



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI
=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU
=====



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

NASSARA Mahoussi Valerie

Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE Professionnelle en Hydrologie

***OPTION : Hydrologie quantitative et gestion intégrée des
ressources en Eau***

=====

EVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE SUIVANT LES SEUILS D'ALERTE
AUX INONDATIONS PLUVIALES DANS LES COMMUNES DE PORTO-
NOVO, COTONOU ET ALLADA

=====

Maître de Mémoire

Dr Jean HOUNKPE

Maître de Stage

Mr Boris Polynice ANATO

=====



PROMOTION : 2023-2024

Dédicaces

C'est avec un énorme plaisir et un cœur rempli d'amour, que je dédie ce travail spécialement à ma mère puis à mon père comme preuve de reconnaissance après m'avoir soutenu et encouragé tout au long de mes études.

Remerciements

Je voudrais avant tout, remercier Dieu tout puissant et très miséricordieux qui par son immense amour, sa bonté et sa fidélité m'a donné la force, le courage et m'a protégé tout au long de ce travail.

Ce travail a été accompli grâce à la générosité de maintes personnes. Qu'il me soit permis ici de leur adresser mes sincères gratitude et remerciements particuliers :

- A ma très chère mère Sophie ANAGO épouse NASSARA et mon très cher père Habib Blanc NASSARA, qui m'ont encouragé et soutenu durant ces années d'études ;
- Au Professeur Daouda MAMA, Directeur de l'Institut National de l'Eau (INE) ; le Professeur Flavien DOVONOU, Chef Département d'Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau ;
- A mon Maître de mémoire, Dr. Jean HOUNKPE, Enseignant-Chercheur à l'Institut National de l'Eau (INE) pour sa disponibilité et le temps qu'il m'a accordé tout le long de ce travail malgré ses nombreuses occupations. Ses conseils m'ont été d'une grande utilité, que le Tout Puissant l'en bénisse ;
- A mon maître de stage Mr Boris ANATO, Directeur des prévisions et Equipements Météorologiques pour ses précieux conseils et le temps consacré pour mon encadrement ;
- A Mr Jérôme AHOUANDJINO, Doctorant à la CIPMA, qui malgré ses nombreuses occupations a su m'accorder de temps en temps l'attention nécessaire pour la réalisation de mon travail ;
- Aux Enseignants du Département d'Hydrologie et de Gestion des Ressources en Eau (HGRE) 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 ;
- A Monsieur Franck OLODO pour son effort sans cesse apporté lors de mon stage ;
- A 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 ;
- A tous mes camarades de promotion et principalement à ADOKO Cyrano, SESSOU Floride et KPOMALEGNI Kévine pour l'ambiance et l'entraide ;

- A tous ceux qui d'une manière ou d'une autre m'ont aidé et soutenu dans la réalisation de ce travail.

Résumé

L'Afrique, particulièrement vulnérable aux changements climatiques, connaît une augmentation des phénomènes hydrométéorologiques extrêmes, notamment des inondations pluviales dans ses zones urbaines en expansion. Le Bénin, pays côtier d'Afrique de l'Ouest, est fortement touché, comme l'illustrent les cas de Cotonou, Porto-Novo et Allada. Cette étude vise à évaluer l'évolution de la pluviométrie en relation avec les seuils d'alerte aux inondations pluviales dans les communes de Cotonou, Porto-Novo et Allada, afin de mieux comprendre et améliorer la prévision des inondations dans ces zones urbaines. La méthodologie adoptée consiste à faire d'abord la collecte et l'échantillonnage des données, ensuite la caractérisation des pluies journalières, puis l'analyse fréquentielle et seuils d'alertes et enfin évaluer l'évolution des quantiles de pluies et seuils d'alertes.

Les résultats révèlent une absence de rupture significative pour les pluies annuelles maximales au-delà des seuils rouges, mais une augmentation de celles au niveau des seuils orange depuis les années 2000, probablement liée aux changements climatiques. Cependant, seules les pluies annuelles maximales au niveau des seuils orange à Allada présentent une tendance significative à la hausse. Ces résultats mettent en évidence l'importance d'une gestion renforcée, en particulier pour Porto-Novo et Cotonou, qui se révèlent plus vulnérable. Cette approche intégrée vise à renforcer la capacité d'adaptation des villes et à minimiser les impacts socio-économiques des inondations pluviales, contribuant ainsi à une gestion plus durable des risques climatiques dans la région.

Mots clés : Pluviométrie, Inondation, Seuils d'alerte, Communes (Porto-Novo, Cotonou et Allada)

Abstract

Africa, particularly vulnerable to climate change, is experiencing an increase in extreme hydrometeorological events, notably pluvial floods in its rapidly expanding urban areas. Benin, a coastal country in West Africa, is significantly affected, as demonstrated by the cases of Cotonou, Porto-Novo, and Allada. This study aims to assess rainfall trends in relation to pluvial flood alert thresholds in the municipalities of Cotonou, Porto-Novo, and Allada, with the goal of improving flood prediction and management in these urban areas. The adopted methodology involves collecting and sampling data, characterizing daily rainfall, conducting frequency and alert threshold analyses, and evaluating changes in rainfall quantiles and alert thresholds.

The results reveal no significant break for annual maximal rainfall above the red thresholds but show an increase in the annual maximal rainfall between orange thresholds since the 2000s, likely linked to climate change. However, only the data between orange threshold in Allada displays a significant upward trend. These results highlight the importance of strengthened management, in particular for Porto-Novo and Cotonou, which appear to be more vulnerable. This integrated approach aims to enhance urban resilience and reduce the socio-economic impacts of pluvial floods, thereby contributing to more sustainable climate risk management in the region.

Keywords: Rainfall, Flooding, Alert thresholds, Municipalities (Porto-Novo, Cotonou and Allada)

Sigles et acronymes

AIC	:	Critère d'Information d'Akaike
AMMA	:	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
ANM	:	Agence Nationale de la Météorologie
BIC	:	Critère d'Information Bayésien
GEV	:	Distribution des Valeurs extrêmes Généralisées
GIEC	:	Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
HGRE	:	Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau
HYFRAN	:	Hydrological Frequency Analysis
INE	:	Institut Nationale de l'Eau
INRS-ETE	:	Institut Nationale de la Recherche Scientifique Eau-Terre et Environnement
LHA	:	Laboratoire d'Hydrologie Appliquée
ONU	:	Organisation des Nations Unies
SAP	:	Système d'Alertes précoces
SAP-BENIN	:	Système d'Alertes Précoces au Bénin
UAC	:	Université d'Abomey-Calavi
UNISDR	:	United National Strategy for Disaster Reduction

Listes des figures

FIGURE 1: CARTE DE LOCALISATION DE LA VILLE DE COTONOU	22
FIGURE 2: CARTE DE LOCALISATION DE LA VILLE DE PORTO-NOVO	23
FIGURE 3 : CARTE DE LOCALISATION DE LA VILLE D'ALLADA.....	24
FIGURE 4: EVOLUTION DES MAXIMAS ANNUELS DES TROIS STATIONS.....	39
FIGURE 5 : AJUSTEMENT DE LA DISTRIBUTION DE GUMBEL AUX PRECIPITATIONS MAXIMALES DE COTONOU	43
FIGURE 6: AJUSTEMENT DE LA DISTRIBUTION DE WEIBULL AUX PRECIPITATIONS MAXIMALES DE PORTO-NOVO .	45
FIGURE 7: AJUSTEMENT DE LA DISTRIBUTION DE GUMEL AUX PRECIPITATIONS MAXIMALES D'ALLADA.....	47
FIGURE 8: PRESENTATION DU DEPASSEMENT DES SEUILS D'ALERTE SUIVANT CHAQUE STATION.....	51
FIGURE 9:EVOLUTION DE LA VARIABLE U DU PETIT DU DEPASSEMENT DES SEUILS ROUGES.....	53
FIGURE 10: EVOLUTION DE LA VARIABLE U DU PETIT DU DEPASSEMENT DES SEUILS ORANGE	55
FIGURE 11: EVOLUTION DE LA VARIABLE U DU PETIT DU DEPASSEMENT DES SEUILS JAUNE.....	57

Liste des tableaux

TABLEAU 1: COORDONNEES ET PERIODE DES STATIONS.....	28
TABLEAU 2: TEST D'HYPOTHESE DE LA STATION DE COTONOU:.....	42
TABLEAU 3: PARAMETRE DE LA LOI DE GUMBEL ET DU TEST D'ADEQUATION.....	42
TABLEAU 4 : RESULTATS DES TESTS D'HYPOTHESE A PORTO-NOVO	44
TABLEAU 5: PARAMETRES DE LA LOI DE WEIBULL ET DU TEST D'ADEQUATION.....	44
TABLEAU 6: RESULTATS DES TESTS D'HYPOTHESE A ALLADA	46
TABLEAU 7: : PARAMETRE DE LA LOI DE GUMBEL ET DU TEST D'ADEQUATION.....	46
TABLEAU 8: VALEURS DES PRECIPITATIONS SUIVANT LES PERIODES DE RETOUR.....	47
TABLEAU 9: SEUIL D'ALERTE DES DIFFERENTES STATIONS AVEC LES PERIODES DE RETOUR ASSOCIEES.....	48
TABLEAU 10 : RESULTATS DU TEST DE TENDANCE DE MANN-KENDALL	57

Tables des matières

Dédicaces	2
Remerciements.....	3
Résumé	5
Abstract	6
Sigles et acronymes.....	7
Listes des figures.....	8
Liste des tableaux	9
Tables des matières	10
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GENERALE	12
1.1. Contexte et justification	13
1.2. Revue de littérature.....	14
1.2.1. Clarification conceptuelle	14
1.2.2. Etudes antérieures sur la pluviométrie et les inondations au Benin	16
1.3. But de la recherche.....	17
1.4. Questions de recherche	17
1.5. Objectif du mémoire	17
1.5.1. Objectif générale.....	17
1.5.2. Objectifs spécifiques.....	17
1.6Hypothèses de travail	18
1.7. Structure du mémoire	19
CHAPITRE 2 : DONNEES, MATERIELS ET METHODES	20
2.1. Milieu d'étude	21
2.1.1. Localisation	21
2.1.2. Climat	25
2.1.3. Végétation et sols	25
2.1.4 Relief et topographie	26
2.1.5. Hydrographie.....	26
2.1.6. Géologie	26
2.2. Données utilisées	27
2.2.1. Données pluviométriques	27
2.2.2. Données sur les seuils d'alertes	27
2.3. Matériels.....	28
2.4. Méthodes	28

2.4.1. Contrôle de la qualité des données.....	28
2.4.2. Méthode de traitement des données.....	29
2.4.2.1. Paramètres statistiques des précipitations extrêmes	29
2.4.2.2. Analyse fréquentielle et période de retour	32
2.4.2.3. Evolution des quantiles de pluie en relation avec les seuils d'alerte	36
2.5. Conclusion.....	37
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION	38
3.1. Caractérisations des pluies extrêmes des stations de Cotonou, Porto-Novo et d'Allada ..	39
3.2. Analyse fréquentielle et période de retour des inondations.....	41
3.2.1. Analyse fréquentielle.....	41
3.2.1.1. Station de Cotonou	41
3.2.1.2. Station de Porto-Novo	43
3.2.1.3. Station d'Allada	45
3.2.2. Périodes de retour des différentes stations.....	47
3.2.3. Seuils d'alertes des différentes stations	48
3.3. Comparaison de l'évolution des pluies en lien avec les seuils d'alertes pour chaque station	48
3.3.1. Dépassement des seuils par an sur les stations.....	48
3.3.2. Détection de rupture dans le dépassement des différents seuils d'alertes	51
3.3.2.1. Seuils rouge	51
3.3.2.2. Seuils orange	53
3.3.2.3. Seuils jaune	55
3.3.3 Détection de tendance dans le dépassement des différents seuils d'alertes	57
3.4. Discussion.....	58
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	60
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	62
ANNEXES.....	64

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GENERALE

1.1. Contexte et justification

Les inondations représentent l'un des risques naturels les plus répandus et les plus dévastateurs à l'échelle mondiale. Selon les données de l'Organisation des Nations Unies (ONU), les inondations ont affecté plus de 2,3 milliards de personnes dans le monde entre 1994 et 2013, causant des pertes économiques estimées à plus de 850 milliards de dollars (Doocy et al., 2013 ; UNISDR, 2015). Ce phénomène naturel touche de nombreux pays, qu'ils soient développés ou en développement, et ses impacts sont exacerbés par des facteurs tels que l'urbanisation rapide, le changement climatique et la dégradation des écosystèmes naturels.

Au Bénin, les inondations constituent un risque majeur, en particulier dans les zones côtières densément peuplées comme les communes de Porto-Novo, Cotonou et Allada. Ces régions sont régulièrement touchées par des épisodes d'inondations causés par des pluies intenses et des précipitations extrêmes, souvent amplifiées par des facteurs anthropiques tels que l'urbanisation non planifiée, le manque d'infrastructures de drainage adéquates et la dégradation des zones humides naturelles (Boko et al., 2012 ; Ogouwalé, 2006).

Les impacts des inondations dans ces zones sont dévastateurs, menaçant la vie des populations, endommageant les infrastructures critiques, perturbant les activités économiques et entraînant des coûts substantiels en termes de pertes et de dommages (Amoussou et al., 2014; Tunde et al., 2011). De plus, les populations les plus vulnérables, telles que les communautés à faible revenu et les populations marginalisées, sont souvent les plus durement touchées, aggravant ainsi les inégalités sociales et économiques existantes.

Face à ces défis, une compréhension approfondie de la pluviométrie et de sa relation avec les seuils d'alerte aux inondations est cruciale pour une meilleure gestion des risques dans ces zones vulnérables. Une telle analyse permettra d'améliorer les systèmes d'alerte précoce, de renforcer les mesures de prévention et d'atténuation, et de contribuer à une planification urbaine plus résiliente face aux inondations.

1.2. Revue de littérature

L'évolution de la pluviométrie et son impact sur les risques d'inondation sont des sujets de préoccupation majeure, particulièrement dans les zones urbaines d'Afrique de l'Ouest. Les changements climatiques ont entraîné une modification des régimes pluviométriques, avec des conséquences significatives sur la gestion des risques d'inondation (Koné et al., 2019).

Au Bénin, les communes de Cotonou, Porto-Novo et Allada sont particulièrement vulnérables aux inondations pluviales en raison de leur topographie et de leur urbanisation rapide. Des études récentes ont montré une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements pluvieux extrêmes dans ces régions au cours des dernières décennies (Adeyemi et Gbaguidi, 2021). L'analyse des tendances pluviométriques à long terme est essentielle pour comprendre l'évolution des risques d'inondation. Plusieurs auteurs ont utilisé des méthodes statistiques pour caractériser les pluies journalières et leurs variations temporelles. Soglo et al (2018) ont appliqué l'analyse des tendances et de rupture sur des séries pluviométriques de 50 ans dans le sud du Bénin, révélant une augmentation significative des précipitations extrêmes depuis les années 1990.

L'analyse fréquentielle des pluies est une approche largement utilisée pour établir le lien entre les intensités de précipitation et leurs périodes de retour. Cette méthode est cruciale pour définir des seuils d'alerte pertinents. Dans une étude sur Cotonou, (Dossou-Yovo et Boko, 2020) ont utilisé la loi de Gumbel pour estimer les périodes de retour des événements pluvieux extrêmes, permettant de déterminer les seuils d'alerte aux précipitations extrêmes. L'évaluation de l'évolution des quantiles de pluie en relation avec les seuils d'alerte est une approche novatrice pour comprendre les changements dans les risques d'inondation. Amoussou et al. (2022) ont appliqué cette méthode dans le bassin du Mono au Bénin, démontrant une augmentation significative des quantiles de pluie correspondant aux seuils d'alerte sur les 30 dernières années.

1.2.1. Clarification conceptuelle

- **Pluviométrie :** La pluviométrie est un élément fondamental en hydrologie, mesurant la quantité de précipitations tombées dans une zone donnée sur une période spécifique. En Afrique de l'Ouest, la variabilité spatio-temporelle des précipitations est particulièrement prononcée, influençant significativement les risques d'inondation.

La définition des seuils d'alerte aux inondations pluviales est un défi complexe qui nécessite une compréhension approfondie des conditions locales. Gomez et Kamara (2017) ont souligné l'importance d'intégrer non seulement les données pluviométriques, mais aussi les caractéristiques du bassin versant et l'occupation des sols dans la détermination de ces seuils. Lebel et al. (2009) ont souligné l'importance des campagnes de terrain multidisciplinaires pour comprendre les régimes pluviométriques complexes de la région. Leur étude dans le cadre du projet AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) a révélé la forte variabilité interannuelle des précipitations en Afrique de l'Ouest. L'urbanisation rapide dans les communes étudiées a exacerbé les risques d'inondation en augmentant le ruissellement et en réduisant l'infiltration. Une étude menée par (Vissin et al., 2019) à Porto-Novo a montré que l'imperméabilisation des sols a conduit à une augmentation de 30% du ruissellement pour des événements pluvieux de même intensité sur une période de 20 ans.

- **Inondations pluviales :** Les inondations pluviales, particulièrement en milieu urbain, résultent de précipitations intenses dépassant la capacité d'absorption ou d'évacuation des systèmes de drainage. L'urbanisation rapide et le changement climatique exacerbent ce phénomène. Jha et al. (2012) ont fourni un guide complet sur la gestion intégrée des risques d'inondation urbaine. Leur ouvrage souligne l'importance d'une approche holistique, combinant des mesures structurelles et non structurelles pour atténuer les risques d'inondation. Douglas et al. (2008) ont exploré les impacts disproportionnés des inondations sur les populations urbaines pauvres en Afrique. Leur étude met en lumière la vulnérabilité accrue de certaines communautés face aux inondations, un aspect particulièrement pertinent pour les villes béninoises.
- **Seuils d'alerte :** Les seuils d'alerte sont des valeurs critiques de précipitations ou de niveaux d'eau utilisées pour déclencher des actions de prévention et de protection contre les inondations. Alfieri et al. (2019) ont discuté de l'importance d'un réseau global pour la réduction opérationnelle des risques d'inondation. Leur travail souligne la nécessité de systèmes d'alerte précoce efficaces, particulièrement pertinents pour les villes béninoises sujettes aux inondations. Cools et al. (2016) ont étudié l'amélioration des systèmes d'alerte précoce dans les pays en développement, avec un cas d'étude au Ghana. Leurs conclusions sur l'importance de l'implication communautaire dans ces systèmes pourraient être applicables au contexte béninois.

1.2.2. Etudes antérieures sur la pluviométrie et les inondations au Bénin

- Caractérisation de la pluviométrie au Bénin

Afouda et al. (2014) ont réalisé une analyse fréquentielle comparative des pluies extrêmes dans les zones guinéenne et soudanienne du Bénin. Leur étude a révélé des différences significatives dans les régimes de précipitations extrêmes entre ces deux zones climatiques du pays. Lawin et al. (2019) ont analysé les tendances des indices de précipitations standardisés dans le contexte du changement climatique au sud du Bénin. Leurs résultats suggèrent des changements dans les patterns de précipitations, avec des implications potentielles pour les risques d'inondation.

- Inondations urbaines au Bénin

Dossou et al.(2007) ont étudié la vulnérabilité de Cotonou face aux changements climatiques, en particulier l'élévation du niveau de la mer. Leur travail souligne les défis spécifiques auxquels sont confrontées les villes côtières du Bénin en matière d'inondations. Gnele et al. (2020) ont analysé les risques d'inondation et la vulnérabilité de la population à Cotonou. Leur étude fournit des informations précieuses sur les facteurs locaux contribuant aux inondations urbaines dans la plus grande ville du Bénin.

- Gestion des risques d'inondation au Bénin

Houngpè et al. (2016) ont développé une approche d'évaluation des risques d'inondation en milieu urbain basée sur l'analyse spatiale et le raisonnement probant. Leur méthodologie pourrait être particulièrement utile pour améliorer la gestion des risques dans les communes étudiées.

En conclusion, l'étude de l'évolution de la pluviométrie en relation avec les seuils d'alerte aux inondations pluviales est cruciale pour améliorer la résilience des communes face aux risques hydrologiques. Elle met également en évidence l'importance cruciale de comprendre les régimes pluviométriques et les dynamiques d'inondation dans le contexte spécifique du Bénin, en particulier dans les zones urbaines côtières. Les recherches futures devraient se concentrer sur l'intégration de modèles climatiques régionaux pour affiner les projections et améliorer la planification à long terme (Zinsou et Agbossou, 2024).

1.3. But de la recherche

Le but de notre recherche est d'étudier l'évolution de la pluviométrie en relation avec les seuils d'alerte aux inondations pluviales dans les communes de Cotonou, Porto-Novo et Allada, afin de mieux comprendre et améliorer la prévision des risques d'inondations dans ces zones urbaines du Bénin.

1.4. Questions de recherche

Cette étude tentera de répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les seuils de pluviométrie critiques en lien avec les périodes de retour pour servir au déclenchement des alertes d'inondation dans les communes cibles ?
- Comment la pluviométrie a-t-elle évoluée dans les communes ciblées comparativement aux seuils d'alerte qui ont été définis ?

1.5. Objectif du mémoire

1.5.1. Objectif générale

L'objectif général de ce travail est d'analyser l'évolution de la pluviométrie en relation avec les seuils d'alertes aux inondations pluviales dans les communes de Cotonou, Porto-Novo et Allada, afin d'améliorer la compréhension et la prévision des risques d'inondations dans ces zones urbaines du Bénin.

1.5.2. Objectifs spécifiques

Afin d'atteindre cet objectif, les objectifs spécifiques suivant ont été définis :

- Caractériser les pluies journalières extrêmes dans les communes de Porto-Novo, Cotonou et Allada.
- Faire une analyse fréquentielle pour relier les seuils d'alertes aux périodes de retour
- Evaluer l'évolution des quantiles de pluie suivant les seuils d'alertes définis suivant l'analyse fréquentielle.

1.6Hypothèses de travail

Pour mener cette étude sur l'évaluation de la pluviométrie et des seuils d'alerte aux inondations dans les communes de Porto-Novo, Cotonou et Allada, les hypothèses suivantes peuvent être formulées :

- Les précipitations extrêmes dans ces régions présentent une tendance à la hausse au fil des années, augmentant ainsi le risque d'inondations.
- Les événements pluvieux dépassant les seuils d'alerte aux inondations ont une fréquence et une période de retour spécifiques, permettant d'estimer la probabilité d'occurrence de tels événements extrêmes.
- Les quantiles de pluie représentant différents niveaux de risque d'inondation ont évolué de manière significative au cours des dernières décennies, nécessitant une réévaluation régulière des seuils d'alerte.

Ces hypothèses serviront de base pour orienter l'analyse des données pluviométriques et l'interprétation des résultats. Elles permettront d'évaluer si les tendances observées correspondent aux attentes initiales et d'identifier les zones prioritaires pour la mise en place de mesures de gestion des risques d'inondations.

1.7. Structure du mémoire

Ce mémoire est organisé en trois grandes parties. La première partie introductive aborde les généralités sur l'étude, notamment une brève introduction, les questions de recherche, les objectifs du travail. La deuxième partie présente les données, les matériels, et la méthodologie. Les principaux résultats de l'étude sont résumés dans la troisième partie, avec des interprétations, des discussions, la conclusion générale et les perspectives.

CHAPITRE 2 : DONNEES, MATERIELS ET METHODES

Dans ce présent chapitre, nous présenterons le milieu d'étude c'est-à-dire, sa situation géographique, son climat et sa végétation. Nous présenterons ensuite les données et la méthodologie utilisée pour l'élaboration de ce travail

2.1. Milieu d'étude

2.1.1. Localisation

Les communes de Cotonou, Porto-Novo, et Allada se situent dans le sud du Bénin, un pays d'Afrique de l'Ouest, bordé au sud par l'océan Atlantique. Elles sont localisées dans des zones côtières et proches de la lagune, ce qui les rend vulnérables aux phénomènes de pluies intenses et aux inondations.

- Cotonou

La ville de Cotonou se situe entre la latitude 6°35' N et la longitude 2°38' E (Fig. 1). Elle est la plus grande ville du Bénin et représente le principal centre économique et portuaire du pays. La ville est entourée au sud par l'océan Atlantique et au nord par la lagune de Nokoué, ce qui la rend particulièrement exposée aux inondations pluviales et aux montées des eaux.

EVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE SUIVANT LES SEUILS D'ALERTE AUX INONDATIONS PLUVIALES DANS LES COMMUNES DE COTONOU, PORTO-NOVO ET ALLADA

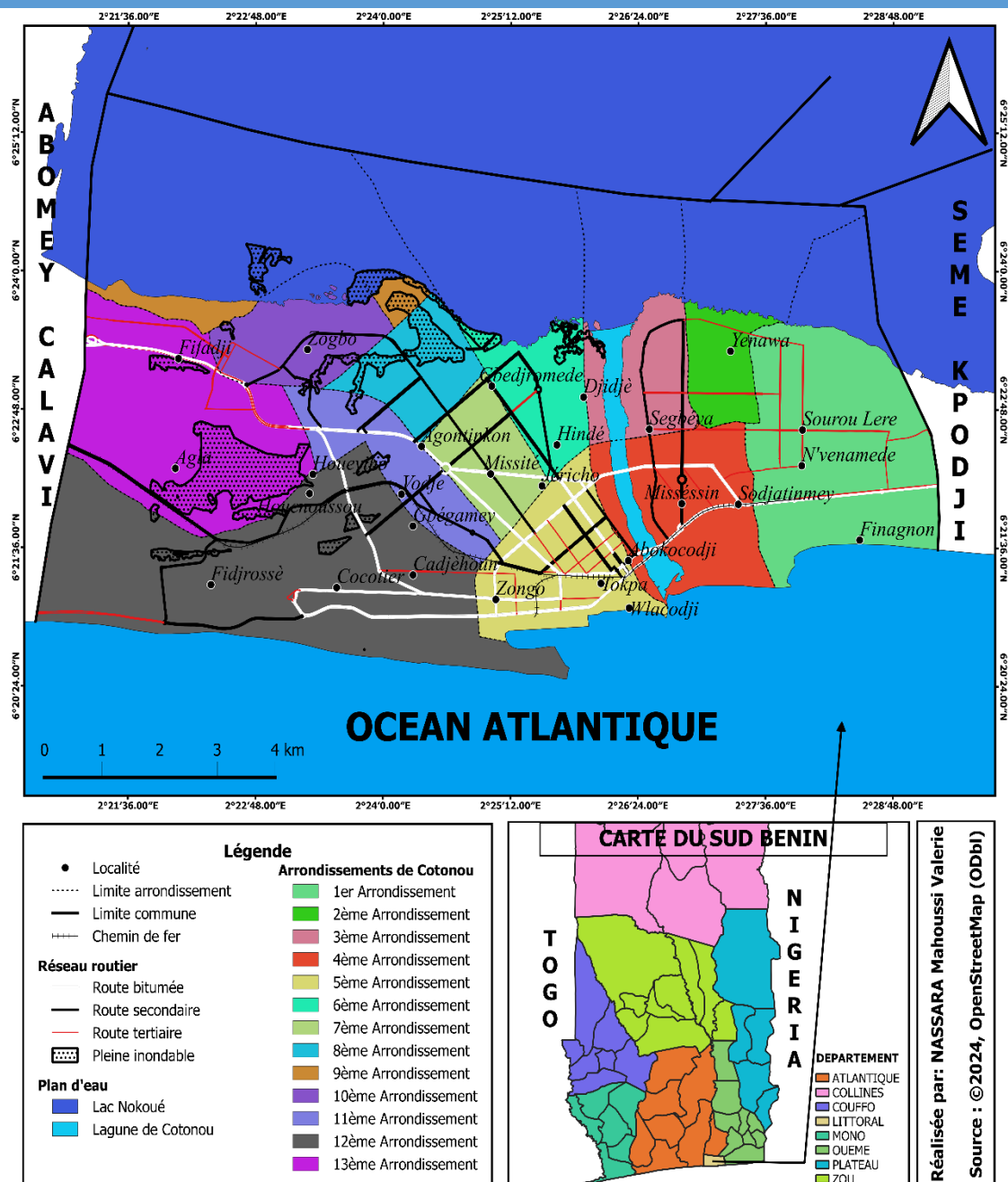
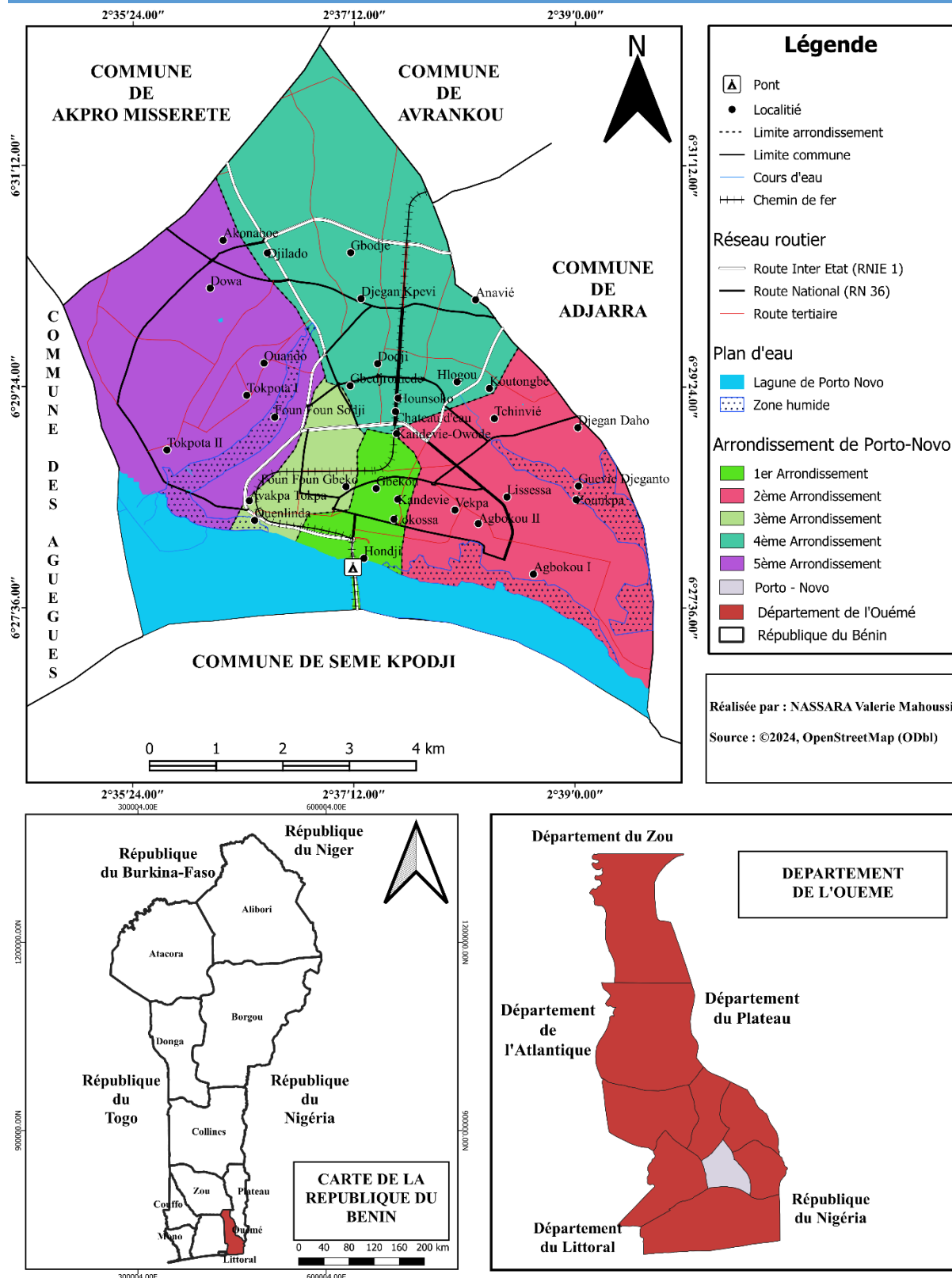


Figure 1: Carte de localisation de la ville de Cotonou

- Porto-Novo

Porto-Novo, est la capitale politique du Bénin située entre 6°49' N et 2°62' E. (Fig. 2). Porto-Novo se trouve à l'est de Cotonou, à environ 40 kilomètres de celle-ci. La ville est également localisée sur les rives de la lagune de Porto-Novo, ce qui la rend vulnérable aux inondations.

EVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE SUIVANT LES SEUILS D'ALERTE AUX INONDATIONS PLUVIALES DANS LES COMMUNES DE COTONOU, PORTO-NOVO ET ALLADA



EVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE SUIVANT LES SEUILS D'ALERTE AUX INONDATIONS PLUVIALES DANS LES COMMUNES DE COTONOU, PORTO-NOVO ET ALLADA

- Allada

Allada est située entre 6°66' N de latitude et 2°15' E de longitude (Fig. 3). Située au nord-ouest de Cotonou, à environ 55 kilomètres, Allada se trouve dans une région plus intérieure, par rapport aux villes côtières de Cotonou et Porto-Novo. Elle constitue un nœud de communication entre la capitale économique et le centre du pays.

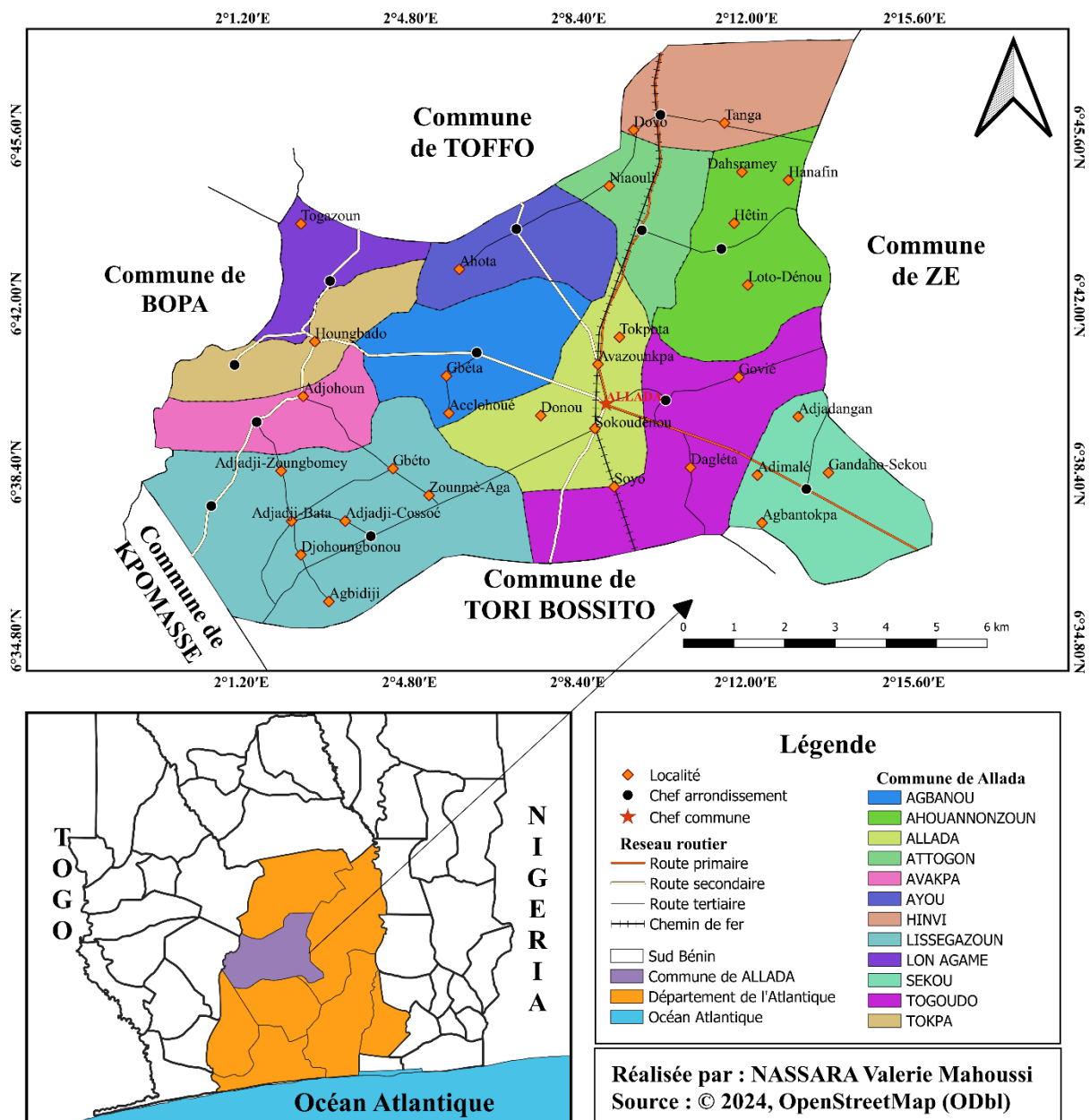


Figure 3 : Carte de localisation de la ville d'Allada

2.1.2. Climat

Cotonou bénéficie d'un climat tropical humide influencé par la proximité de l'océan Atlantique, avec deux saisons des pluies et deux saisons sèches. Les températures annuelles varient entre 25°C et 30°C (Agence Béninoise de la Météorologie, 2019). La ville enregistre une pluviométrie annuelle moyenne entre 1200 mm et 1500 mm (1988-2017), concentrée principalement entre avril et juillet (Atlas Climatique du Bénin, 2018). En ce qui concerne le climat de Porto-Novo, comme Cotonou, il bénéficie d'un climat tropical humide avec deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches. L'humidité relative y est constamment élevée (Agence Météorologique Nationale, 2020). La pluviométrie annuelle moyenne varie entre 1100 mm et 1400 mm (1991-2020), avec des précipitations concentrées de mai à juillet et en septembre (Rapport Climatologique du Bénin, 2018). Le climat d'Allada est de type tropical, influencé par sa position plus intérieure. La région connaît deux saisons des pluies, mais avec des précipitations légèrement inférieures à celles des zones côtières (Agence Béninoise de la Météorologie, 2017). La pluviométrie annuelle se situe entre 1000 mm et 1200 mm (1970-2010), avec des pluies plus courtes mais intenses pendant la saison des pluies (Observatoire National de la Météorologie, 2020).

2.1.3. Végétation et sols

La végétation naturelle de Cotonou est principalement composée de mangroves et de palmiers le long des zones littorales. Cependant, l'urbanisation croissante a réduit cette couverture végétale, exacerbant les risques d'érosion (Ministère de l'Environnement et des Ressources Forestières, 2015). Les sols sablonneux prédominent dans la région de Cotonou, caractérisés par une faible capacité de rétention d'eau et une forte perméabilité, ce qui accentue les phénomènes d'inondation pluviale (Agence Nationale de Gestion des Eaux, 2019). La végétation de Porto-Novo comprend des mangroves et des forêts marécageuses le long de la lagune, bien que la progression de l'urbanisation ait réduit leur couverture (Organisation Internationale des Forêts Tropicales, 2016). La végétation naturelle d'Allada est mieux conservée que dans les villes plus urbanisées (Direction Générale des Forêts et des Ressources Naturelles, 2016). Les sols ferralitiques de la région sont riches en fer et bien adaptés à l'agriculture, bien que leur capacité de rétention d'eau puisse poser des défis en période de fortes pluies (Centre National de la Recherche Agronomique, 2019).

2.1.4 Relief et topographie

Cotonou est située sur une plaine littorale avec un relief relativement plat, l'altitude moyenne se situant autour de 5 mètres au-dessus du niveau de la mer, ce qui la rend très vulnérable aux inondations côtières et fluviales. La ville est essentiellement plane, avec une légère pente vers l'océan Atlantique, aggravant l'accumulation des eaux de pluie lors des fortes précipitations. Porto-Novo est situé dans une dépression littorale, entouré par des collines au nord et des plaines marécageuses au sud. L'altitude moyenne de la ville est de 20 mètres, ce qui favorise les inondations. Le relief bas et plat de la ville, couplé à la proximité de la lagune, rend Porto-Novo particulièrement exposée aux inondations lors de fortes pluies (Observatoire National des Changements Climatiques, 2019). Allada est situé sur des plateaux légèrement ondulés avec une altitude variant entre 100 et 200 mètres, offrant une meilleure évacuation des eaux par rapport aux zones côtières basses. La région présente un relief plus varié avec des collines douces et des vallées qui facilitent le drainage naturel des eaux pluviales.

2.1.5. Hydrographie

Cotonou est bordée par l'océan Atlantique au sud et la lagune de Nokoué au nord. Plusieurs canaux, comme le canal de Cotonou, traversent la ville, augmentant le risque d'inondation (Rapport de la Direction de l'Hydraulique, 2020). La combinaison de ces plans d'eau et des précipitations intenses entraîne des inondations fréquentes, en particulier dans les quartiers mal drainés (Programme des Nations Unies pour le Développement, 2018). La lagune de Porto-Novo joue un rôle important dans l'hydrographie de la ville. Elle est reliée à l'océan par des canaux naturels et artificiels. En raison de la proximité de la lagune et de la faible altitude, Porto-Novo est sujette à des inondations fréquentes, notamment dans les quartiers situés en bordure de la lagune. Allada est traversée par plusieurs rivières et affluents saisonniers, qui se déversent dans des bassins fluviaux plus grands, comme celui de l'Ouémé. Bien que moins exposée aux inondations que les zones côtières, certaines vallées d'Allada peuvent être temporairement inondées après des pluies intenses (Rapport sur les Inondations en Milieu Rural, 2018).

2.1.6. Géologie

La ville de Cotonou repose sur des sédiments récents composés de sables marins et alluviaux, formant un substrat fragile face aux infiltrations d'eau. La géologie de Porto-Novo

est dominée par des alluvions récentes d'origine fluvio-lagunaire, typiques des régions côtières béninoises. En ce qui concerne la ville d'Allada, elle repose sur un socle cristallin formé de schistes et de granites, rendant la région plus stable par rapport aux zones sédimentaires du littoral.

2.2. Données utilisées

2.2.1. Données pluviométriques

Dans le cadre de cette étude portant sur l'évaluation de la pluviométrie en lien avec les seuils d'alertes aux inondations pluviales dans les communes de Cotonou, Porto-Novo et Allada, nous avons utilisé des données pluviométriques fournies par l'Agence Nationale de la Météorologie (ANM). Ces données, qui couvrent 30 ans soit 1994-2023 d'observations des précipitations journalières, constituent la base de l'analyse. Elles permettent d'identifier les événements de précipitations extrêmes, d'estimer la fréquence de leurs occurrences à travers les périodes de retour, et de relier ces informations aux seuils d'alertes définis pour les risques d'inondations.

2.2.2. Données sur les seuils d'alertes

Pour réaliser cette analyse nous avons exploité les données relatives aux seuils d'alertes aux inondations obtenus dans le projet SAP Bénin. Ces données sont essentielles, car elles définissent précisément les niveaux critiques de précipitations au-delà desquels des risques d'inondations sont susceptibles de se produire. En croisant ces informations avec les données pluviométriques extrêmes relevées dans les communes de Cotonou, Porto-Novo et Allada, nous avons pu analyser la fréquence à laquelle ces seuils ont été dépassés au fil du temps. Cette analyse approfondie des seuils permet non seulement d'améliorer les mécanismes d'alerte, mais aussi de renforcer les stratégies de prévention des inondations dans ces zones particulièrement vulnérables aux pluies extrêmes. Elle constitue une base solide pour la gestion proactive des risques d'inondation, notamment en ce qui concerne la protection des populations locales et des infrastructures.

Tableau 1: Coordonnées et période des stations

NOM	LONGITUDE	LATITUDE	PERIODE D'ETUDE
Cotonou	2°38' E	6°35' N	1994 - 2023
Porto-Novo	2°62' E	6°49' N	1994 - 2023
Allada	2°15' E	6°66' N	1994 - 2023

2.3. Matériels

- **Excel** : C'est un logiciel offrant des fonctionnalités de calcul, de graphiques et d'analyse de données. Ce logiciel a permis de traiter et de stocker mes données pluviométriques, de faire des calculs de certains paramètres statistiques et de créer des graphiques
- **R** : C'est un langage de programmation et un logiciel libre dédié aux statistiques et à la science des données. Il m'a permis de faire le traitement des données de Cotonou
- **Hyfran** : Logiciel spécialisé dans l'analyse fréquentielle en hydrologie. Il a servi à faire l'analyse des fréquences des événements pluviométriques extrêmes
- **Microsoft Word** : Logiciel de traitement de texte ; utilisés pour la rédaction du mémoire
- **QGIS** : Système d'information géographique ; utilisé pour la cartographie des zones d'études

2.4. Méthodes

Elle intègre d'abord la recherche des documents scientifiques généraux et spécifiques ainsi que d'autres documents ayant permis de mieux cerner les aspects du sujet.

2.4.1. Contrôle de la qualité des données

Après l'obtention des données brutes pour chaque station météorologique, celles-ci ont été regroupées dans un seul fichier Excel. Afin d'assurer une meilleure organisation, les données de chaque station ont été séparées sur des feuilles Excel distinctes. Cette étape visait à rendre l'organisation des données plus claires et à éviter des erreurs lors des traitements ultérieurs. Pour chaque station des colonnes spécifiques ont été créées pour regrouper les informations relatives au nom de la station, aux années, aux mois, aux jours, ainsi qu'aux précipitations journalières. Les mois manquants ont ensuite été identifiés, afin de garantir une

continuité dans les séries de données. Les valeurs manquantes ont été codifiées par NA, marquant les points de données absents. Une fois cette étape réalisée, les précipitations ont été classées par année pour chaque station, ce qui a permis d'identifier précisément le nombre de valeurs manquantes par années, il a été possible d'estimer ensuite le pourcentage de lacune pour chaque année de la série. Cette démarche visait à évaluer la qualité et la complétude des données disponibles. Afin de garantir une analyse rigoureuse et fiable, une limite de tolérance a été fixée concernant les lacunes des données. Toutes les années présentant un pourcentage de lacune supérieur à (25 %) et/ou ayant des valeurs manquantes dans la saison pluvieuse ont été exclues de l'analyse. Cette étape est essentielle pour éviter que des périodes trop incomplètes n'affectent la fiabilité des résultats statistiques. Ainsi, les données retenues pour l'analyse sont celle offrant un niveau de complétude et de précision suffisant pour garantir la qualité des résultats et des interprétations.

2.4.2. Méthode de traitement des données

2.4.2.1. Paramètres statistiques des précipitations extrêmes

Pour caractériser les pluies journalières nous avons procédé au traitement des données afin d'obtenir les précipitations correspondantes à chaque année. Une fois le classement fait, nous avons utilisé les divers formules afin de calculer les différents paramètres statistiques tels que : la moyenne, la médiane, l'écart type, la variance, le coefficient de variation, les maximas.

a- La Moyenne :

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

La moyenne est calculée par la relation suivante :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

$\bar{X}$: Valeur moyenne ; X_i : ième valeur de la série ; n : taille de la série

Rôle : Elle permet d'indiquer la quantité moyenne de précipitations journalières. Elle donne une idée générale du niveau de précipitation dans les 3 communes et aide à évaluer si les pluies journalières sont globalement importantes ou faibles par rapport aux seuils d'alertes.

b- L'écart type :

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

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

δ : Ecart type ; $\bar{X}$: Valeur moyenne ; X_i : ième valeur de la série ; n : taille de la série

Rôle : Il mesure la dispersion des précipitations autour de la moyenne. Un écart type élevé indique une grande variabilité dans les quantités de précipitations extrêmes.

c- Variance :

La variance est une mesure qui permet de tenir compte de la dispersion de toutes les valeurs d'un ensemble de données.

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n} \quad (3)$$

V : Variance ; $\bar{X}$: Valeur moyenne ; X_i : Valeur « i » dans la série ; n : nombre de la grandeur de la série

Rôle : La variance est une autre mesure de la variabilité des précipitations. Elle permet de quantifier la dispersion globale des données par rapport à la moyenne, et plus elle est élevée, plus les précipitations sont variables.

d- L'étendu :

L'étendu est la différence entre la précipitation journalière la plus faible et la plus forte

$$R = X_{max} - X_{min} \quad (4)$$

R : Etendu ; X_{max} : Valeur maximale des précipitations ; X_{min} : Valeur minimale des précipitations

Rôle : Permet de comprendre les écarts entre les jours secs et les jours de fortes pluies

e- Le coefficient de variation :

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

$$CV = \frac{\delta}{\bar{X}} \quad (5)$$

CV : Coefficient de Variation ; $\bar{X}$: Valeur moyenne ; δ : Ecart type

Rôle : Il permet de mesurer la variabilité relative des précipitations par rapport à leur niveau moyen. Un CV élevé indique une variabilité importante des précipitations par rapport à leur moyenne.

f- Le coefficient d'asymétrie

Ce coefficient est une mesure statistique qui décrit la symétrie d'une distribution autour de sa moyenne. Il indique si les données sont étalées de manière équilibrée ou si elles présentent une inclinaison vers un côté.

$$Cs = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^3}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (6)$$

Cs : coefficient d'asymétrie ; N : taille de l'échantillon ; X_i : i-ème valeur de l'échantillon ; $\bar{X}$: la moyenne de l'échantillon

g- Le coefficient d'aplatissement

C'est une mesure statistique qui décrit la forme des queues de la distribution d'un ensemble de données par rapport à une distribution normale. Il permet d'évaluer si les données ont des

queues plus épaisses ou plus minces que celles d'une distribution normale, ce qui reflète la probabilité d'obtenir des valeurs extrêmes.

$$ck = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \right)^2} \quad (7)$$

ck : coefficient d'aplatissement ; X_i : ième valeur de l'échantillon ; $\bar{X}$: moyenne de l'échantillon ; N : taille de l'échantillon

2.4.2.2. Analyse fréquentielle et période de retour

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique utilisée pour étudier les événements rares comme les pluies extrêmes et est souvent appliquée dans les domaines tels que l'hydrologie. Elle permet d'estimer la fréquence à laquelle des événements de précipitations dépassant un certain seuil se produisent sur une période donnée. Dans cette étude, le logiciel Hyfran a été utilisé pour effectuer cette analyse, et la formule empirique choisie est celle de Hazen. Cette analyse suit plusieurs étapes tels que :

- Définition des buts de l'analyse ;
- Construction d'une série de donnée ;
- Contrôle de la série de valeurs ;
- Choix du modèle fréquentiel ;
- Présentation des lois choisies et technique d'ajustement ;
- Critère de comparaison pour le choix de l'ajustement ;

Définition des buts de l'analyse : Le but de notre analyse statistique est de relier les seuils d'alertes aux périodes de retour pour les stations de Cotonou, Porto-Novo et Allada.

Construction d'une série de donnée : Dans le cadre de cette étude sur l'évolution de la pluviométrie et les seuils d'alerte aux inondations pluviales à Cotonou, Porto Novo et Allada, nous avons utilisé la méthode du bloc maxima (une approche statistique robuste issue de la théorie des valeurs extrêmes) afin de diviser les données pluviométriques en blocs temporels (généralement annuels), à extraire la valeur maximale de chaque bloc, puis à ajuster une distribution statistique à ces maximas.

Contrôle de la série de valeurs : Comme pour tout type d'analyse statistique, la pertinence des résultats dépend en premier lieu de la qualité des données disponibles. Les données

pluviométriques ont été minutieusement traitées (Elimination des années avec beaucoup de lacune) en vue de constituer une série chronologique complète et fiable, dépourvu de toutes les valeurs aberrantes. Afin de pouvoir valider la qualité des données certains tests ont été réalisés.

Test d'indépendance (Wald-Wolfowitz): Le test d'indépendance est utilisé pour vérifier si les observations d'une série temporelle ou d'un jeu de données sont indépendantes les unes des autres. En d'autres termes, il s'agit de vérifier qu'il n'y a pas de corrélation entre les valeurs successives.

Test de stationnarité (Kendall) : La stationnarité d'une série temporelle signifie que ses propriétés statistiques (comme la moyenne, la variance, et la covariance) sont constantes dans le temps. Un test de stationnarité permet de vérifier si les données respectent cette condition, ce qui est souvent une hypothèse nécessaire pour l'analyse de certaines séries temporelles. Lorsque la série est stationnaire, cela veut dire que ses propriétés statistiques sont constantes dans le temps.

Test d'homogénéité (Wilcoxon) : Le test d'homogénéité sert à déterminer si les données proviennent d'une même population ou si elles sont cohérentes entre elles en termes de distribution statistique. Ce test est souvent utilisé pour vérifier que la série de données analysée est uniforme et ne présente pas de changements structurels majeurs. Lorsque les données sont homogènes, cela signifie qu'elles proviennent d'une même population avec une distribution statistique identique.

Choix du modèle fréquentiel : Dans le cadre de l'analyse des précipitations extrêmes pour les stations de Cotonou, Porto-Novo et Allada plusieurs lois ont été appliquées afin de capturer de manière adéquate la variabilité et les caractéristiques propres aux événements rares. Le choix de ces lois repose sur leur capacité à modéliser les comportements des valeurs extrêmes, essentielle pour établir les périodes de retour correspondants aux seuils d'alertes. Les différentes lois utilisées sont la loi Généralisée des Valeurs extrêmes (GEV), la loi de Gumbel, la loi de Weibull et la loi du Pearson III.

- La loi Généralisée des Valeurs Extrêmes (GEV)

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

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{k}{\alpha} (x - u) \right]^{\frac{1}{k}-1} \exp \left\{ - \left[1 - \frac{k}{\alpha} (x - u) \right]^{\frac{1}{k}} \right\} \quad (6)$$

$f(x)$: fonction de densité de probabilité ; α : le paramètre d'échelle ; k : le paramètre de forme ; x : la valeur observée ; u : le paramètre de localisation.

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

- La loi double exponentielle (loi de Gumbel)

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

$$F(X) = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{X-\mu}{\beta}} e^{-e^{-\frac{X-\mu}{\beta}}} \quad (9)$$

$F(X)$: fréquence au non dépassement ; β : paramètre d'échelle ; μ : paramètre de localisation

La technique d'ajustement est la méthode de maximum de vraisemblance qui conduit à des estimations de calcul particulièrement simple et d'emploi très fréquent.

- La loi du pearson III

Elle est régulièrement utilisée pour l'analyse fréquentielle des volumes correspondant aux crues maximales annuelles. Son intérêt majeur est une grande flexibilité de forme, qui en fait un outil susceptible de s'adapter à des histogrammes très variés. Cette méthode donne des estimateurs corrects et efficaces. La forme standardisée de la loi Pearson III est une transformation linéaire de la fonction gamma. La densité de probabilité de Pearson III est donné par :

$$P(X = x) = f(x) = \frac{|\alpha|}{\Gamma(v)} \exp[-\alpha(x - m)] [\alpha(x - m)]^{v-1} \quad (7)$$

$f(x)$: Fonction de densité de probabilité ; x : Variable aléatoire ; $\Gamma(v)$ c'est la fonction gamma ; α : est le paramètre d'échelle ; m : le paramètre de position ; v : le paramètre de forme

- La loi de Weibull

La loi de Weibull est souvent utilisée pour modéliser les données de durées de vie, mais elle peut également être utilisée pour modéliser des minima (ou maxima) en analyse fréquentielle. La méthode du maximum de vraisemblance a été utilisée pour l'ajustement.

$$f(x) = 1 - \beta \exp\left(-\frac{x - \mu}{\delta}\right) \quad (8)$$

$f(x)$: Fonction de répartition ; μ : paramètre de localisation ; x : La valeur spécifique de la variable aléatoire pour laquelle on veut calculer la probabilité ; $\delta > 0$: paramètre d'échelle ; β : paramètre de forme

Ajustement des différentes lois :

Hyfran est un logiciel d'ajustement de lois statistiques, téléchargeable sur internet, qui possède les fonctionnalités suivantes :

- ❖ Vérification d'hypothèses : indépendance, homogénéité, présence de tendances ou de valeurs singulières, adéquation des lois théoriques aux données observées
- ❖ Ajustement à 16 lois : Exponentielle, GEV, Gumbel, Normale, Log-Normal, (deux ou trois paramètres), Weibull, Gamma (ou Pearson, deux ou trois paramètres),

Gamma généralisée, Gamma inverse, Log-Pearson type 3, Halphen (type A, B et B-1) par trois méthodes (maximum de vraisemblance, moments, moments pondérés) ;

- ❖ Calcul de quantiles avec intervalles de confiance (avec les quantiles de loi Normal, ou par Bootstrap paramétrique) ;
- ❖ Interfaçage avec tableurs.

Hyfran a été développé par l'équipe du Dr. B. Bobée et son groupe de recherche à l'Institut National de la Recherche Scientifique - Eau Terre et Environnement (INRS-ETE) de l'Université du Québec avec le parrainage d'Hydro-Québec. Ce logiciel a été utilisé pour la réalisation pratique de l'analyse fréquentielle.

Critère de comparaison des lois

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

2.4.2.3. Evolution des quantiles de pluie en relation avec les seuils d'alerte

Cette analyse de l'évolution des quantiles de pluie maximale en lien avec les seuils d'alerte a été faite en appliquant les tests de stationnarité de Mann Kendall (Mann, 1945 ; Kendall, 1975) pour apprécier la tendance et celui de Pettit (1979) pour évaluation les ruptures éventuelles dans les séries de nombre d'événements pluvieux entre les seuils. Ceci permettra d'apprécier l'apport des aléas des pluies extrêmes dans la récurrence des événements d'inondation sur les sites choisis.

2.5. Conclusion

Ce chapitre a mis en relief la description des données, matériels et méthodes utilisées dans ce travail. Les données utilisées sont celle de 3 stations à savoir Cotonou, Porto et Allada sur la période de 1994-2023. Cette étude est basée essentiellement sur l'analyse de l'évolution des précipitations en relation avec les seuils d'alerte.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

Le présent chapitre aborde les résultats issus de l'application de la méthodologie énoncée dans le chapitre précédent. Ces résultats prennent en compte la caractérisation des pluies journalières, l'analyse fréquentielle ainsi que l'évolution des quantiles.

3.1. Caractérisations des pluies extrêmes des stations de Cotonou, Porto-Novo et d'Allada

La figure 4 présente l'évolution des maxima annuels de pluie des stations de Cotonou, Porto-Novo et Allada. L'analyse des maxima annuels des pluies journalières des stations de Porto-Novo, Cotonou et Allada révèle une grande variabilité des événements extrêmes, avec des pics remarquables, notamment 128.3 mm à Porto-Novo (1999), 194.2 mm à Cotonou (2003) et 167.9 mm à Allada (1995). Ces précipitations exceptionnelles sont probablement liées à des phénomènes climatiques intenses ou des anomalies régionales. Une augmentation des fortes pluies est observée ces dernières années, avec des valeurs maximales enregistrées en 2023 dans les trois stations. Cependant, des périodes de d'absence de données, particulièrement à Allada, reflètent des épisodes de sécheresse ou des lacunes dans la mesure. Ces résultats mettent en évidence des pluies extrêmes irrégulières mais significatives, soulignant la nécessité de mieux comprendre leur dynamique pour anticiper leurs impacts sur les écosystèmes et les activités humaines.

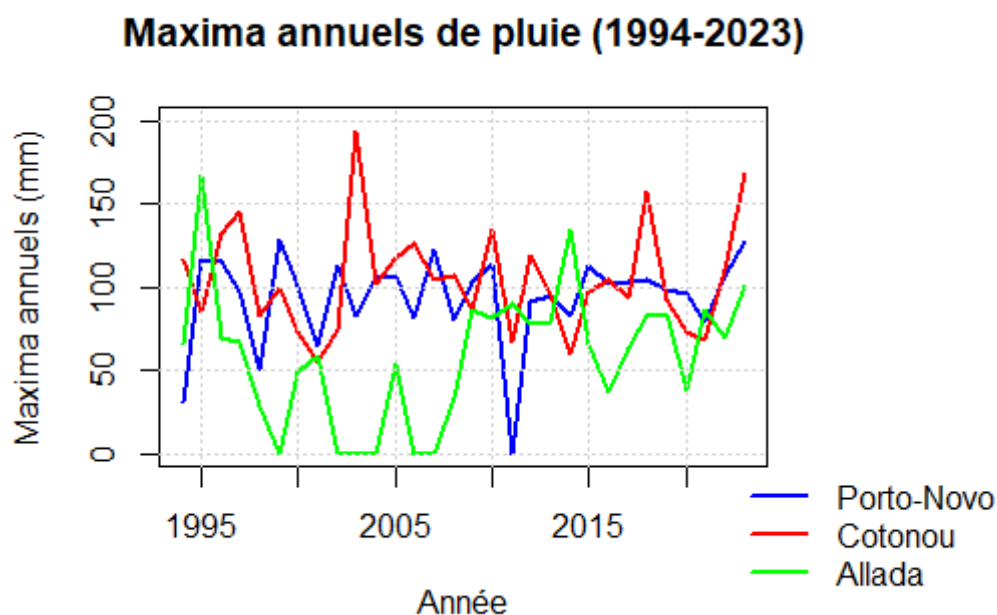


Figure 4: Evolution des maxima annuels des trois stations

➤ **Evolution des paramètres statistiques des trois stations**

- Les minimum enregistrés sur les stations de Cotonou, Porto-Novo et Allada sont respectivement de 54,8mm ; 50,2mm ; 36,7mm. Elle représente la pluie extrême la plus faible enregistrée parmi les précipitations maximales journalière utilisée.
- Les maximums enregistrés sur les stations de Cotonou, Porto-Novo et Allada sont respectivement de 194mm ; 128mm ; 168mm. C'est la pluie extrême la pluie forte enregistré parmi les précipitations maximales étudiés. Elle indique qu'il y a eu un événement pluvieux avec une intensité très forte.
- Les moyennes enregistrés sur les stations de Cotonou, Porto-Novo et Allada sont respectivement de 105mm ; 99,7mm ; 81,1mm. Cette valeur indique l'intensité moyenne des pluies observées.
- L'écart type enregistrés sur les stations de Cotonou, Porto-Novo et Allada sont respectivement de 32,7mm ; 128,2mm ; 32,1mm. L'écart type montre à quel point les valeurs de précipitation extrême sont dispersées autour de la moyenne. Etant donné que cette valeur est élevée cela indique qu'il y a une variabilité assez importante entre les différents événements de précipitations extrême observé.
- Les médianes enregistrés sur les stations de Cotonou, Porto-Novo et Allada sont respectivement de 101mm ; 103mm ; 78,8mm. Les valeurs de la médiane obtenue sont inférieurs à la moyenne ce qui indique qu'une répartition des valeurs est un peu biaisés vers les grandes précipitations.
- Les coefficients de variation enregistrés sur les stations de Cotonou, Porto-Novo et Allada sont respectivement de 0,311 ; 0,183 ; 0,396. Etant le rapport entre l'écart type et la moyenne, elle montre que la variabilité des précipitations extrêmes est modérée par rapport à la moyenne.
- Les coefficients d'asymétrie enregistrés sur les stations de Cotonou, Porto-Novo et Allada sont respectivement de $C_s=0,855$; 0,785 ; 1,46 : Ces coefficients nous permettent de dire que la distribution des précipitations maximales est légèrement asymétrique à droite, ce qui signifie qu'il y a plus d'événements de pluie extrêmes faibles, mais quelques événements plus rares avec des précipitations très élevées.
- Les coefficients de kurtosis enregistrés sur les stations de Cotonou, Porto-Novo et Allada sont respectivement de 3,20 ; 3,22 ; 4,29. Ici, la distribution a une légère

leptokurtie, c'est-à-dire qu'il y a un peu plus d'événements extrêmes (des valeurs très élevées ou très faibles) que dans une distribution normale. Cela signifie qu'il existe des valeurs de précipitations très élevées dans la série de données, bien que la majorité des valeurs soit autour de la moyenne.

3.2. Analyse fréquentielle et période de retour des inondations

L'objectif principal est de comprendre l'évolution des précipitations en relation avec les seuils d'alertes aux inondations. Quatre (04) différentes lois de probabilité ont été testées afin de modéliser les événements extrêmes et la loi offrant le meilleur ajustement a été retenue pour déterminer les périodes de retour associées aux précipitations critiques. Les résultats obtenus présentés sous forme de tableaux et graphiques seront suivies d'une interprétation visant à comparer ces observations avec les seuils d'alertes et à en tirer des conclusions pour la gestion des risques d'inondations dans les communes de Cotonou, Porto-Novo et d'Allada.

3.2.1. Analyse fréquentielle

Dans le cadre de l'analyse des précipitations, l'analyse fréquentielle vise à modéliser les événements pluvieux les plus extrêmes (comme les pluies maximales) pour estimer la probabilité pour que ces événements se reproduisent dans une période de retour donnée. Cette méthode repose généralement sur plusieurs lois de probabilité et plusieurs tests d'adéquation. En effet, l'analyse fréquentielle a été réalisée sur trois stations à savoir : la station de Cotonou, la station de Porto-Novo et la station d'Allada.

3.2.1.1. Station de Cotonou

- **Tests d'hypothèse de la station de Cotonou**

Le tableau 2 présente les différents résultats des tests effectués aux données de précipitation de la station de Cotonou. Ce tableau montre que la p-value des différents tests (Indépendance, Stationnarité et Homogénéité) est supérieure au niveau significatif qui est de 0,05. Cela permet d'abord d'affirmer que les données sont indépendantes, stationnaire et homogène. De plus les données étant indépendantes cela garantit que les valeurs de précipitations maximales ne sont pas influencées par des événements précédents ; la stationnarité des données signifie que les précipitations ne montrent pas de changement

systématique (augmentation ou diminution) au fil du temps ; l'homogénéité des données montre que les moyennes des deux échantillons ne sont pas significativement différentes.

Tableau 2: Test d'hypothèse de la station de Cotonou:

TESTS	Indépendance (Wald-Wolfowitz)		Stationnarité (Kendall)		Homogénéité (Wilcoxon)	
	p-value	U	p-value	K	p-value	W
Station de Cotonou	0.903	0.122	0.803	0.250	0.534	0.622
Conclusion	L'hypothèse H0 est acceptée avec un niveau significatif de 5%		L'hypothèse H0 est acceptée avec un niveau significatif de 5%		L'hypothèse H0 est acceptée avec un niveau significatif de 5%	

- **Ajustement de la loi de Gumbel**

Le tableau 3 présente les résultats de l'ajustement des précipitations maximales à la distribution de Gumbel. Ce tableau montre que le modèle s'adapte bien aux données. Le paramètre d'échelle (alpha) est de 26.301, indiquant la dispersion des valeurs autour de la moyenne, tandis que le paramètre de localisation (u) est de 89.8488, représentant la valeur centrale des précipitations maximales. Le test de Chi-carré, avec une statistique X^2 de 0.80 et une p-value de 0.938, indique que l'ajustement est très satisfaisant. La p-value élevée (supérieure à 0.05) suggère que l'hypothèse nulle ne peut être rejetée, confirmant que le modèle de Gumbel est pertinent pour modéliser les précipitations extrêmes.

Tableau 3: Paramètre de la loi de Gumbel et du test d'adéquation

Désignation	Lois de Gumbell		Test de khi-carré	
	alpha	U	X^2	p-value
Paramètres	26.301	89.848	0.80	0.938

La figure 5 présente une analyse fréquentielle des précipitations maximales à la station de Cotonou en utilisant la distribution de Gumbel, estimé par la méthode u maximum de vraisemblance. L'axe des abscisses représente la probabilité de non-dépassement, qui décrit la fréquence avec laquelle des précipitations maximales spécifiques sont susceptibles d'être atteintes ou dépassées. Plus on se déplace vers la droite, plus on observe des événements rares. L'axe des ordonnées indique les valeurs des précipitations maximales en millimètres.

Les points noirs représentent les données observées, tandis que la courbe rouge montre l'ajustement du modèle de Gumbel aux observations. Les deux courbes bleues délimitent les intervalles de confiance à 95 %, montrant la plage dans laquelle les précipitations maximales devraient se situer avec un degré de certitude élevé. Le bon alignement des points noirs avec la courbe rouge et la majorité des points situés dans les intervalles de confiance suggèrent que le modèle de Gumbel s'ajuste bien aux précipitations maximales de Cotonou, permettant de prédire les événements pluvieux rares avec une bonne fiabilité.

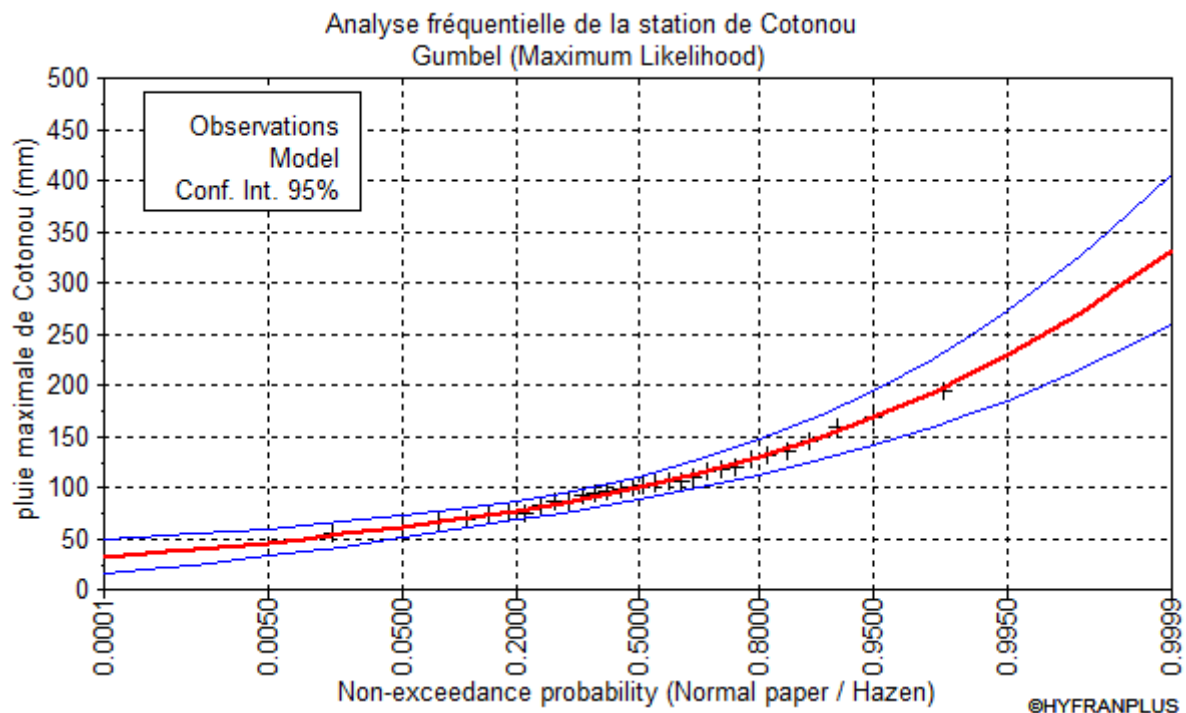


Figure 5 : Ajustement de la distribution de Gumbel aux précipitations maximales de Cotonou

3.2.1.2. Station de Porto-Novo

- **Tests d'hypothèse de la station de Porto-Novo**

Le tableau 4 présente les différents résultats des tests effectués aux données de précipitation de la station de Porto-Novo. Ce tableau montre que la p-value des différents tests (Indépendance, Stationnarité et Homogénéité) est supérieur au niveau significatif qui est de 0,05. Cela permet d'abord de conclure que les données sont indépendantes, stationnaire et homogène. De plus, les données étant indépendantes cela garantit que les valeurs de précipitations maximales ne sont pas influencées par des événements précédents ; la stationnarité des données signifie que les précipitations ne montrent pas de changement

systématique (augmentation ou diminution) au fil du temps ; l'homogénéité des données montre que les moyennes des deux échantillons ne sont pas significativement différentes.

Tableau 4 : Résultats des tests d'hypothèse à Porto-Novo

TESTS	Indépendance (Wald-Wolfowitz)		Stationnarité (Kendall)		Homogénéité (Wilcoxon)	
	p-value	U	p-value	K	p-value	W
Station de Porto-Novo	0.192	1.31	0.843	0.198	0.927	0.091
Conclusion	L'hypothèse H0 est acceptée avec un niveau significatif de 5%		L'hypothèse H0 est acceptée avec un niveau significatif de 5%		L'hypothèse H0 est acceptée avec un niveau significatif de 5%	

- **Ajustement de la loi de weibull**

Le tableau 5 présente les résultats de l'ajustement des précipitations maximales à une distribution de Weibull. Ce tableau montre que les paramètres alpha(106.764) et c (6.880) décrivent respectivement l'échelle et la forme de la distribution, indiquant la dispersion et la queue des valeurs extrêmes. Le test du chi-carré a été effectué pour évaluer la qualité de l'ajustement. Le chi-carré(X^2) de 1.00 et la p-value de 0.909 montrent que le modèle de Weibull s'ajuste très bien aux données car la p-value est supérieur à 0.05, ce qui suggère que l'on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle du bon ajustement. Cela signifie que le modèle capture adéquatement la variabilité des précipitations extrêmes observées.

Tableau 5: Paramètres de la loi de Weibull et du test d'adéquation

Désignation	Lois de Weibull		Test de khi-carré	
	alpha	c	X^2	p-value
Paramètres	106.764	6.880	1.00	0.909

La figure6 illustre l'analyse fréquentielle des précipitations maximales à Porto-Novo en utilisant une distribution de Weibull, ajustée par la méthode du maximum de vraisemblance. Les croix (+) représentent les observations réelles des précipitations maximales, et les cercles rouges symbolisent les observations inactives. Ce graphique illustre que le model de Weibull s'ajuste bien aux données. L'intervalle de confiance étant relativement étroit montre une bonne précision du modèle pour les données de Porto-Novo.

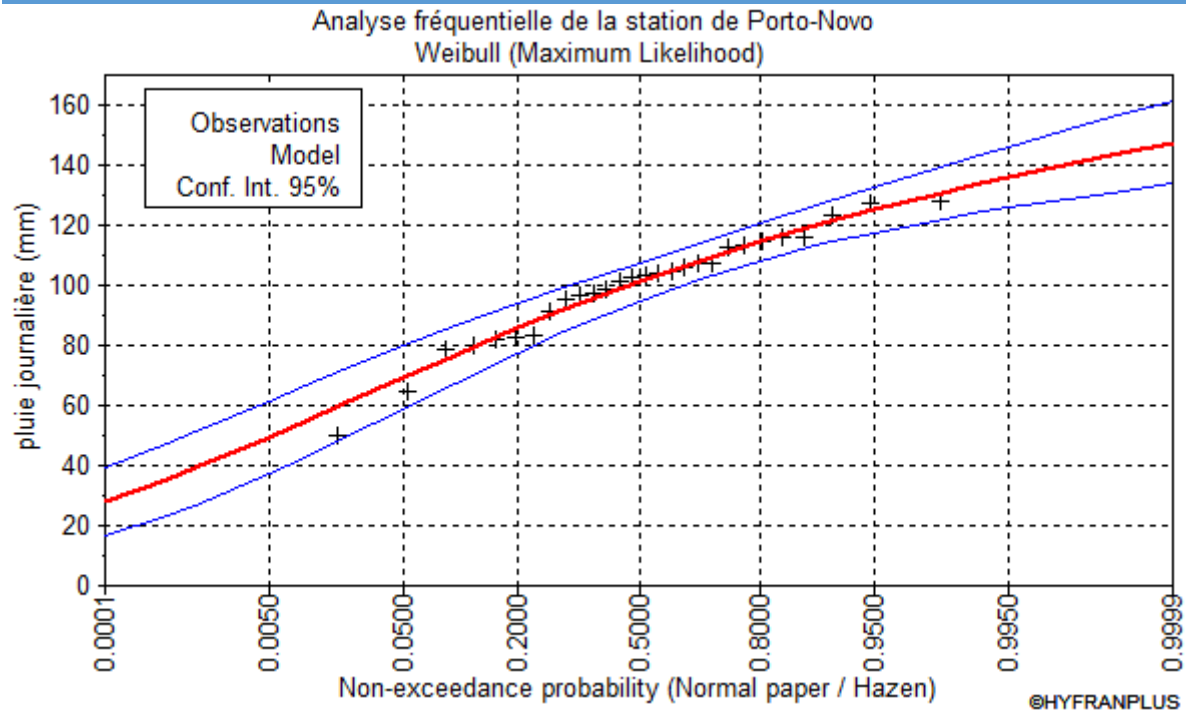


Figure 6: Ajustement de la distribution de Weibull aux précipitations maximales de Porto-Novo

3.2.1.3. Station d'Allada

- Tests d'hypothèse de la station d'Allada

Cette section présente les résultats des tests effectués aux données de la station d'Allada dans le but de vérifier si les données respectent les hypothèses nécessaires pour l'application de certains modèles statistiques et de garantir que les résultats de l'analyse seront validés. Le tableau 6 présente les différents résultats des tests effectués aux données de précipitation de la station d'Allada. Ce tableau montre que la p-value des différents tests (Indépendance, Stationnarité et Homogénéité) est supérieur au niveau significatif qui est de 0,05. Cela implique que les données sont indépendantes, stationnaire et homogène. De plus, les données étant indépendantes cela garantit que les valeurs des précipitations maximales ne sont pas influencées par des événements précédents ; la stationnarité des données veut dire que les précipitations ne montrent pas de changement systématique (augmentation ou diminution) au fil du temps ; l'homogénéité des données montre que les moyennes des deux échantillons ne sont pas significativement différentes.

Tableau 6: Résultats des tests d'hypothèse à Allada

TESTS	Indépendance (Wald-Wolfowitz)		Stationnarité (Kendall)		Homogénéité (Wilcoxon)	
	p-value	U	p-value	K	p-value	W
Station d'Allada	0.723	0.355	0.499	0.675	0.318	0.998
Conclusion	L'hypothèse H0 est acceptée avec un niveau significatif de 5%		L'hypothèse H0 est acceptée avec un niveau significatif de 5%		L'hypothèse H0 est acceptée avec un niveau significatif de 5%	

- **Ajustement de la loi de Gumbel**

Le tableau 7 présente les résultats de l'ajustement des précipitations maximales à la distribution de Gumbel. Ce tableau montre que l'ajustement des données de précipitations maximales à la loi de Gumbel présente des paramètres d'échelle (alpha) de 24,712 indiquant la dispersion des valeurs autour de la moyenne, et des paramètres de localisation (u) de 66,992. Le test de chi-carré, avec une valeur de X^2 de 7.25 et une p-value de 0.064, suggère que l'ajustement est statistiquement acceptable. En effet, la p-value supérieure à 0.05 indique qu'il n'y a pas suffisamment de preuves pour rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle les données suivent la distribution de Gumbel. Cela renforce la crédibilité de l'utilisation de cette loi pour les données de la station de Porto-Novo.

Tableau 7: Paramètre de la loi de Gumbel et du test d'adéquation

Désignation	Lois de Gumbell		Test de khi-carré	
	alpha	U	X^2	p-value
Paramètres	24.712	66.992	7.25	0.064

La figure 7 présente une analyse fréquentielle des précipitations maximales à la station de Porto-Novo en utilisant la distribution de Gumbel. Les croix (+) représentent les observations réelles des précipitations maximales, et les cercles rouges symbolisent les observations inactives. De l'observation du graphe on remarque que la plupart des données sont bien ajustées au modèle, bien que certaine observation inactive se trouve sous la courbe.

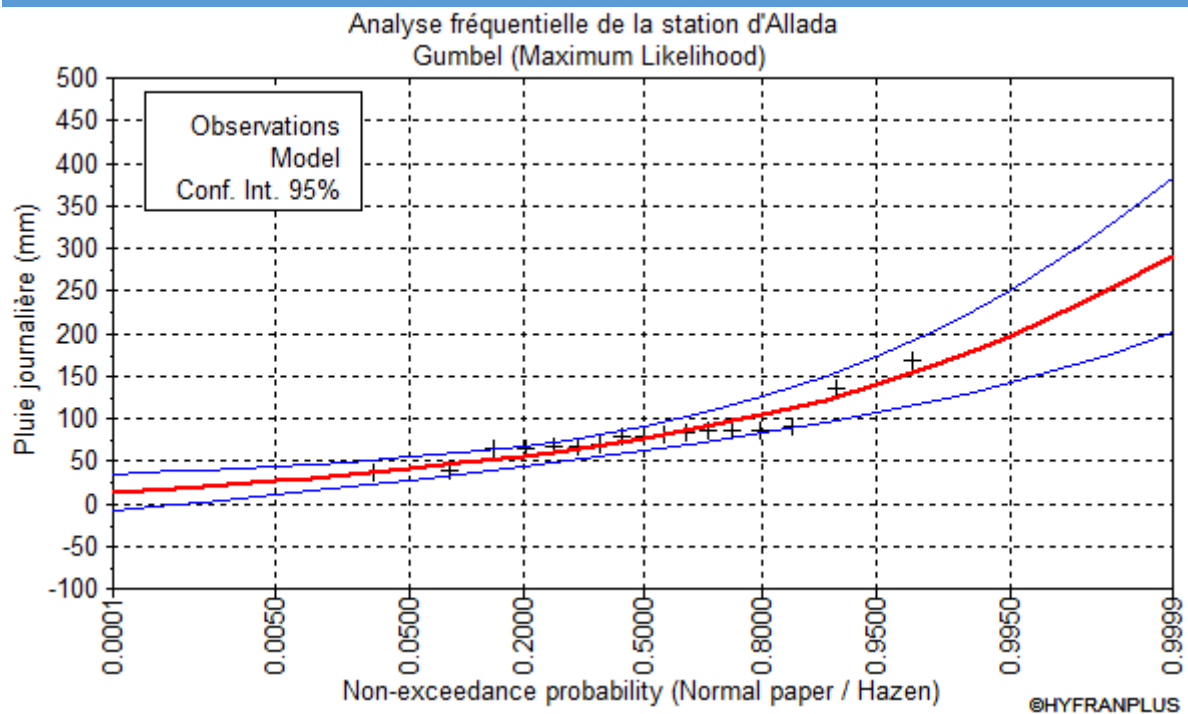


Figure 7: Ajustement de la distribution de Gumel aux précipitations maximales d'Allada

3.2.2. Périodes de retour des différentes stations

Le tableau 8 présente les précipitations estimées aux périodes de retour 2, 3, 5, 10, 20, 50 et 100 ans à la station de Cotonou, Porto Novo et Allada avec les intervalles de confiance associés.

Tableau 8: Valeurs des précipitations suivant les périodes de retour

Périodes de retour T (ans)	Précipitation maximale (mm)	Probabilités de non-dépassement	Intervalle de confiance
Cotonou			
2	99.5	0.500	88.5 – 110
3	114	0.667	100 – 127
5	129	0.800	112 – 146
10	149	0.900	127 – 171
20	168	0.950	141 – 195
50	192	0.980	159 – 226
100	211	0.990	172 - 250
Porto-Novo			
2	101	0.500	94.8 – 108
3	108	0.666	102 – 114
5	114	0.800	108 – 121
10	121	0.900	114 – 127
20	125	0.950	118 – 133

**EVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE SUIVANT LES SEUILS D'ALERTE AUX INONDATIONS PLUVIALES
DANS LES COMMUNES DE COTONOU, PORTO-NOVO ET ALLADA**

50	130	0.980	121 – 139
100	133	0.990	124 – 143
Allada			
2	76.0	0.500	61.9 – 90.2
3	89.3	0.666	71.9 – 107
5	104	0.800	81.9 – 126
10	123	0.900	94.0 – 151
20	140	0.950	105 – 176
50	163	0.980	119 – 208
100	181	0.990	130 – 231

3.2.3. Seuils d'alertes des différentes stations

Le tableau 9 présente les différents seuils d'alertes aux stations de Cotonou, Porto-Novo et Allada obtenus à Météo-Bénin(Projet SAP-Bénin, 2010). Ces seuils sont utilisés pour la prévision météorologique au niveau de la Météo-Bénin. Ils sont les mêmes pour Porto-Novo et Cotonou pour toutes les périodes de retour tandis qu'ils sont légèrement en bas pour Allada en raison de ses caractéristiques climatiques spécifiques.

Tableau 9: Seuil d'alertes des différentes stations avec les périodes de retour associées

Niveau d'alertes	Vertes (mm)	Jaune (mm)	Orange (mm)	Rouge (mm)
Cotonou	<50(<2ans)	50 – 80(2-5ans)	80 – 100(5-10ans)	>100(>10ans)
Porto-Novo	<50(<2ans)	50 – 80(2-5ans)	80 – 100(5-10ans)	>100(>10ans)
Allada	<40(<2ans)	40 – 70(2-5ans)	70–90(5-10ans)	>90(>10ans)

3.3. Comparaison de l'évolution des pluies en lien avec les seuils d'alertes pour chaque station

3.3.1. Dépassement des seuils par an sur les stations

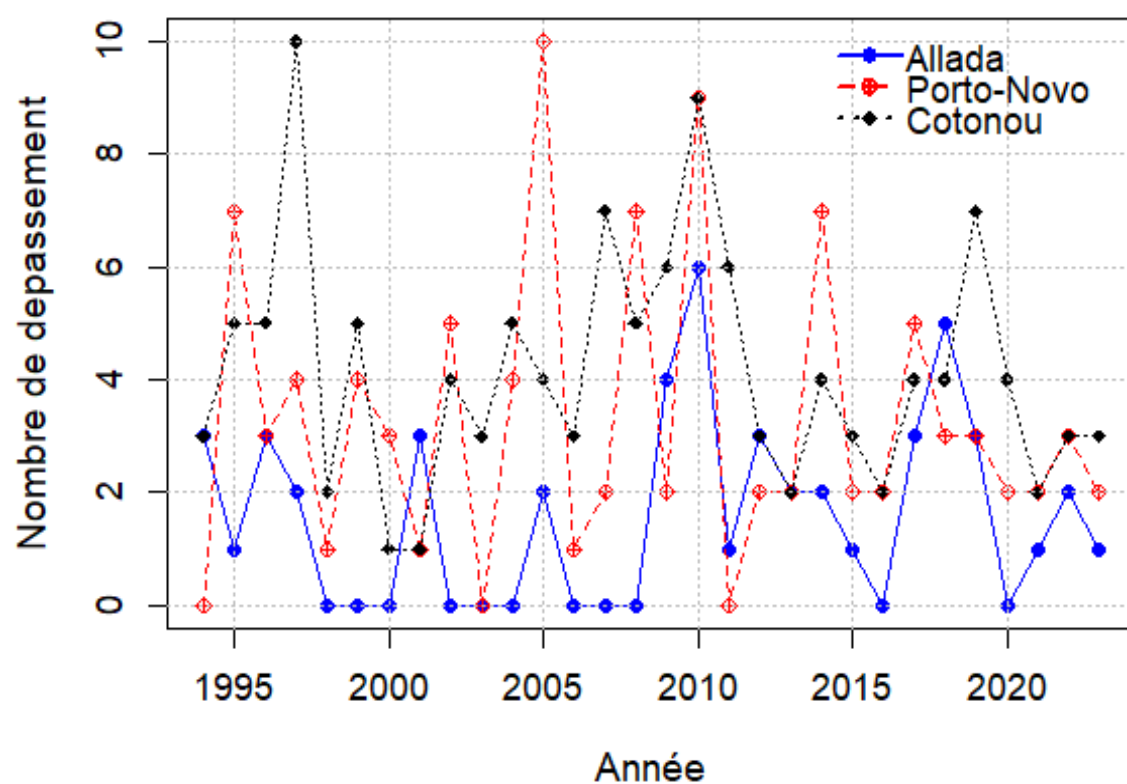
La figure 8 présente le dépassement de chaque seuil d'alerte (jaune, orange et rouge) des stations de Cotonou, Porto-Novo et Allada. L'analyse des trois figures révèle des tendances significatives sur la période 1994-2023. L'étude montre une hiérarchie claire dans la fréquence des dépassements selon le niveau d'alerte, avec une prédominance des alertes jaunes par rapport aux oranges et rouges. Les seuils jaunes présentent les dépassements les

plus fréquents, atteignant parfois jusqu'à 10 occurrences annuelles. Porto-Novo et Cotonou se distinguent par des dépassements plus nombreux qu'Allada, avec une intensification particulièrement marquée durant la période 2010-2015. Cette période semble avoir été critique pour les trois villes, suggérant des conditions particulièrement défavorables durant ces années. Concernant les seuils orange, les dépassements s'avèrent moins fréquents, dépassant rarement quatre occurrences annuelles. Une exception notable est observée à Porto-Novo vers 2020-2021, où un pic d'environ cinq dépassements a été enregistré. Allada maintient généralement des niveaux plus bas que ses voisines, confirmant une tendance générale à une meilleure stabilité. Les dépassements des seuils rouges, représentant les alertes les plus graves, sont les plus rares mais aussi les plus préoccupants. Deux pics majeurs se détachent : l'un à Porto-Novo vers 1998-2000 et l'autre à Cotonou aux environs de 2010.

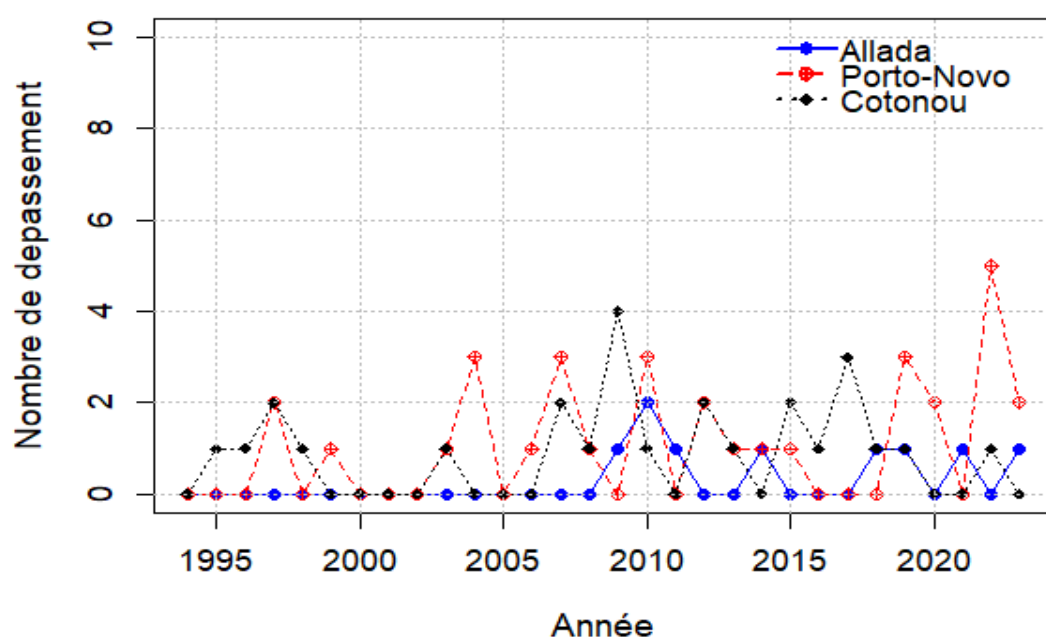
Une analyse comparative des trois villes met en évidence la ville d'Allada, qui maintient généralement des niveaux de dépassement plus bas que Porto-Novo et Cotonou. Cette différence pourrait s'expliquer par des facteurs géographiques, ou environnementaux spécifiques à chaque ville. La variabilité interannuelle importante observée dans les trois graphiques suggère également l'influence de facteurs externes cycliques ou ponctuels sur ces dépassements.

En conclusion, ces données soulignent l'importance d'une surveillance continue et d'une gestion adaptée des risques dans ces trois villes, avec une attention particulière pour Porto-Novo et Cotonou qui semblent plus vulnérables aux dépassements de seuils d'alerte.

Depassement des seuils jaunes par année



Depassement des seuils Oranges par année



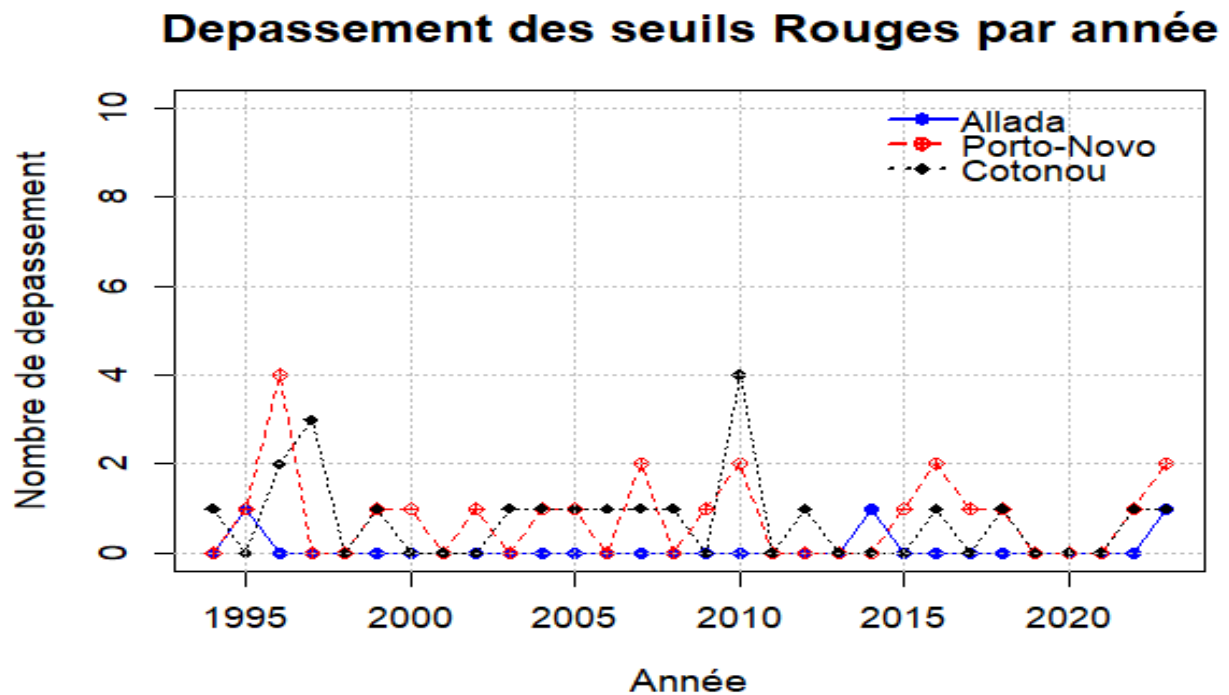


Figure 8: Présentation du dépassement des seuils d'alertes suivant chaque station

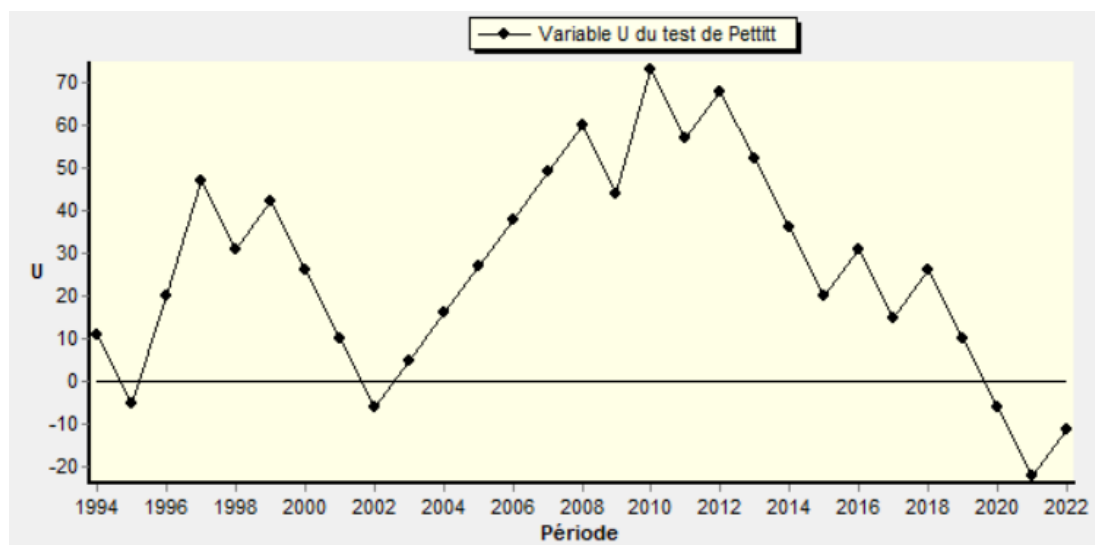
3.3.2. Détection de rupture dans le dépassement des différents seuils d'alertes

3.3.2.1. Seuils rouge

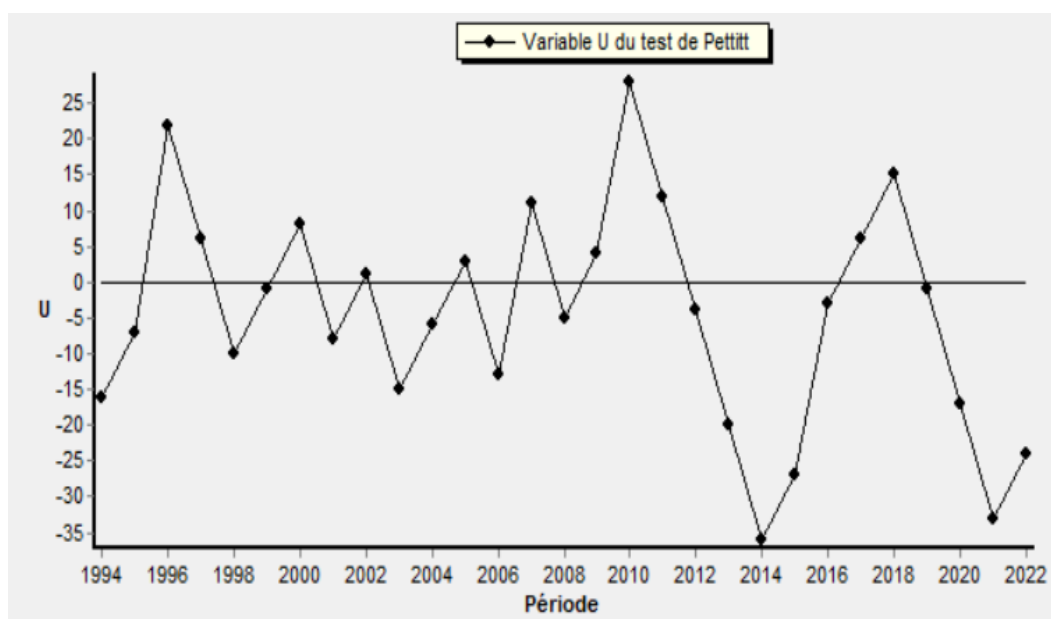
La figure 9 présente l'évolution de la variable U de Pettitt du nombre de dépassement des seuils rouges dans les stations de Cotonou, Porto-Novo et Allada sur la période de 1994 à 2023. L'analyse de cette figure montre que l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée aux trois seuils (90%, 95%, et 99%) à Allada, à Cotonou et à Porto-Novo.

EVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE SUIVANT LES SEUILS D'ALERTE AUX INONDATIONS PLUVIALES
DANS LES COMMUNES DE COTONOU, PORTO-NOVO ET ALLADA

Cotonou



Porto-Novo



Allada

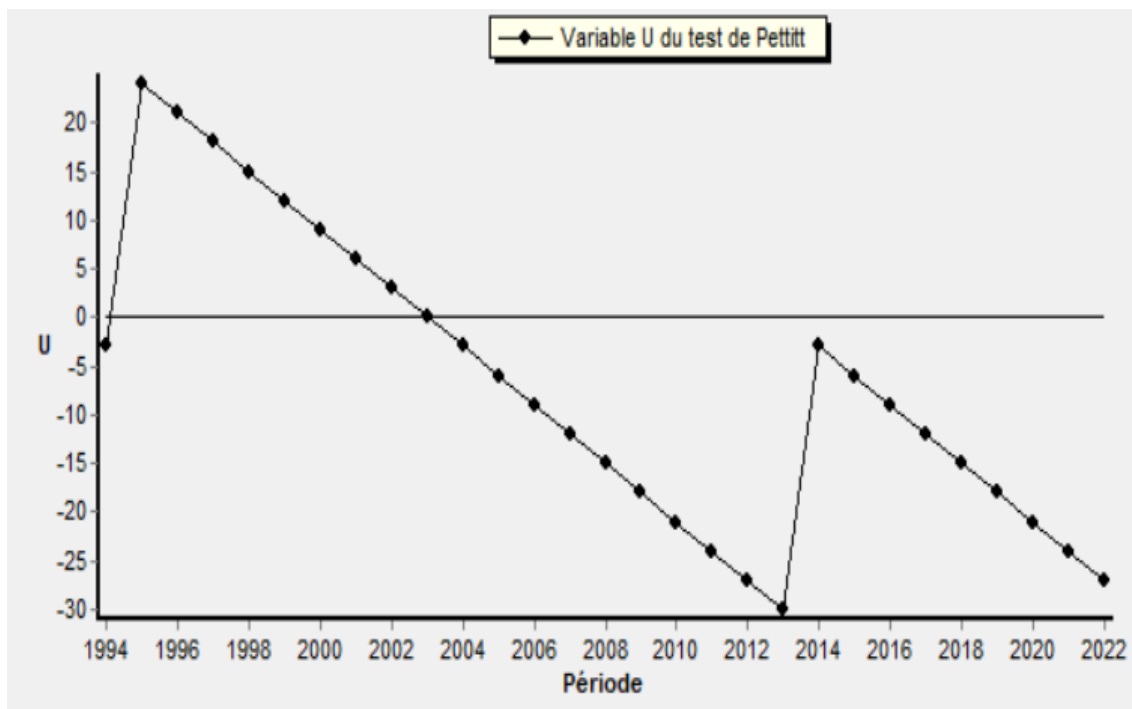
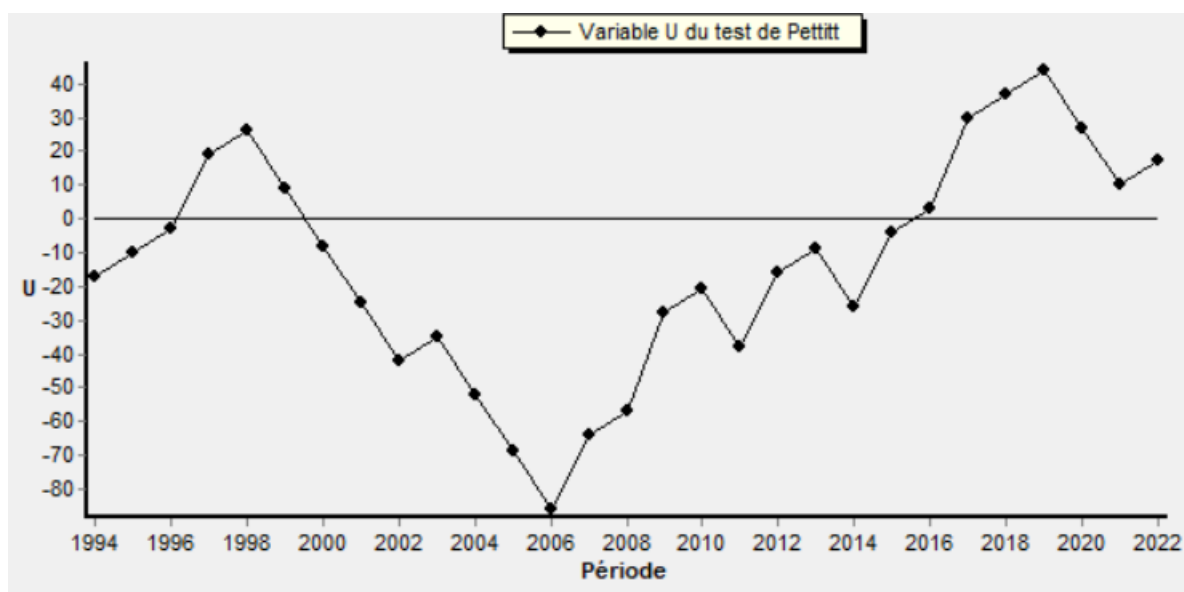


Figure 9: Evolution de la variable U du Pettitt du dépassement des seuils rouges

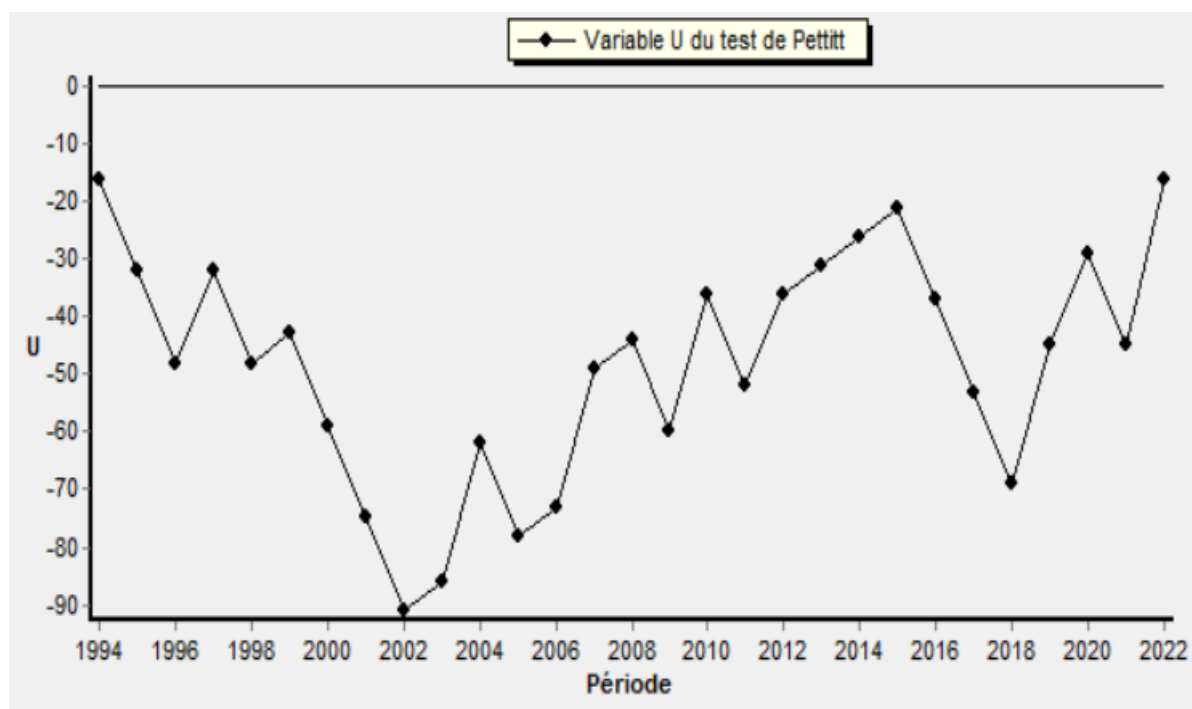
3.3.2.2. Seuils orange

La figure 10 présente l'évolution de la variable U de Pettitt du nombre de dépassement des seuils orange dans les stations Cotonou, Porto-Novo et Allada sur la période de 1994 à 2023. L'analyse de cette figure montre que l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée aux trois seuils (90%, 95%, et 99%) à Cotonou et à Porto-Novo. Tandis que pour la station d'Allada, l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée aux seuils de (95% et 99%) et rejetée au seuil de 90%. Ce qui confirme une rupture de stationnarité à la station d'Allada et cette rupture est observé en 2008.

Cotonou



Porto-Novo



Allada

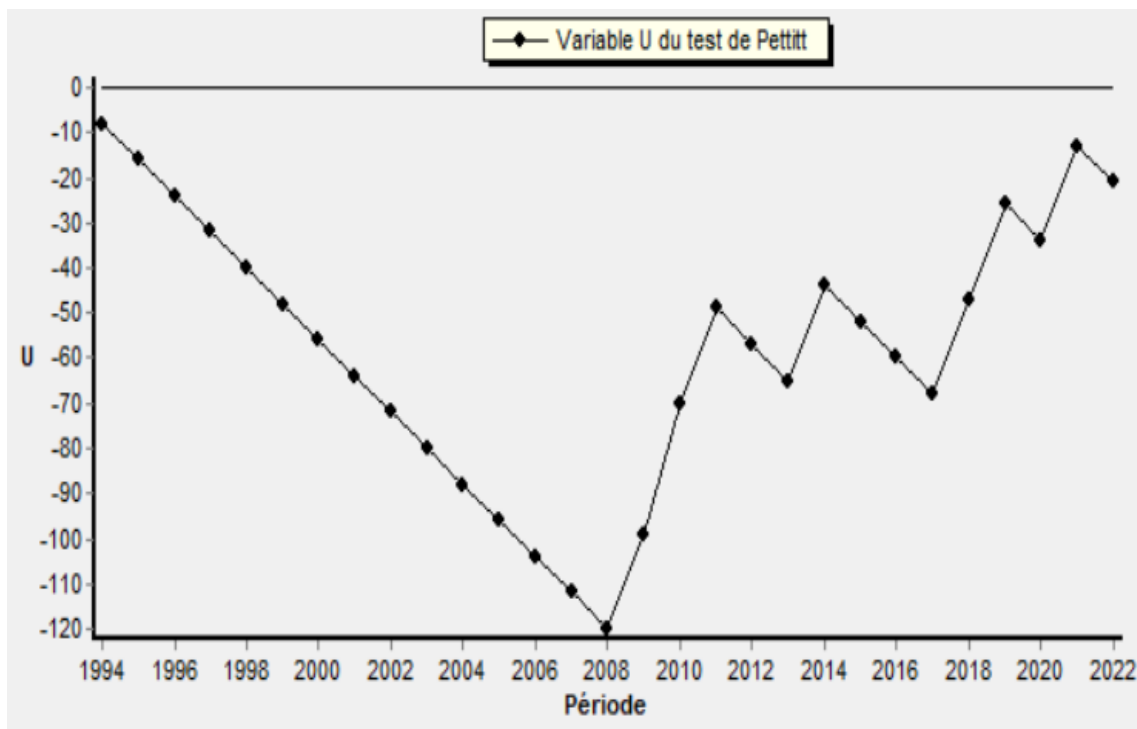


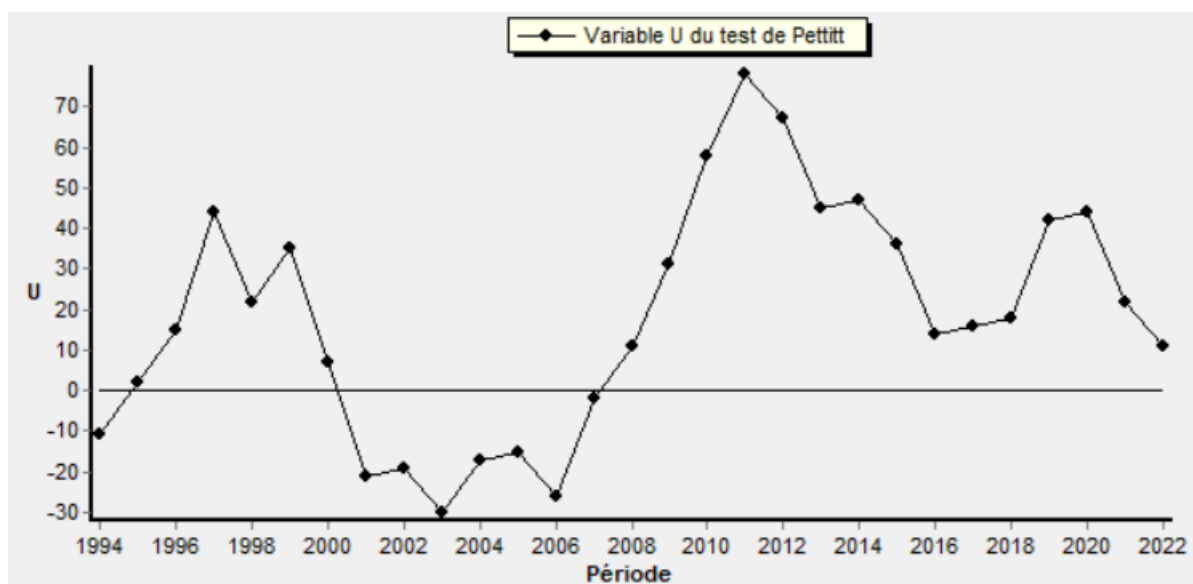
Figure 10: Evolution de la variable U du pettitt du dépassement des seuils orange

3.3.2.3. Seuils jaune

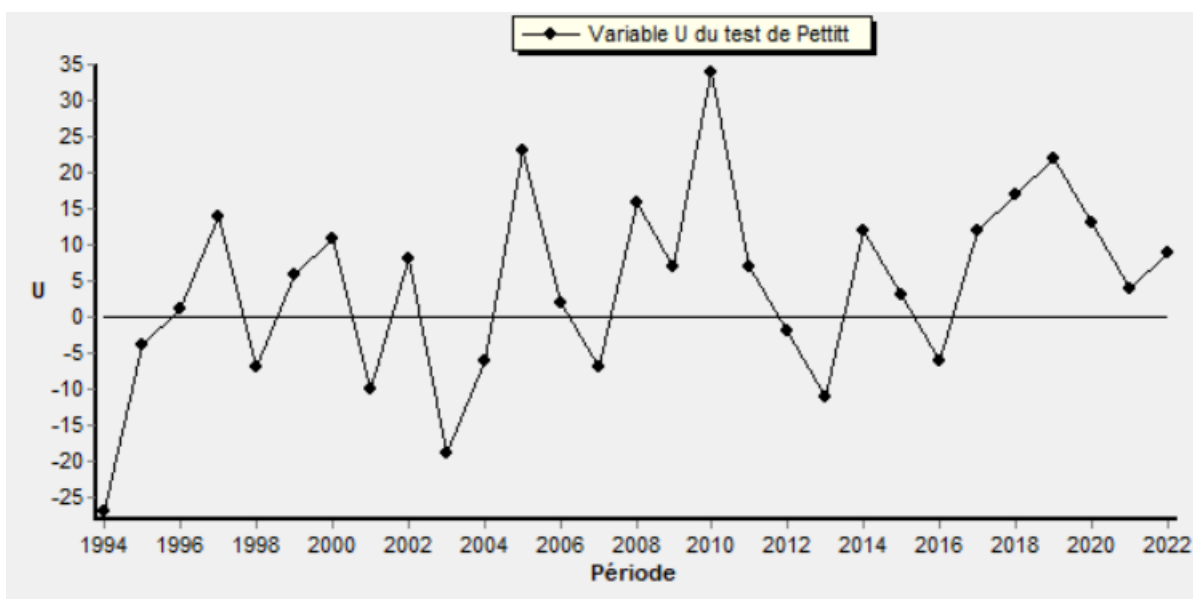
La figure 11 présente l'évolution de la variable U de Pettitt du nombre de dépassement des seuils jaune dans les stations Cotonou, Porto-Novu et Allada sur la période de 1994 à 2023. L'analyse de cette figure montre que l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée aux trois seuils (90%, 95%, et 99%) à Allada, à Cotonou et à Porto-Novu.

EVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE SUIVANT LES SEUILS D'ALERTE AUX INONDATIONS PLUVIALES
DANS LES COMMUNES DE COTONOU, PORTO-NOVO ET ALLADA

Cotonou



Porto-Novo



Allada

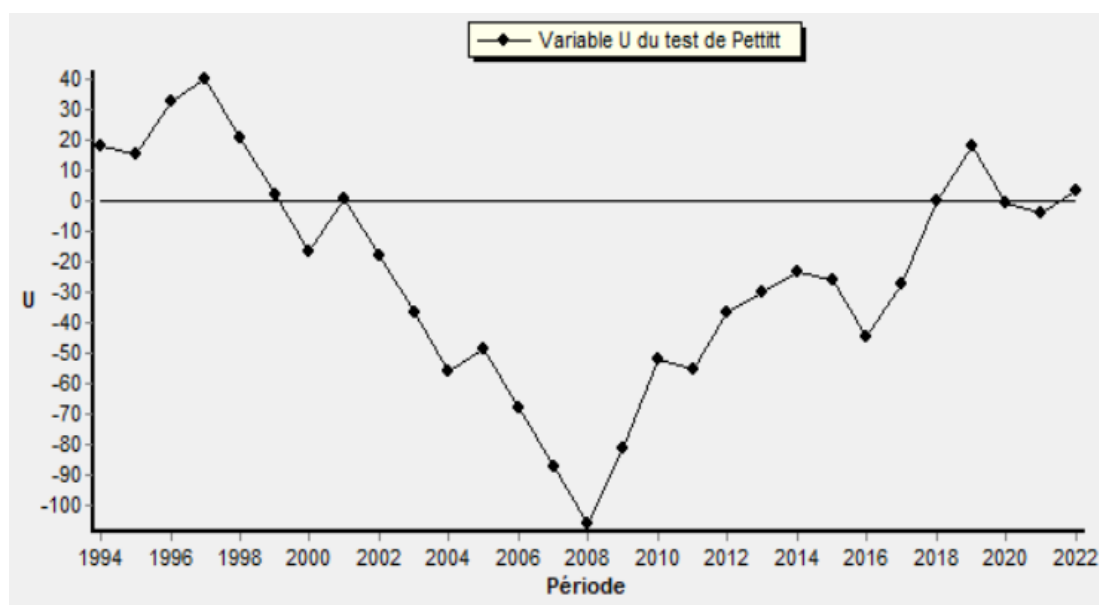


Figure 11: Evolution de la variable U du test de Pettitt du dépassement des seuils jaune

3.3.3 Détection de tendance dans le dépassement des différents seuils d'alertes

Le tableau 10 présente les résultats du test de Mann-Kendall. L'analyse du test de Mann-Kendall appliquée aux trois stations montre que seule la station d'Allada présente une tendance significative à la hausse pour le seuil orange (80-100 mm). Toutes les autres tendances observées, qu'elles soient positives ou négatives, ne sont pas statistiquement significatives au seuil de 5%. Ces résultats suggèrent une relative stabilité dans l'occurrence des pluies extrêmes pour la majorité des seuils étudiés.

Tableau 10: Résultats du test de tendance de Mann-Kendall

Stations	Test de Mann-Kendall			
	p-value	U (tau de Kendall)	Tendance au seuil de 5%	Sens de la tendance
Seuil Jaune 50 mm – 80 mm				
Allada	0.48	0.101	Non significative	positif
Cotonou	0.57	-0.08	Non significative	négatif
Porto-Novo	0.98	-0.004	Non significative	négatif
Seuil Orange 80 mm – 100 mm				
Allada	0.01	0.37	Significative	positif
Cotonou	0.67	0.06	Non significative	positif
Porto-Novo	0.09	0.25	Non significative	positif
Seuil Rouge supérieur à 100 mm				
Allada	0.68	0.07	Non significative	positif
Cotonou	0.35	-0.14	Non significative	négatif
Porto-Novo	0.84	0.03	Non significative	positif

3.4. Discussion

L'analyse fréquentielle des précipitations maximales dans les communes de Cotonou, Porto-Novo, et Allada a révélé des comportements spécifiques en fonction des modèles statistiques utilisés. L'analyse des données a montré une grande variabilité des événements pluvieux extrêmes, avec des valeurs oscillant entre 0 mm et des pics remarquables atteignant jusqu'à 194,2 mm à Cotonou en 2003. Ces résultats concordent avec les observations de plusieurs auteurs dans la région, comme (Amoussou et al., 2018) qui ont également mis en évidence une augmentation de la fréquence et de l'intensité des pluies extrêmes dans le sud-est du Bénin. Cette variabilité des précipitations extrêmes souligne l'importance de mieux comprendre leur dynamique afin d'anticiper leurs impacts sur les écosystèmes et les activités humaines.

Les résultats ont montré que les modèles de Gumbel et de Weibull s'ajustaient bien aux données de précipitations extrêmes des trois stations étudiées. Cela a permis d'estimer les quantiles de pluie associée à différentes périodes de retour et de les comparer aux seuils d'alertes définis par Météo-Bénin. Ces démarches analytiques sont similaires à celles employées par d'autres études, comme celle de (Koumassi et al., 2015) qui a également utilisé l'ajustement à la loi de Gumbel pour évaluer les risques d'inondation dans la ville de Cotonou.

L'analyse du dépassement de ces seuils a révélé des tendances significatives, avec une prédominance des alertes jaunes, suivies des alertes orange et rouges. Les stations de Porto-Novo et Cotonou se sont distinguées par un nombre de dépassements plus élevé que la station d'Allada, notamment durant la période 2010-2015. Ces résultats soulignent la plus grande vulnérabilité de ces deux communes aux événements pluvieux extrêmes. Des études antérieures, comme celle de (Houngpè et al., 2016), ont également mis en évidence une augmentation des inondations urbaines à Cotonou et Porto-Novo, liée à l'intensification des précipitations.

En conclusion, cette étude a permis de mieux caractériser l'évolution de la pluviométrie en lien avec les seuils d'alertes aux inondations dans les communes de Cotonou, Porto-Novo et Allada. Les résultats obtenus soulignent l'importance d'une surveillance continue et d'une gestion adaptée des risques d'inondation dans ces zones urbaines, en particulier pour Porto-

Novo et Cotonou qui apparaissent plus vulnérables aux événements pluvieux extrêmes. Ces conclusions rejoignent celles d'autres travaux menés dans la région et appellent à une prise en compte renforcée des risques hydro-climatiques dans la planification et l'aménagement de ces villes.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La récurrence des inondations dans les métropoles ouest africaines oblige à s'interroger sur la part des aléas dans cette situation. C'est ainsi que les précipitations extrêmes des villes de Cotonou, Porto-Novo et Allada ont été analysées et comparées en lien avec les seuils d'alertes définis pour ces villes. Les résultats obtenus à travers cette étude révèlent des dépassements fréquents des seuils d'alerte aux inondations dans les communes étudiées, en particulier pour des périodes de retour courtes. De l'évolution des dépassements des seuils d'alerte, l'analyse a révélé des tendances contrastées selon les niveaux d'alerte et les stations. Les seuils jaunes ont été les plus fréquemment dépassés, atteignant jusqu'à 10 occurrences annuelles, en particulier à Porto-Novo et Cotonou durant la période 2010-2015. Bien que les dépassements des seuils orange et rouges aient été moins nombreux, certains événements marquants ont été observés, comme les pics à Porto-Novo dans les années 1998-2000 et à Cotonou vers 2010 pour le seuil rouge. Cela souligne une vulnérabilité croissante aux inondations pluviales dans ces zones urbaines. Face à ces constats, il est recommandé de renforcer les infrastructures de drainage pour mieux gérer les volumes d'eau lors de fortes précipitations, notamment dans les zones densément peuplées comme Cotonou et Porto-Novo, où les risques d'inondation sont exacerbés par l'urbanisation rapide. Une amélioration des systèmes de prévision météorologique s'impose également, avec l'intégration de modèles de prévision plus performants pour anticiper les épisodes de précipitations extrêmes. Ces efforts pourraient être soutenus par une collaboration accrue avec des organismes nationaux comme l'ANM, pour affiner les seuils d'alerte et les mettre à jour régulièrement en fonction des nouvelles données climatiques.

Par ailleurs, la sensibilisation des populations aux risques d'inondation et à la gestion des situations d'urgence est cruciale. Des campagnes d'information et la mise en place de systèmes d'alerte efficaces, ainsi que des simulations d'évacuation, aideraient à réduire les impacts potentiels des inondations. Il est également suggéré de poursuivre les recherches, notamment en analysant l'impact à long terme du changement climatique sur les régimes de précipitations. L'étude de la relation entre l'aménagement du territoire et la vulnérabilité aux inondations serait utile pour orienter des politiques de gestion urbaine adaptées. L'utilisation de nouvelles technologies pour surveiller en continu les événements climatiques contribuerait à améliorer la gestion des risques d'inondations dans ces communes.

En somme, une gestion proactive et intégrée des risques d'inondation est essentielle pour protéger ces zones urbaines contre les effets dévastateurs des précipitations extrêmes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

1. Adeyemi, T., & Gbaguidi, F. (2021). Analyse de l'évolution des événements pluvieux extrêmes dans les zones urbaines du Bénin. *Revue de Climatologie*, 48, 233-249 ;
2. Afouda, A., Hounkonnou, N., & Yabi, I. (2014). Étude des pluies extrêmes au Bénin : comparaison des zones guinéenne et soudanienne. *Journal Hydrologique du Bénin*, 12(3), 142-156 ;
3. Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., & Forzieri, G. (2019). Global risk assessment and early warning systems for flood management. *Journal of Hydrology*, 21, 160-170 ;
4. Amoussou, E., Vodounou, J., & Mama, B. (2022). Analyse de l'évolution des quantiles de pluie et seuils d'alerte dans le bassin du Mono. *Journal of Water Resources in West Africa*, 6(4), 341-356 ;
5. Amoussou, Tunde, E., Camberlin, P., & Mahé, G. (2014). *Impact des inondations dans la ville côtière de Cotonou (Bénin)*. *Cahiers d'Outre-Mer*, 267(3), 297-319 ;
6. Boko, M., & Niang, I. (2008). *Étude de la vulnérabilité des villes côtières du Bénin face aux événements climatiques extrêmes*. Rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ;
7. Cools, J., Innocent, N., & Adjei, P. (2016). Improving early warning systems for flood risk management in developing countries: Case study of Ghana. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 8, 120-130 ;
8. Dossou, K. M. R., B. (2007). "Le risque d'inondation dans les zones périurbaines de Porto-Novo". *Journal of Environmental Management*, 84(1), 11-18 ;
9. Dossou-Yovo, D., & Boko, M. (2020). Application de la loi de Gumbel aux précipitations extrêmes pour l'estimation des périodes de retour à Cotonou. *Hydrologie et Précipitations Tropicales*, 24(2), 134-147 ;
10. Dossou-Yovo, G., & Assogba, M. (2019). *Analyse de la fréquence des précipitations extrêmes et leur impact sur les inondations urbaines: Cas de Cotonou et Porto-Novo*. *Revue de Géosciences et Environnement*, 13(2), 101-117 ;
11. Dossou, A., & Glehouenou-Dossou, B. (2007). La vulnérabilité de la ville de Cotonou face au changement climatique. *Revue de Géographie du Bénin*, 9(1), 22-35 ;
12. Douglas, I., Alam, K., Maghenda, M., McDonnell, Y., McLean, L., & Campbell, J. (2008). Unjust waters: Climate change, flooding and the urban poor in Africa. *Environment and Urbanization*, 20(1), 187-205.
13. Gomez, C., & Kamara, S. (2017). Définition des seuils d'alerte d'inondation en Afrique de l'Ouest: Une approche intégrée. *Climat et Environnement Africain*, 5(1), 89-102 ;
14. Gnele, M., Kpodenou, R., & Alidou, S. (2020). Analyse des risques d'inondation et de la vulnérabilité à Cotonou. *Sciences et Technologies du Bénin*, 15(2), 105-117 ;

15. Hounkpè, J., Mama, D., & Houedakor, A. (2016). Méthodologie d'évaluation des risques d'inondation en milieu urbain au Bénin. *Spatial Analysis and Urban Hydrology*, 13(2), 208-224 ;
16. Jha, A., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). *Cities and Flooding: A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century*. World Bank Publications ;
17. Koné, B., Yapo, S., & Kouassi, A. (2019). Effets des changements climatiques sur les régimes pluviométriques et risques d'inondation en Afrique de l'Ouest. *Revue Climatologique de l'Afrique*, 22(3), 98-110 ;
18. Lebel, T., Cappelaere, B., & Galle, S. (2009). The AMMA field campaigns: Multiscale observations in the West African region. *Journal of Hydrometeorology*, 10(1), 1-23 ;
19. Lawin, E., Kaki, C., & Dossou, F. (2019). Les tendances des précipitations au sud du Bénin dans le contexte des changements climatiques. *Bénin Climatologique*, 7(2), 77-93 ;
20. Mahé, G., & Paturel, J. E. (2009). *Variabilité et tendances des précipitations en Afrique de l'Ouest*. Paris, France : Editions IRD ;
21. Oyerinde, A., Hountondji, Y. C., & Lawin, A. E. (2015). *Impacts des événements climatiques extrêmes dans les villes béninoises : le cas de Cotonou*. Cotonou, Bénin : Editions de l'Université de Parakou ;
22. Soglo, Y., Vodouhe, S., & Agboh, J. (2018). Analyse de tendance des précipitations sur 50 ans au sud du Bénin. *Hydrologie et Variabilités Climatologiques*, 6(4), 214-229 ;
23. Vissin, E., Assogba, E., & Dossa, F. (2019). Impact de l'imperméabilisation des sols sur le ruissellement à Porto-Novo. *Revue Béninoise de l'Urbanisme et de l'Environnement*, 9(3), 132-145 ;
24. Zinsou, J., & Agbossou, E. (2024). Perspectives pour la résilience aux risques d'inondation en intégrant des modèles climatiques régionaux au Bénin. *Journal of Climate Adaptation*, 2(1), 55-70.

ANNEXES

Script des graphiques

#seuils d'alertes cotonou

```
Seuils Cotonou<- data. Frame (Niveau = factor(c ("Vert", "Jaune", "Orange", "Rouge"), levels  
= c ("Rouge", "Orange", "Jaune", "Vert")),
```

```
Min = c (0, 50, 80, 100),
```

```
Max = c (50, 80, 100, Inf.))
```

#création du graphique

Ggplot () +

#ajout des zones de couleur pour chaque niveau d'alerte

```
geom_rect(data = seuils_cotonou, aes(xmin = -Inf, xmax = Inf, ymin = Min, ymax = Max,  
fill = Niveau), alpha = 0.3) +
```

#Tracer la ligne des quantiles

```
geom_line(aes(x = return_periods, y = quantiles_Cotonou), color = "blue", size = 1) +
```

#Ajout des points correspondant aux périodes de retour

```
geom_point(aes(x = return_periods, y = quantiles_Cotonou), color = "black", size = 2) +
```

#Ajustement des couleurs pour les zones d'alertes

```
scale_fill_manual(values = c("Vert" = "green", "Jaune" = "yellow", "Orange" = "orange",  
"Rouge" = "red")) +
```

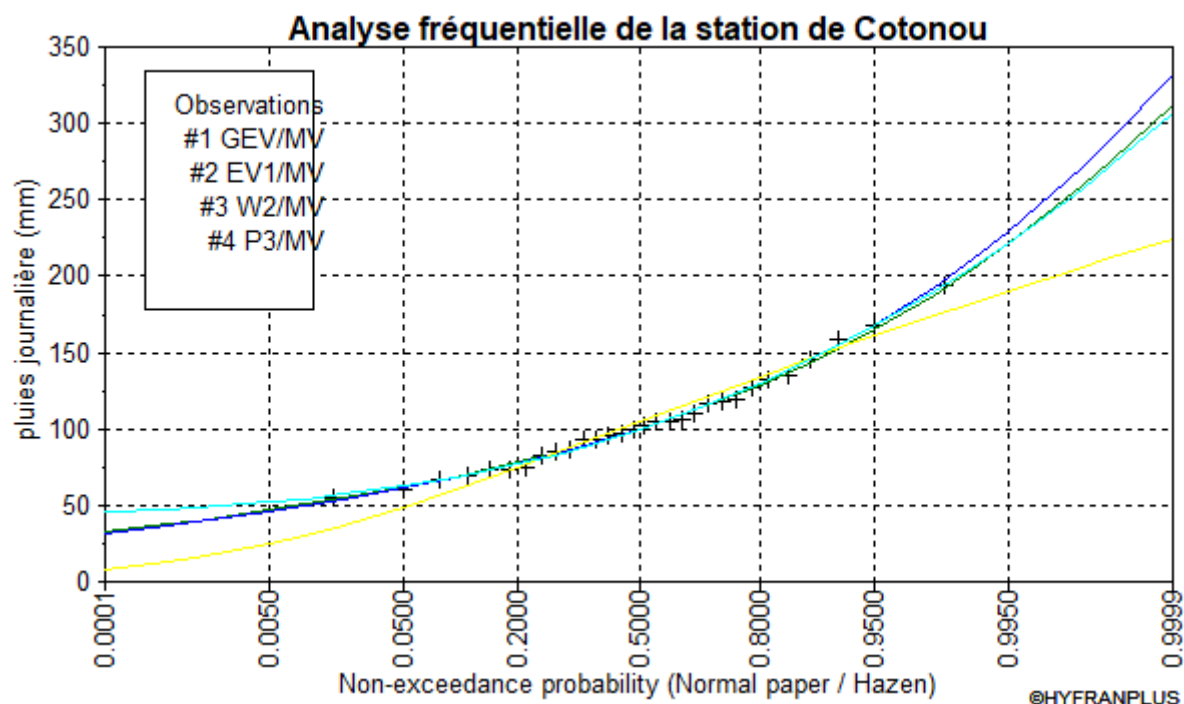
#Etiquette et titre du graphique

```
Labs (title = "Quantiles de précipitation à Cotonou en fonction des seuils d'alertes", x =  
"Période de retour (annes)", y = "Quantiles de précipitation (mm)") +
```

#Thème pour améliorer l'apparence du graphique

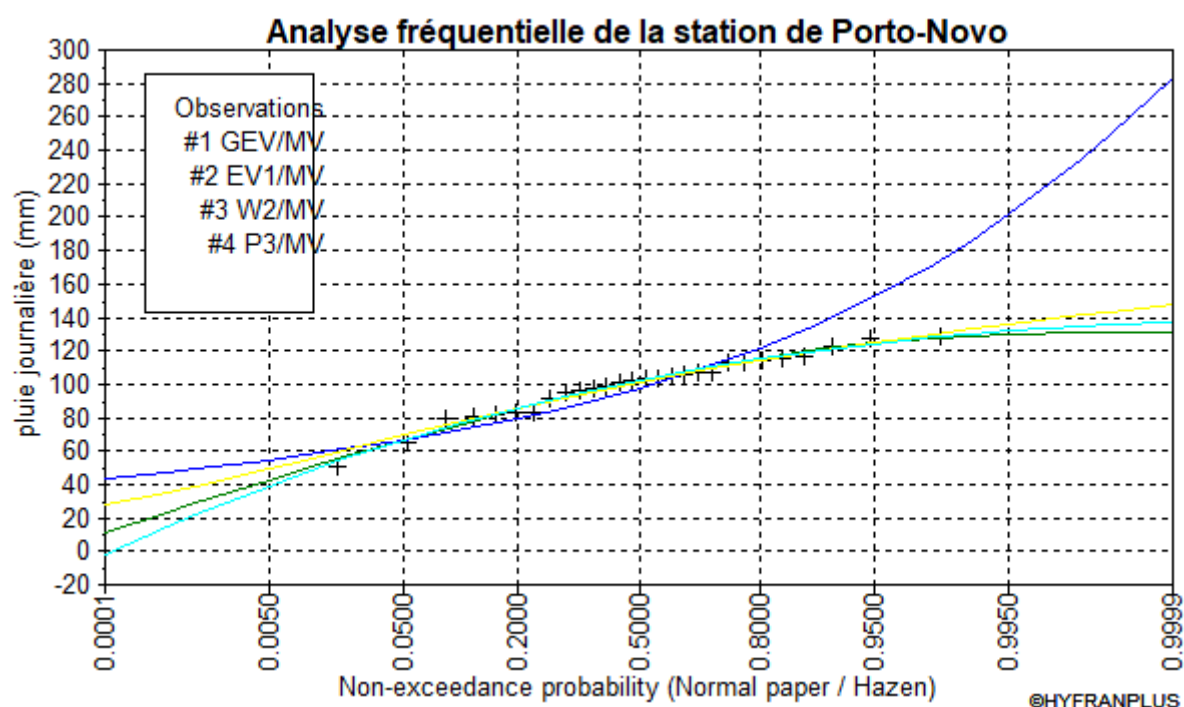
```
Theme_minimal ()
```

Comparaison graphique et par critère des maxima de pluie de la station de Cotonou



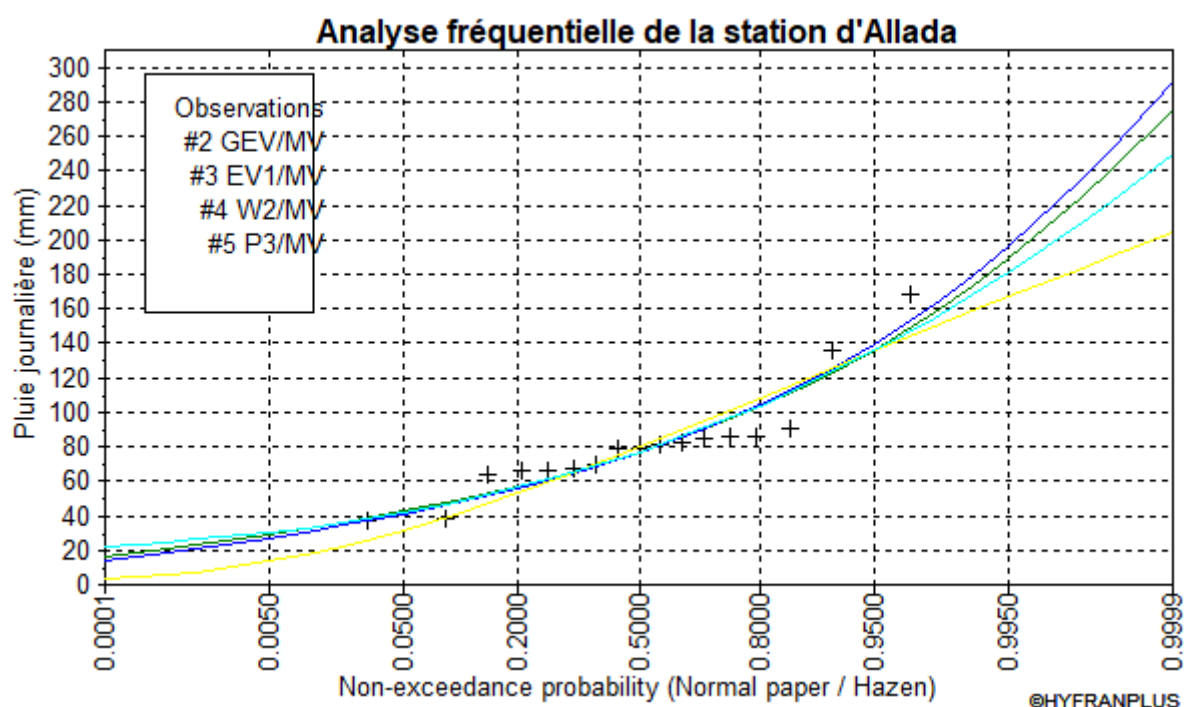
Model	Nb param.	XT	P(Mi)	P(Mi/x)	BIC	AIC
Gumbel (Maximum Likelihood)	2	149,037	25,00	65,24	296,084	293,281
Pearson type 3 (Maximum Likelihood)	3	149,153	25,00	15,69	298,934	294,731
GEV (Maximum Likelihood)	3	147,328	25,00	12,28	299,424	295,220
Weibull (Maximum Likelihood)	2	149,088	25,00	6,80	300,606	297,803

Comparaison graphique et par critère des maxima de pluie de la station de Porto-Novo



Model	Nb param.	XT	P(Mi)	P(Mi/x)	BIC	AIC
Weibull (Maximum Likelihood)	2	120,523	25,00	76,49	245,107	242,442
GEV (Maximum Likelihood)	3	121,088	25,00	23,37	247,478	243,481
Gumbel (Maximum Likelihood)	2	137,210	25,00	0,14	257,723	255,059
Pearson type 3 (Maximum Likelihood)	3	120,515	25,00	N/D	N/D	N/D

Comparaison graphique et par critère des maxima de pluie de la station de Allada



Model	Nb param.	XT	P(Mi)	P(Mi/x)	BIC	AIC
Gumbel (Maximum Likelihood)	2	122,605	25,00	58,71	157,094	155,548
GEV (Maximum Likelihood)	3	120,741	25,00	15,46	159,762	157,445
Pearson type 3 (Maximum Likelihood)	3	121,727	25,00	13,39	160,050	157,733
Weibull (Maximum Likelihood)	2	124,293	25,00	12,45	160,196	158,650