation élevé pour presque toutes les stations. Le MCR confirme ce risque avec un niveau très élevé du risque d'inondation sur toutes les stations excepter la stations de Banikoara avec un risque élevée.

De tout ce qui précède, on retient que les pluies futures seront non seulement plus variables et plus intense sur toutes les stations et les stations avec des niveaux d'alerte modérés aujourd'hui pourraient être considérées comme à risque élevé dans d'ici 2060.

3.9. Discussion

L'évaluation de la variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondations sur le bassin versant de la Pendjari à Porga a été effectuée suivant l'analyse fréquentielle, la spatialisation à l'aide de la méthode d'inverse des distances, la comparaison des moyennes de PMJ par rapport au seuil du risque d'inondation de N'Dali et une comparaison des données future et actuelle.

L'analyse fréquentielle nous montre que les séries données d'observations s'ajustent mieux avec de différentes lois selon la station. Les résultats obtenus convergent avec les travaux de Djigbo et al. (2021), qui ont révélé les limites de l'application généralisée de la distribution de Gumbel dans l'analyse fréquentielle des événements pluvieux extrêmes. L'analyse des séries des données des précipitations maximales journalières et le test de Mann Kendall révèlent une tendance à la hausse sur le bassin et une tendance à la hausse sur toutes les stations (Tanguiéta, Kérou, Boukoumbé, Banikoara, Kouandé et Natitingou) excepter celle de Dassari. Ainsi, l'analyse montre une augmentation des précipitations maximales journalières (PMJ) sur toutes les stations, suggérant un risque accru d'inondation dans ces zones. La longueur des séries de données utilisées à un impact significatif sur la stabilité des estimations des quantiles de retour, et par conséquent sur l'évaluation des risques extrêmes. En outre dans le sous-bassin de Nouhao, l'étude de Doumounia et al. (2014), ont montré une augmentation des indices pluviométriques. De plus, on constate de l'analyse de la spatialisation des maximas et de la moyenne des PJM que les pluies se font rares vers le nord et sont plus forte dans la partie ouest du bassin. Cela peut s'expliquer par le phénomène des pluies orographiques à cause de la présence de la chaîne de montagne de l'Atacora. Les zones d'influence des stations à fortes précipitations sont particulièrement vulnérables aux inondations. Nos résultats ne concordent pas entièrement avec ceux de Koumassi (2019) qui, utilisant une analyse multicritère, a identifié des risques d'inondation importants dans le nord-ouest du bassin de la Pendjari. Cette divergence s'explique en partie par l'adoption d'une méthodologie et l'utilisation des paramètres différents dans notre étude.

Ensuite, pour l'évaluation du risque d'inondation, on observe que toutes les stations montrent une hausse significative des niveaux d'alerte dans les projections futures et toutes les stations présentent des niveaux d'alerte élevés pour les données actuelles, ce qui indique une augmentation potentielle du risque d'inondation dans ces régions. Les

zones à haut risques d'inondation (comme Dassari, Natitingou, Boukoumbé) sont celles situées dans des zones vulnérables aux précipitations abondantes, souvent près des rivières ou des plaines inondables. Nos résultats diffèrent en partie de ceux de Dègla et al. (2014), qui, à travers une analyse multicritère, ont identifié les secteurs nord et ouest du bassin de la Sota comme les plus vulnérables aux inondations. Les différences observées peuvent s'expliquer par la délimitation géographique distincte de nos zones d'étude, ainsi que par l'utilisation de méthodes d'analyse non identiques.

D'après les comparaisons des pluies actuelles et futures effectuées, on observe une hausse tendance des événements pluvieux extrêmes dans la majorité des stations, bien que cette tendance soit modérée ou inversée dans certaines zones. Les données futures suggèrent que les stations devraient se préparer à une augmentation de PMJ, ce qui peut avoir des implications importantes en termes de gestion des risques d'inondation. La variabilité climatique a provoqué des changements dans l'orientation géographique des zones touchées par les fortes précipitations cela a provoqué une augmentation des pluies futures sur le bassin. Ce qui rend le bassin versant de la Pendjari plus vulnérable à la variabilité future des PMJ extrêmes et aux risques d'inondation. Ce résultat est en conformité avec celui des travaux effectués par Lawin et al. (2013) qui ont indiqué une augmentation des précipitations dans le futur.

Conclusion générale et Perspectives

- **Conclusion**

Cette étude a pour objectif de comprendre l'évolution spatiale des pluies extrêmes et leurs conséquences sur les risques d'inondations dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga en étudiant les événements passés et futurs afin de mieux comprendre leurs évolutions futures.

A cet effet, nous avons effectué une analyse fréquentielle et la répartition spatiale des extrêmes pluviométrique sur sept stations (Banikoara, Boukounbé, Dassari, Kérou, Kouandé, Natitingou et Tanguiéta). Parallèlement, une comparaison a été effectuée entre les seuils d'alerte de la station de N'dali et les valeurs moyennes des PMJ sur cinq ans des autres stations pour l'évaluation du risque d'inondation. Pour cela, 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 spatialisation des maximas et des moyennes des extrêmes de pluie sur SURFER 9 et afin la comparaison des variabilités actuelles et futures.

À l'issue de cette étude, il apparaît que les précipitations ont été caractérisées par une grande variabilité interannuelle dans toutes les stations, ce qui a pour conséquence directe d'accroître les risques d'inondation. La comparaison des données actuelles et futures révèle que le bassin versant est plus vulnérable aux futurs événements pluvieux, caractérisés par une plus grande récurrence des épisodes inondables. Mais une évaluation de la vulnérabilité spatiale et de de l'aléa à l'inondation est nécessaire pour mieux cerner les conséquences des inondations.

- **Perspectives**

Compte tenu de ces résultats, il est recommandé d'entreprendre des recherches spécifiques pour mieux comprendre les extrêmes pluviométriques dans la zone étudiée. Ces recherches pourraient porter sur

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

- La poursuite de cette étude à l'échelle de tous les grands bassins et sous-bassins du Bénin, en s'appuyant sur des séries temporelles plus longues, afin de mieux comprendre la dynamique hydrologique des différents bassins ;
- L'amélioration de la collecte des données hydroclimatiques, en particulier celles relatives aux précipitations, qui souffrent de nombreuses lacunes,
- L'aménagement de canaux de dérivation afin d'évacuer les excédents d'eau et de réduire les risques d'engorgement dans certaines zones.

Références bibliographiques

1. Amoussou E., Camberlin P., Totin Vodounou S. H., Trambly Y., Houndenou C., MAHÉ G., Paturel J. E. Boko M. (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) ;
2. 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. ;
3. 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> ;
4. 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 ;
5. Doumounia A., Zeba A., Damiba L., Zougmore F. et Nikiema M. (2020), Analyse de la variabilité climatique dans le sous bassin de Nouhao au centre-est du Burkina Faso, p66. (<https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticlepdf/125/17/1/115510>) ;
6. Djigbo Félicien et al (2021), Heavy rainfall frequency analysis in the Benin section of the Niger and Volta Rivers basins : is the Gumbel's distribution a one-size-fits-all model ? (<https://piahs.copernicus.org/articles/384/187/2021/>) ;
7. Dègla Herve Koumassi, A. Eric Tchibozo, Expedit Wilfrid Vissin et Christophe S. Houssou (2014), SIG ET TÉLÉDÉTECTION POUR L'OPTIMISATION DE LA CARTOGRAPHIE DES RISQUES D'INONDATION DANS LE BASSIN DE LA SOTA AU BÉNIN ;
8. Géorisques, (Définition du risque d'inondation), [en ligne](<https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/inondations/prevention-du-risque>), (29/10/2014) ;
9. Hounnondaho Freddy Zinsè (2023) Utilisation de l'Apprentissage Automatique et des Données Satellitaires pour l'Amélioration de la Prédiction des Crues : Cas du Bassin de l'Ouémé à Bétérou, p45. :

10. Filahi S., Mouhir L., Tanarhte M., Tramblay Y., 1-4 juill. 2015. Tendance et variabilité des événements extrêmes au Maroc. Actes du XXVIIIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 1-4 juillet 2015, (pp. 463-468) ;
11. Hangnon H., De Longueville F., Ozer P. (2015) PRÉCIPITATIONS ' EXTRÊMES' ET INONDATIONS À OUAGADOUGOU : QUAND LE DÉVELOPPEMENT URBAIN EST MAL MAÎTRISÉ ;
12. Hanchane M. 2016 VARIABILITE DES PLUIES EXCEPTIONNELLES DANS LE BASSIN VERSANT DE SEBOU (MAROC) : INTENSITE ET PERIODE DE RETOUR SELON L'HYPOTHESE DE NON STATIONNARITE TEMPORELLE ;
13. Houndenou C., Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide : l'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation, 1999. Thèse de doctorat de géographie, UMR 5080, CNRS « climatologie de l'espace tropical », Université de Bourgogne, centre de recherche de climatologie, Dijon, 341 p. ;
14. 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 ;
15. Idieti E. M., Les hydro-écorégions du Bassin de la Pendjari au Bénin : Analyse des déterminants socio-économiques et environnementaux de la dynamique des écosystèmes naturels. 2012, Thèse de doctorat de géographie. Université d'Abomey-Calavi 229 p. ;
16. 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
17. Koumassi, CARACTERISATION SPATIALE DU RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN VERSANT DE LA VOLTA AU BENIN. Thessaloniki - Grèce 29 mai au 1 juin 2019 ;
18. Kouassi A. M., 2011. Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur le régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest ;

19. 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. Zougmore, and H. Roy-Macauley. In West African Agriculture and climate change : A Comprehensive Analysis. Chapter 3 : Benin. PP-448 ;
20. Le Barbe L., Alé G., Millet B., Texier H., Borel Y., et Gualde R., Les ressources en eau superficielles de la République du Bénin. IRD/DH, Cotonou, (1993) 540 p. ;
21. Marius Louis Djidénu DJOSSOU, D. J. Kodja, E. W. Vissin (2020) Analyse de la Variabilité des Extrêmes Climatiques dans le Bassin Versant de la Pendjari à l'Exutoire de Porga au Bénin. International Journal of Progressive Sciences and Technologies,17(1),211–223
(<https://ijpsat.org/index.php/ijpsat/article/view/2118>) ;
22. Madsen, M. R. (2013). Towards a Sociology of International Courts. 1, 1–29 ;
23. M. Roche Ingénieur Hydrologue à l'Electricité de France Chargé de la Direction des Études au Bureau Central Hydrologique de l'URSTOM Maître de Conférences à l'Ecole Nationale du génie Rural : HYDROLOGIE DE SURFACE ;
24. 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 ;
25. Pierre Ouassa, Romaric Ogouwalé et Olivier Koudamiloro,(2021) CHARACTERIZATION OF HYDROCLIMATIC RISKS IN THE BENINESE WATERSHED OF THE PENDJARI AT THE PORGA OUTLET (WEST AFRICA),248 p. (<http://american-jiras.com/Ouassa-Ref1-ajira310521.pdf>):
26. Projet n°00086748, 2015 rapport final du projet SAP sur l'étude de la détermination des seuils et les niveaux d'alerte relatifs des risques d'inondation pluviales du Bénin ;
27. Patrice Melé et Corinne Larrue, Territoires d'action : Aménagement, urbanisme, espace, *L'Harmattan*, coll. « Itinéraires géographiques », 2008, 274 p. ([ISBN 978-2-296-06304-4](#) et [2-296-06304-7](#)), p. 200
28. Rokia Azioume, Hafiza Tatar et Zeineddine Nouaceur, 2018, PLUIES EXTRÊMES ET RISQUE D'INONDATION DANS LA VILLE DE BISKRA (ALGERIE) ;
29. Reverso, (Définition pluies extrêmes), [en ligne][[alien\non+valide.htm](#)],(29/10/2014) ;

30. Vetofish, (Définition du réseau hydrographique), [en ligne] [[..\..\alien\reseau-hydrographique.htm](#)], (29/10/2014) ;
31. Salifou Samilou (2023), Impact de la variabilité climatique sur les inondations dans le bassin versant de l'Okpara à Nano, p 37 ;
32. Sebbar A., Badri W., Foughrach H., Hsaine M., Saloui A., 2011. Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004). Rev. Sécheresse, 22, 139-148.

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

ANNEXE

Annexe 1 : Résultats du test de Khi Carré pour des différentes stations d'observations

Stations	Résultats			
	X ²	P-value	Degré liberté	Nombre de classe
Log- Pearson type III				
Kérou	10,19	0,0373	4	8
Banikoara	1,16	0,9484	5	9
Loi de Log-Normal				
Kouandé	30,88	0,0000	6	5
Loi de Gumbel				
Dassari	9,12	0,1671	6	9
Natitingou	6,19	0,4027	6	9
Tanguiéta	10,79	0,0951	6	9
Loi de GEV				
Boukoumbé	4,51	0,4783	5	9

Annexe 2 : Résultats de khi Carré pour le modèle ECARTH

Stations	Résultats			
	X ²	P-value	Degré liberté	Nombre de classe
Loi de GEV				
Boukoumbé	7,89	0,0955	4	8
Kérou	5,37	0,2515	4	8
Natitingou	8,74	0,068	4	8
Tanguiéta	4,09	0,3945	4	8
Loi de Gumbel				
Banikoara	4,11	0,5344	5	8
Dassari	8,74	0,12	5	8

Variabilité spatiale des pluies extrêmes et risques d'inondation dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga

Kouandé	9,6	0,0874	4	8
---------	-----	--------	---	---

Annexe 3 : Résultats du test de Mann-Kendall pour les données d'observations

Station	Tau	P_value	Tendance
Banikoara	0.208695652173913	0.0417577437613553	Tendance Hausse
Boukoumbé	0.289855072463768	0.0201748106876165	Tendance Hausse
Dassari	-0.200966183574879	0.0499758039956242	Tendance Baisse
Kérou	0.072463768115942	0.483329542210873	Tendance Hausse
Kouandé	0.245410628019324	0.0143653988715284	Tendance Hausse
Natitingou	0.0270531400966184	0.798202201237337	Tendance Hausse
Tanguiéta	0.2128691	0.0381	Tendance Hausse

Annexe 4 : Résultats du test de Mann-Kendall pour les données futures

Station	Tau	P_value	Tendance
banikoara	0.0412517780938834	0.724828262869753	Tendance Hausse
boukoumbe	-0.0014224751066856	1	Tendance Baisse
dassari	0.0128022759601707	0.919887654078288	Tendance Hausse
kerou	0.069701280227596	0.546208417913761	Tendance Hausse
kouande	0.027027027027027	0.820972542308544	Tendance Hausse
natitingou	0.027027027027027	0.820972542308544	Tendance Hausse
tanguieta	0.1122995	0.358	Tendance Hausse

