

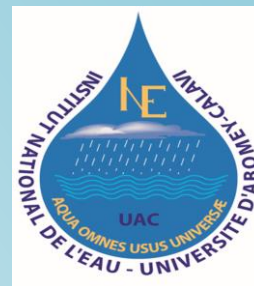


UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=====



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

d'OLIVEIRA Bergez Merveille Audrey

Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE Professionnelle en Hydrologie

OPTION : Hydrologie Quantitative

=====

**CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES
DUES AUX PRECIPITATIONS DANS LA VILLE
DE COTONOU**

=====

Maître de Mémoire

Dr Jean HOUNKPE

Dr Naboua KOUHOUNDJI



ANNEE ACADEMIQUE : 2023-2024

Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents

- ✓ Monsieur d'OLIVEIRA T. Arnaud
- ✓ Madame d'OLIVEIRA A. Christiane, née ATOASSI

Remerciements

Je tiens à remercier Dieu pour la santé et la protection qu'il m'a accordé durant tout ce parcours et toutes les personnes de près ou de loin sans qui la réalisation de ce travail n'aurait pas été possible.

Ma profonde reconnaissance va notamment à l'endroit de :

- **Dr. Jean HOUNKPE** enseignant chercheur qui m'a proposé ce thème, pour son accompagnement, ses conseils et sa disponibilité sans faille tout au long de ce travail ;
- **Dr Naboua KOUHOUNDI** qui m'a guidé, pour son accompagnement, son aide et pour sa disponibilité sans faille tout au long de ce travail ;
- **Dr Thomas SOGBEDI** qui a été d'une aide précieuse et pour sa disponibilité sans faille ;
- **Monsieur Jérôme AHOUANDJINOU** pour son assistance et pour son aide tout au long de ce travail ;
- **Monsieur Franck OLODO et toute l'équipe de Météo Bénin**, pour leur accueil, leur esprit d'équipe et leur collaboration tout au long de mon stage à l'Agence Nationale de la Météorologie du Bénin (METEO-BENIN) ;
- **Au Professeur Flavien DOVONOU**, Chef 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 Hydrologie ;
- **Tous les enseignants** de la Licence Professionnelle en Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau à l'Institut National de l'Eau, recevez ma profonde gratitude ; vos efforts ne sont pas vains ;
- **Tous les Honorables membres du Jury** qui ont apprécié ce modeste travail ; merci pour le temps sacrifié au détriment de vos occupations pour l'analyse et l'amélioration de ce document ;
- **Tous nos camarades de promotion** pour l'ambiance et l'entraide qui ont régnées tout au long de notre formation, bonne suite à tous ;
- **Tous les membres de ma famille**, pour leur soutien, prière et leur amour inconditionnel.

Résumé

Les inondations causées par les pluies extrêmes représentent une menace majeure pour les infrastructures et les populations urbaines, en particulier dans les villes côtières comme Cotonou. Cette étude vise à cartographier les zones inondables de la ville de Cotonou en fonction des pluies de différentes périodes de retour (2, 5, 10, 20, 30, et 50 ans) pour mieux comprendre sa répartition spatiale et faciliter la gestion des aléas. Pour ce faire, une analyse fréquentielle des hauteurs de précipitations a été réalisée à partir des données de trois stations météorologiques de Cotonou, couvrant la période de 1993 à 2023. Ces données ont permis de déterminer les quantiles de précipitations associés aux différentes périodes de retour, qui ont ensuite été spatialement interpolés à l'aide de techniques de Systèmes d'Information Géographique (SIG). Les résultats montrent que les zones basses, notamment autour du lac Nokoué et des principaux cours d'eau, sont particulièrement exposées pour des périodes de retour courtes, tandis que les inondations de longue période affectent également des zones plus densément urbanisées. Cette cartographie permet d'identifier les priorités pour des interventions de drainage et de zonage urbain afin de renforcer la résilience de Cotonou face aux risques d'inondation. Ces résultats pourront servir de base pour des actions de prévention et d'aménagement dans un contexte de changement climatique.

Mots clés : Inondations pluviales, analyse fréquentielle, périodes de retour, Cotonou, cartographie des zones inondables, SIG.

Abstract

Flooding caused by extreme rainfall poses a major threat to urban infrastructure and populations, particularly in coastal cities such as Cotonou. This study aims to map the flood zones of the city of Cotonou according to different return periods (2, 5, 10, 20, 30, and 50 years) to better understand the spatial distribution of flood risks and facilitate hazard management. To do this, a frequency analysis of precipitation was carried out using data from three weather stations in Cotonou, covering the period from 1993 to 2023. These data helped to determine the precipitation quantiles associated with the different return periods, which were then spatially interpolated using Geographic Information Systems (GIS) techniques. The results show that low-lying areas, particularly around Lake Nokoué and major rivers, are particularly vulnerable for short return periods, while long-term floods also affect more densely urbanized areas. This mapping helps identify priorities for drainage and urban zoning interventions to strengthen Cotonou's resilience to flood risks. These results can serve as a basis for prevention and development actions in a context of climate change.

Keywords: Pluvial floods, frequency analysis, return periods, Cotonou, flood zone mapping, GIS.

Liste des sigles et acronymes

AIC	:	Akaike Information Criterion (Critère d'Information d'Akaike)
BIC	:	Bayesian Information Criterion (Critère d'Information Bayésien)
DGCS-ODD	:	Direction Générale de la Coordination et du Suivi des Objectifs de Développement Durable
ECDF	:	Empirical Cumulative Distribution Function (Fonction de Répartition Cumulative Empirique)
EIES PAVICIP	:	Étude d'Impact Environnemental et Social pour le Projet d'Aménagement et de Valorisation des Infrastructures de Cotonou
GEV	:	Generalized Extreme Value (Loi Généralisée des Valeurs Extrêmes)
IDW	:	Inverse Distance Weighting (Pondération à Distance Inverse)
INE	:	Institut National de l'Eau
INSTaD	:	Institut National de la Statistique et de la Démographie
IPCC	:	Intergovernmental Panel on Climate Change (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)
IWMI	:	International Water Management Institute (Institut International de Gestion de l'Eau)
METEO-BENIN	:	Agence Nationale de la Météorologie du Bénin
MLE	:	Maximum Likelihood Estimation (Méthode du Maximum de Vraisemblance)
MNT	:	Modèles Numériques de Terrain
MOM	:	Method of Moments (Méthode des Moments)
OMM	:	Organisation Météorologique Mondiale
PWM	:	Probability Weighted Moments (Moments Pondérés par la Probabilité)
SIG	:	Systèmes d'Information Géographique
TIN	:	Triangulated Irregular Network (Réseau de Triangles Irréguliers)
UNISDR	:	United Nations International Strategy for Disaster Reduction (Stratégie internationale des Nations unies pour la réduction des catastrophes)

Liste des tableaux

Tableau 1: Tableau récapitulatif des stations utilisées	13
Tableau 2 : Résultats des tests d'hypothèses de stationnarité, d'indépendance et d'homogénéité	24
Tableau 3: Résultats des tests d'adéquations sur la loi Normale, Weibull et GEV aux données des trois stations de Cotonou	26
Tableau 4: Résultats du calcul des quantiles pour les périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 30 et 50 ans des différentes lois distribution Weibull, GEV et Normale des trois stations.	29

Liste des figures

Figure 1: Carte de localisation de Cotonou	7
Figure 2: Carte géologique de Cotonou.....	8
Figure 3 : Carte topographique de Cotonou	9
Figure 4: Carte pédologique de Cotonou.....	10
Figure 5 : Carte d'occupation des sols de Cotonou	11
Figure 6: Carte des réseaux hydrographiques de Cotonou	12
Figure 7 : Répartition spatiale des stations sur Cotonou	13
Figure 8 : Ajustement des maxima des précipitations des deux meilleures lois de distribution pour chacune des trois stations avec un intervalle de confiance de 95%.....	28
Figure 9 : Relation entre les quantiles de précipitation et les périodes de retour des (03) stations.	30
Figure 10 : Spatialisation des quantiles de pluies des périodes de retours de 2 et 5 ans entre les trois stations.....	32
Figure 11: Spatialisation des quantiles de pluies des périodes de retours de 10 et 20 ans entre les trois stations.....	33
Figure 12 : Spatialisation des quantiles de pluies des périodes de retours de 30 et 50 ans entre les trois stations.....	34
Figure 13: Zones inondables de Cotonou selon la période de retour de 2 ans	36
Figure 14: Zones inondables de Cotonou selon les périodes de retour de 5 et 10 ans	37
Figure 15: Zones inondables de Cotonou selon les périodes de retour de 20, 30 et 50 ans	38

Table des matières

Dédicace.....	i
Remerciements.....	i
Résumé	iii
Abstract	iv
Liste des sigles et acronymes	v
Liste des tableaux	vi
Liste des figures	vii
Table des matières	viii
Chapitre 1 : Introduction Générale	1
1.1. Contexte et justification de l'étude	1
1.2. Revue de littérature.....	2
1.2.1. Clarification conceptuelle	2
1.2.2. Typologie des inondations.....	4
1.2.3. Synthèse bibliographique.....	4
1.3. But de la recherche.....	6
1.4. Objectifs du mémoire	6
1.4.1. Objectif général	6
1.4.2. Objectifs spécifiques.....	6
1.5. Structure du mémoire	6
Chapitre 2 : Données, matériel et méthodes	7
2.1. Milieu d'étude.....	7
2.1.1. Localisation	7
2.1.2. Géomorphologie et géologie.....	8
2.1.3. Hydrogéologie	9
2.1.4. Sols, végétation, climat et hydrographie.....	9
2.1.4.1. Sols	9
2.1.4.2. Végétation.....	10
2.1.4.3. Climat	11
2.1.4.4. Hydrographie.....	11
2.2. Données utilisées	12

2.2.1.	Données météorologiques.....	12
2.2.2.	Données Cartographique	13
2.3.	Matériel utilisé	14
2.4.	Méthodes	14
2.4.1.	Traitement des données	14
2.4.2.	Analyse fréquentielle des hauteurs de pluies	15
2.4.2.1.	Réalisation des tests d'hypothèses.....	15
2.4.2.2.	Ajustement lois extrêmes aux séries de données.....	17
2.4.2.3.	Vérification des tests d'adéquation	19
2.4.2.4.	Contrôle des ajustements	21
2.4.2.5.	Détermination des périodes de retours et calcul des quantiles.....	21
2.4.3.	Evaluation de l'aléa d'inondation pluviale.....	22
2.4.3.1.	Méthode de spatialisation des quantiles de pluies	22
2.4.4.	Cartographie des zones inondables.....	22
Chapitre 3 : Résultats et discussion		24
3.1.	Résultats	24
3.1.1.	Analyse fréquentielle des hauteurs de pluies	24
3.1.1.1.	Tests d'hypothèse.....	24
3.1.1.2.	Tests d'adéquations et comparaison des lois.....	24
3.1.1.3.	Ajustement graphique des lois extrêmes aux données	27
3.1.1.4.	Calcul des quantiles de pluie.....	29
3.1.2.	Evaluation de l'aléa d'inondation pluviale.....	30
3.1.3.	Cartographie des zones inondables.....	35
3.2.	Discussion	39
Conclusion générale et perspectives.....		40
Références bibliographiques.....		41

Chapitre 1 : Introduction Générale

1.1.Contexte et justification de l'étude

Les précipitations intenses figurent parmi les principaux facteurs déclenchant les inondations dans les zones urbaines, un phénomène particulièrement accentué dans les villes côtières d'Afrique de l'Ouest comme Cotonou. Cette ville, capitale économique du Bénin, présente une topographie basse, la rendant extrêmement vulnérable aux épisodes de pluies soudaines et intenses (L'Hôte et al., 2002). En effet, lorsque les fortes précipitations dépassent la capacité d'absorption des sols et des infrastructures, l'excédent d'eau ruisselle rapidement vers les zones habitées, provoquant des inondations pluviales (Séguis et al., 2004). Les changements climatiques exacerbent cette situation, influençant les régimes de précipitations et augmentant la fréquence des événements météorologiques extrêmes (IPCC, 2014). Selon les projections, l'Afrique de l'Ouest pourrait connaître des précipitations plus intenses et de plus courte durée, augmentant le risque d'inondations dans des villes comme Cotonou (Sylla et al., 2016). Par ailleurs, l'urbanisation rapide et le manque d'infrastructures de drainage aggravent ces risques en réduisant la capacité des sols à absorber les précipitations (Ozer et al., 2009).

Dans ce contexte, la cartographie des zones inondables à Cotonou s'avère indispensable pour comprendre les dynamiques de ces phénomènes et mieux orienter les politiques de gestion des risques. Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont aujourd'hui des outils incontournables pour visualiser, d'analyser la répartition spatiale des inondations et l'intégration de données variées, telles que les précipitations, la topographie, et les caractéristiques des sols. Ces outils fournissent une base solide pour la prise de décision stratégique, en facilitant la prévention, la gestion de crise et l'évaluation des impacts post-catastrophe (Tanguy, 2012). Ces cartes permettent d'identifier les zones les plus vulnérables en fonction de la fréquence et de l'intensité des pluies, fournissant ainsi aux décideurs des informations précieuses pour planifier des actions de prévention. En intégrant une analyse fréquentielle des hauteurs de pluie, cette étude propose une approche innovante pour appréhender les dynamiques spatio-temporelles des inondations à Cotonou pour fournir des outils adaptés pour la gestion locale des risques. Les cartes produites contribueront également à sensibiliser la population aux risques, tout en aidant à prioriser les améliorations des infrastructures de drainage pour renforcer la résilience de la ville face aux aléas climatiques (Sylla et al., 2016).

Ainsi, compte tenu de l'ensemble des éléments présentés, notre choix de sujet de fin de formation s'est porté sur la « Cartographie des zones inondables dues aux précipitations dans la ville de Cotonou ».

Ce mémoire vise donc à identifier et à cartographier les zones de la ville de Cotonou qui sont les plus exposées aux inondations causées par les précipitations, à travers une analyse fréquentielle des données de pluie. Les questions de recherche que nous nous sommes posés sont :

- Quelles sont les fréquences des hauteurs de pluie à Cotonou ?
- Quels sont les niveaux d'aléa d'inondation pluviale à Cotonou en fonction des précipitations enregistrées ?

- Quelles sont les zones potentiellement inondables à Cotonou en fonction de la topographie et des données de précipitation ?

1.2. Revue de littérature

1.2.1. Clarification conceptuelle

Cette revue de littérature a pour but d'explorer les méthodes existantes dans la recherche sur les inondations, en mettant l'accent sur les approches de traitement des données, de spatialisation des pluies et sur les outils d'analyse géospatiale utilisés dans des études similaires.

- **Inondation**

Une inondation est le résultat d'une accumulation d'eau qui submerge temporairement des terres habituellement sèches. Elle peut être causée par des précipitations intenses, la fonte des neiges, la rupture de barrages ou digues, ou encore la montée des eaux fluviales et maritimes (Meylan et Musy., 1999). Les inondations peuvent se produire dans différents contextes, allant des zones rurales aux milieux urbains. Une inondation peut être aggravée par l'urbanisation rapide, qui augmente le ruissellement de surface et réduit la capacité des sols à absorber l'eau, notamment en milieu urbain (Smith & Ward, 1998). Les surfaces imperméabilisées comme les routes et les constructions empêchent l'infiltration des eaux de pluie, entraînant une accumulation rapide des eaux en surface.

Les inondations urbaines surviennent souvent dans les zones où les infrastructures de drainage sont insuffisantes pour gérer les volumes d'eau générés par les précipitations (Bedient & Huber, 2008). Elles peuvent être extrêmement soudaines et destructrices, même pour des pluies de faible intensité. Le terme "*inondation urbaine*" est particulièrement pertinent pour cette étude, car il désigne les inondations qui se produisent dans les zones fortement urbanisées. Dans ces milieux, les infrastructures comme les routes, les bâtiments et les canalisations modifient les flux naturels de l'eau, entraînant souvent une augmentation des volumes de ruissellement (Smith & Ward, 1998). À Cotonou, l'urbanisation rapide et le manque de systèmes de drainage adéquats font des inondations urbaines un problème majeur, exacerbant les impacts des fortes pluies sur les zones habitées. Les inondations urbaines sont souvent caractérisées par leur soudaineté et leur potentiel destructeur, même pour des précipitations de courte durée.

- **Aléa d'inondation pluviale**

Un aléa est un évènement d'origine naturelle ou humaine, potentiellement dangereux (Aschan-Leygonie et Baudet-Michel, 2009) susceptible de se produire en un lieu et une période donnés, représentant ainsi une menace potentielle pour les populations et les écosystèmes. L'étude se focalise sur l'aléa d'inondation pluviale, soit la probabilité d'inondation en fonction des précipitations, afin de quantifier le risque d'inondation à Cotonou. Ce concept permet de déterminer les zones les plus exposées, facilitant ainsi la préparation de mesures préventives. La gravité de cet aléa dépend de la fréquence et de l'intensité des précipitations, et il est souvent modélisé pour anticiper les événements et évaluer le risque (Pelling, 2003).

- **Vulnérabilité**

La vulnérabilité est la propension d'un système, d'une population ou d'un environnement à être affecté négativement par un événement extrême. Elle combine à la fois la sensibilité d'une zone aux impacts et sa capacité à y faire face et à s'adapter (Adger, 2006). En hydrologie, la vulnérabilité dépend de facteurs tels que la densité de population, la qualité des infrastructures et la capacité d'absorption des sols.

La compréhension de la vulnérabilité est cruciale pour la gestion des risques d'inondation. À Cotonou, les quartiers les plus densément peuplés, situés en bordure du lac Nokoué ou dans les zones basses, présentent une vulnérabilité accrue aux inondations pluviales. Analyser cette vulnérabilité permet de mieux cibler les mesures de renforcement des infrastructures et d'adaptation pour réduire les impacts sur les populations les plus exposées (UNISDR, 2009). Elle dépend non seulement de l'exposition à l'aléa, mais aussi de la capacité des populations et des systèmes à s'adapter et à résister aux impacts des inondations (Adger, 2006). La vulnérabilité est plus élevée dans les zones où les populations ont un accès limité aux ressources économiques et aux infrastructures de protection (UNISDR, 2009).

Le concept de vulnérabilité est donc intrinsèquement lié à la résilience, c'est-à-dire la capacité d'une communauté à se remettre rapidement d'un événement perturbateur comme une inondation (Folke, 2006). Cotonou, par exemple, fait face à des défis de résilience en raison de l'urbanisation rapide et de la pauvreté relative de certaines populations riveraines.

- **Cartographie des Zones Inondables**

La cartographie est la représentation graphique de données géographiques sur un support visuel tel qu'une carte. Elle permet de spatialiser des informations variées et d'analyser les relations entre différents paramètres géographiques (Goodchild, 1993).

Une zone inondable est une portion de territoire sujette à la submersion temporaire par des eaux de surface en raison de crues, de précipitations intenses ou de la montée des eaux marines (Ouarda & Adlouni, 2008). Ces zones sont caractérisées par des probabilités variables d'inondation, selon la topographie, la proximité des plans d'eau et la capacité des sols à absorber ou drainer l'eau. Elles sont définies par la fréquence des crues ou des pluies qui les submergent. La fréquence des crues est souvent exprimée en termes de période de retour, comme une zone inondable à « crue décennale » (crue ayant une probabilité de 10 % de survenir chaque année) (Journal of Flood Risk Management, 2009).

Elles sont souvent cartographiées pour estimer leur étendue et pour identifier les parties les plus vulnérables d'un territoire. Cela permet aux urbanistes et aux autorités locales de mieux gérer l'aménagement du territoire et de planifier des mesures d'adaptation aux risques climatiques (Meylan et Musy., 1999). Par exemple, une zone inondable à Cotonou pourrait inclure les quartiers situés en bordure du lac Nokoué ou à proximité de canaux mal entretenus. La cartographie des zones inondables identifie les secteurs les plus vulnérables de Cotonou, facilitant la planification des infrastructures et la gestion des risques. Cette méthode soutient la prise de décision pour la mise en place de mesures de protection telles que la construction de digues et l'amélioration des systèmes de drainage. Elle permet également de mieux anticiper les impacts des fortes précipitations, aidant ainsi à élaborer des stratégies de prévention adaptées (Maidment, 2002).

Les technologies SIG (comme QGIS) ont transformé la manière dont les zones inondables sont cartographiées. Les SIG permettent de superposer les données topographiques, les cartes de précipitations et les infrastructures urbaines pour évaluer les risques avec une grande précision (Goodchild, 1993). Un des avantages des SIG est la possibilité de créer des modèles numériques de terrain (MNT), qui représentent la topographie et permettent de simuler la propagation de l'eau pendant une crue (Jensen et al., 2001). La précision des données pour la modélisation des inondations est cruciale, car plus les données sont fines, plus la cartographie des risques est précise, ce qui permet de prendre des mesures adaptées pour chaque zone spécifique (Maidment, 2002).

1.2.2. Typologie des inondations

Cotonou, ville côtière du Bénin, est particulièrement vulnérable à divers types d'inondations en raison de sa situation géographique, de son urbanisation et des effets du changement climatique.

Les inondations pluviales, causées par de fortes pluies, sont le type d'inondation le plus fréquent à Cotonou. Les systèmes de drainage de la ville sont souvent submergés par des précipitations intenses, en particulier dans les zones urbaines de faible altitude. Une mauvaise planification urbaine, combinée à une croissance démographique rapide, a exacerbé la fréquence et l'intensité de ces inondations (Chokpon et al., 2021). Ce problème est particulièrement important dans les quartiers adjacents au lac Nokoué.

Les inondations côtières à Cotonou sont provoquées par les ondes de tempête, l'élévation du niveau de la mer et l'affaissement des terres. Les zones côtières de la ville sont vulnérables aux inondations lors des marées hautes ou des tempêtes, qui deviennent plus fréquentes en raison du changement climatique (Chokpon et al., 2021). L'érosion côtière augmente encore le risque d'inondation dans les zones proches de la côte atlantique et du lac Nokoué.

Les crues soudaines sont une forme rapide d'inondation pluviale qui se produit à la suite de pluies intenses, où le niveau de l'eau monte rapidement en quelques heures. Ces inondations peuvent être très destructrices, en particulier dans les zones densément peuplées ou mal drainées. L'infrastructure de drainage insuffisante de la ville est souvent submergée lors de ces événements, ce qui entraîne des crues soudaines localisées (Chokpon et al., 2021).

Les inondations des eaux souterraines, causées par la montée de la nappe phréatique, sont moins fréquentes mais toujours importantes dans les zones entourant le lac Nokoué. Ce type d'inondation à évolution lente entraîne une stagnation prolongée de l'eau, qui peut endommager les bâtiments et perturber les infrastructures locales (Chokpon et al., 2021).

1.2.3. Synthèse bibliographique

Les inondations à Cotonou, notamment lors de pluies intenses, résultent d'une combinaison de facteurs naturels et anthropiques. De nombreux travaux ont permis de mieux comprendre les causes de ces inondations et d'évaluer les stratégies pour y remédier, bien que des lacunes subsistent dans l'approche méthodologique. Les facteurs géomorphologiques, hydrologiques, topographiques, météorologiques et anthropiques jouent un rôle central (Hountondji et al.,

2019). Par exemple, l'urbanisation rapide et le manque d'infrastructures de drainage adéquates créent des obstructions dans les réseaux hydrauliques, aggravées par une gestion inadéquate des déchets solides (Hountondji et al., 2019). Ces constats mettent en évidence la nécessité de renforcer les capacités de gestion des eaux urbaines. En analysant plus spécifiquement les zones vulnérables, les quartiers situés près du lac Nokoué et du chenai, tels que Vossa-Podji, ont été identifiés comme les plus exposés. Leur topographie basse ($\leq 0,6$ m) et l'occupation anarchique des terres humides augmentent considérablement leur susceptibilité aux inondations (Assogba, 2010). Ces résultats sont cohérents avec les observations locales dans cette étude, où les zones proches des plans d'eau apparaissent comme des foyers de risque majeurs.

L'érosion côtière joue également un rôle indirect mais significatif. Exacerbée par l'élévation du niveau de la mer et la réduction des sédiments fluviaux, elle fragilise les littoraux, augmentant la vulnérabilité aux submersions et aux fortes pluies (WACA, 2020 ; Banque mondiale, 2020). Cependant, ces études se concentrent principalement sur l'impact des activités humaines sans exploiter pleinement des outils modernes comme les SIG pour une modélisation plus dynamique. L'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) a permis d'améliorer la cartographie des risques. Par exemple, 65 % de la superficie de Cotonou ont été identifiés comme exposés à un risque élevé d'inondation (Houessinon et al., 2022). Ces travaux soutiennent l'approche utilisée dans cette étude, où les SIG ont été mobilisés pour spatialiser les zones vulnérables. Toutefois, ces analyses manquent souvent d'une dimension temporelle, comme l'intégration d'analyses fréquentielles pour estimer les périodes de retour des événements extrêmes.

À l'échelle internationale, l'analyse fréquentielle des précipitations et des modèles tels que les lois de Gumbel ou de Weibull est largement utilisée pour évaluer les crues maximales annuelles (Meylan et Musy., 1999). Ces approches, bien qu'efficaces pour modéliser les précipitations extrêmes, présentent des limites en contexte de données rares, comme à Cotonou. Des méthodologies récentes, telles que l'utilisation des moments L ou des modèles bayésiens, ont montré leur pertinence pour gérer l'incertitude et produire des estimations robustes, notamment en ajustant les distributions des valeurs extrêmes (Hailegeorgis et al., 2008). Leur application pourrait offrir des perspectives intéressantes pour la région, bien que leur mise en œuvre soit limitée par la faible qualité des données locales.

Enfin, des lacunes méthodologiques subsistent, notamment l'absence de scénarios climatiques intégrés et le manque de données longues et continues, ce qui limite la précision des estimations et des projections. Ces faiblesses soulignent l'importance de renforcer les infrastructures de collecte de données et d'adopter des approches plus dynamiques, comme l'utilisation conjointe des SIG et des modèles hydrologiques, pour une gestion plus adaptée des inondations à Cotonou.

Bien que cette étude ait permis de cartographier les zones à risque à l'aide des SIG et des modèles de distribution des précipitations extrêmes (comme les lois de Weibull et GEV), des recherches complémentaires sont nécessaires pour affiner la modélisation des périodes de retour des événements extrêmes. L'intégration de données climatiques supplémentaires et d'analyses statistiques améliorées pourrait accroître la précision des projections, tandis que l'utilisation de modèles hydrologiques plus détaillés, prenant en compte l'occupation du sol et la gestion des eaux, permettrait d'améliorer les prévisions et la gestion à long terme des risques d'inondation à Cotonou.

1.3. But de la recherche

Le but de cette recherche est d'élaborer une cartographie des zones inondables à Cotonou, basée sur l'analyse des données de précipitations et l'utilisation des SIG.

1.4. Objectifs du mémoire

1.4.1. Objectif général

L'objectif général de cette étude est de cartographier l'inondation pluviale dans la ville de Cotonou, afin de contribuer à la connaissance nécessaire à une meilleure gestion des inondations dans cette ville.

1.4.2. Objectifs spécifiques

Pour atteindre l'objectif général les objectifs spécifiques suivants ont été définis :

- Analyser les fréquences des hauteurs de pluie dans la ville de Cotonou
- Évaluer l'aléa d'inondation pluviale à Cotonou
- Élaborer des cartes des zones inondables dues aux précipitations dans la ville de Cotonou.

1.5. Structure du mémoire

Le présent mémoire commence par une introduction générale qui présente le contexte, la justification de l'étude, la problématique, les questions de recherche et les objectifs. Il s'articule ensuite autour de deux chapitres principaux : le premier chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude, des données et de la méthodologie utilisée. Le second chapitre expose les résultats obtenus et propose une discussion autour de ces derniers. Le mémoire se termine par une conclusion qui résume les principaux points de l'étude et propose des perspectives pour la gestion des inondations à Cotonou.

Chapitre 2 : Données, matériel et méthodes

Le chapitre 1 présente la zone d'étude, les données et les matériels utilisés, ainsi que la méthodologie adoptée. Une connaissance approfondie de Cotonou est essentielle pour comprendre l'impact de ses caractéristiques naturelles et urbaines sur les phénomènes d'inondation.

2.1. Milieu d'étude

2.1.1. Localisation

Cotonou, capitale économique du Bénin, est située dans le sud du pays entre les coordonnées de 6°20' et 6°23' de latitude nord, et de 2°22' à 2°30' de longitude est. S'étendant sur une superficie de 79 km² (Saizonou et al., 2010), la ville est traversée par le canal de Cotonou, qui fait le lien entre le lac Nokoué et l'océan Atlantique (Saizonou et al., 2010). Avec une population dense d'environ un million d'habitants, Cotonou affiche une urbanisation marquée, se traduisant par une densité de plus de 8 000 habitants par kilomètre carré. La ville est située à l'extrémité sud du Bénin, bordée à l'ouest par la commune d'Abomey-Calavi, sur une distance de 10 km, et à l'est par la commune de Sèmè-Kpodji sur 6 km. Au nord et au sud, ses limites naturelles sont respectivement le lac Nokoué et l'océan Atlantique (DGCS-ODD, 2019). En raison de sa position côtière, Cotonou est particulièrement vulnérable aux effets des marées et aux submersions marines, ce qui accentue son exposition aux risques climatiques.

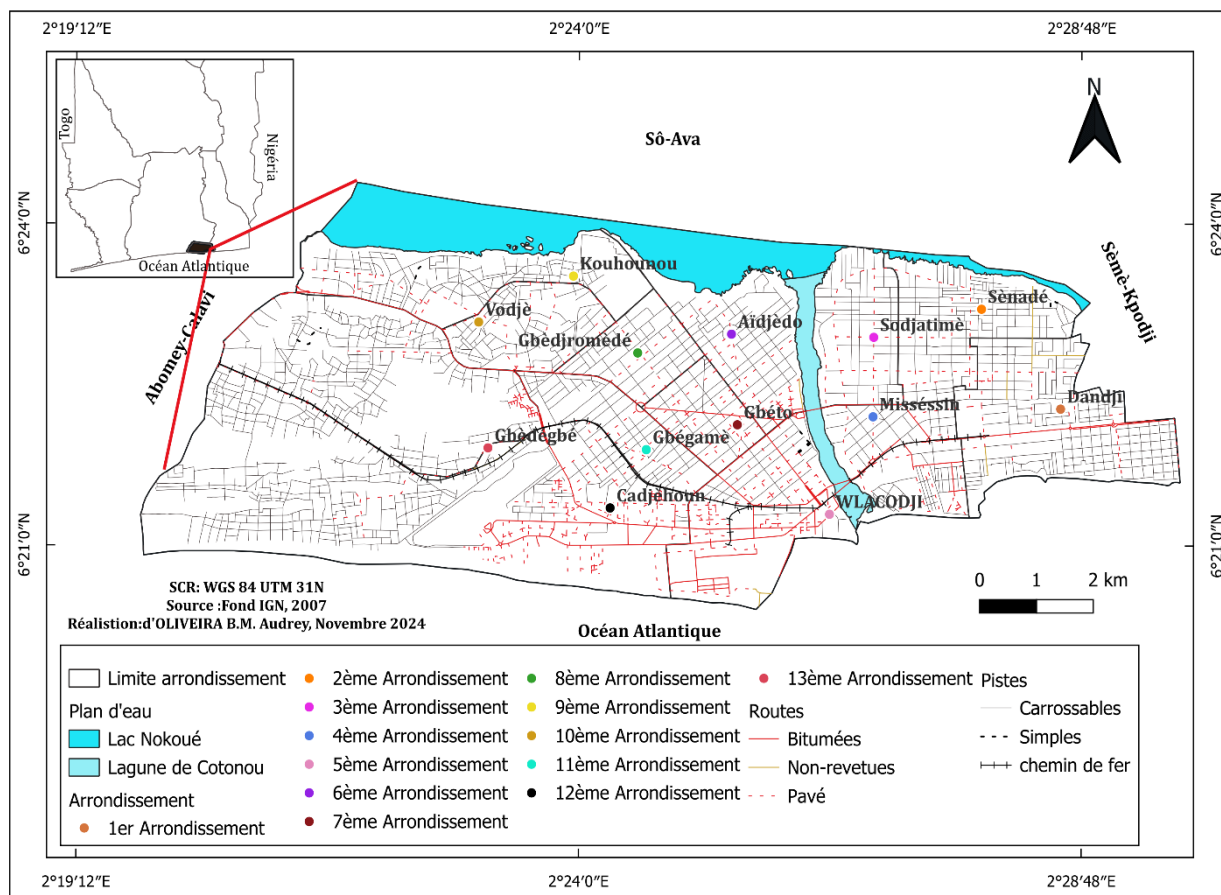


Figure 1: Carte de localisation de Cotonou

2.1.2. Géomorphologie et géologie

Le paysage géologique du Bénin se divise en quatre grandes unités : la plaine côtière, les plateaux de grès, la pénéplaine cristalline et la chaîne de l'Atacora. Cotonou se situe dans la plaine côtière, une étroite bande de terre de 125 km de long et environ 4 km de large, avec une altitude maximale de 10 mètres. Cette région fait partie du bassin sédimentaire du "Bas Bénin", un ensemble géologique qui s'étend du Nigeria au Ghana, et se distingue par ses terrains sablonneux et marécageux, ainsi que par de nombreux plans d'eau, notamment le lac Nokoué au nord de la ville. La plaine sablonneuse de Cotonou, située entre 0 et 4 mètres d'altitude, est particulièrement vulnérable aux phénomènes d'érosion côtière. La morphologie locale est marquée par des dunes côtières et des bas-fonds marécageux, ce qui rend le littoral sensible aux inondations et à la submersion marine (Meylan et al., 2008). L'érosion entraîne un recul annuel moyen du littoral de 12m/an (Zoumenou et al., 2020), activé par les courants marins et l'action des vagues.

Le sous-sol de Cotonou repose principalement sur des formations sédimentaires quaternaires composées de sables fins et grossiers et de dépôts argileux, influencés par la proximité de la mer (Boko, 1988). Ces formations géologiques, constituées de sables marins et d'alluvions, résultent des variations du niveau marin aux époques quaternaire et tertiaire. L'urbanisation rapide, en modifiant la géomorphologie locale, accentue la vulnérabilité de la ville aux aléas climatiques et géologiques (Adam & Boko, 1993).

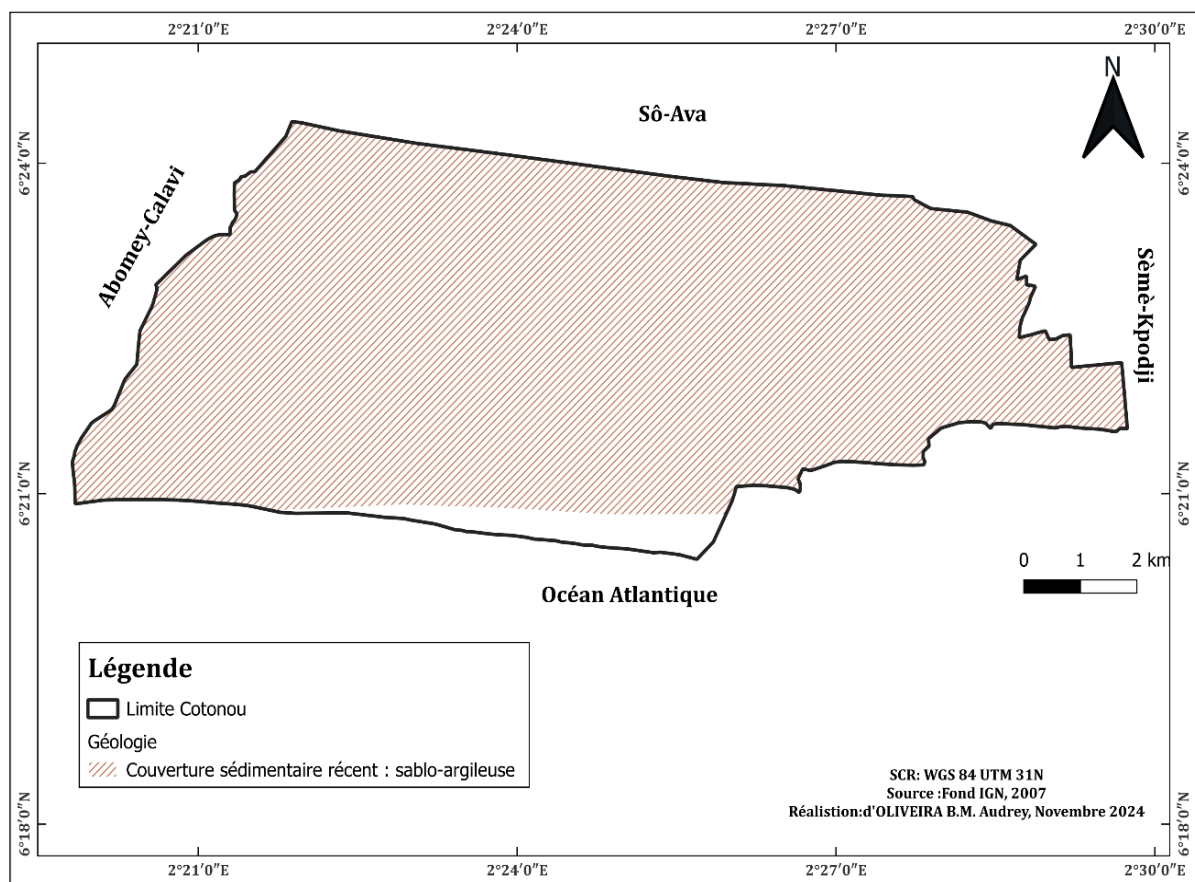


Figure 2: Carte géologique de Cotonou

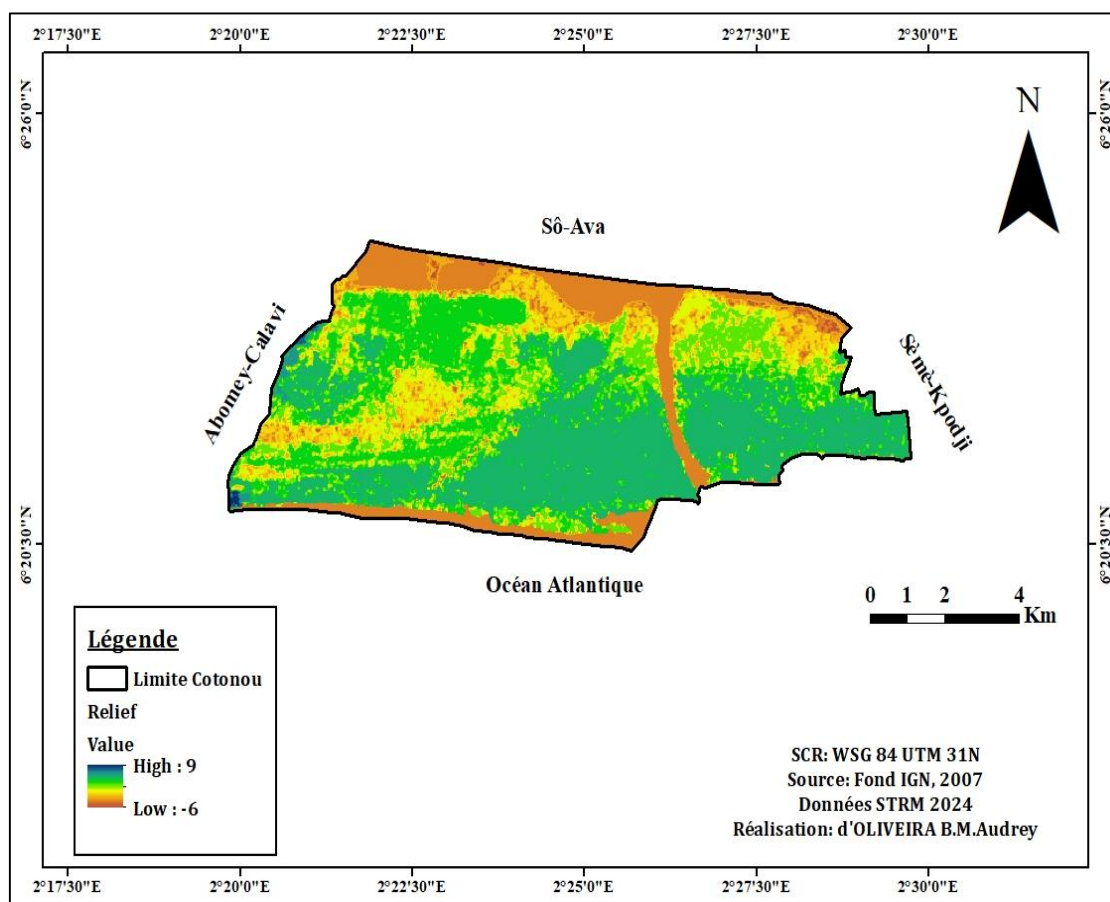


Figure 3 : Carte topographique de Cotonou

2.1.3. Hydrogéologie

Le principal aquifère de Cotonou est un aquifère côtier du Quaternaire, caractérisé par sa superficialité et sa vulnérabilité aux contaminations d'origine humaine (Houemenou, 2020). L'extraction des eaux souterraines se fait principalement par des puits de grand diamètre. Sa géomorphologie, marquée par des dépressions marécageuses et des lagunes proches du lac Nokoué, favorise la stagnation des eaux pluviales et leur infiltration, jouant ainsi un rôle clé dans la recharge des aquifères et la régulation hydrologique de la région (Meylan et al., 2008).

2.1.4. Sols, végétation, climat et hydrographie

2.1.4.1. Sols

Située sur une plaine côtière, Cotonou présente des sols sableux et marécageux dominés par des sédiments argilo-sableux, issus de dépôts marins et fluviaux. Ces sols, souvent riches en matière organique, sont sujets à l'érosion et à la salinisation en raison de leur proximité avec l'océan Atlantique et le lac Nokoué (Gnéle, 2000). L'urbanisation et l'imperméabilisation des surfaces renforcent cette vulnérabilité et compliquent la gestion des ressources en eau.

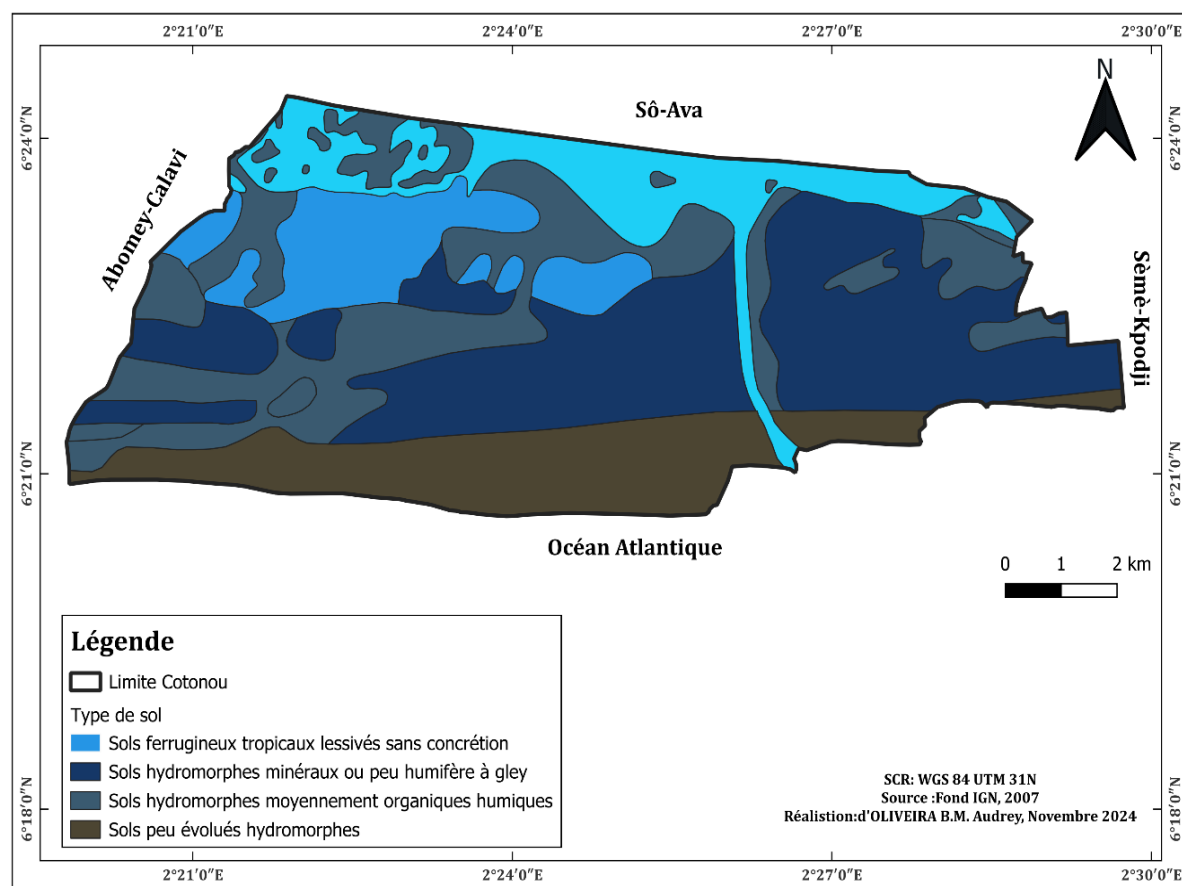


Figure 4: Carte pédologique de Cotonou

2.1.4.2. Végétation

Autrefois partie de la ceinture forestière guinéo-congolaise, Cotonou a perdu la majorité de sa couverture végétale naturelle sous l'effet de l'urbanisation rapide. Les mangroves bordant la lagune et les marais constituent l'un des derniers écosystèmes naturels, stabilisant les sols et protégeant contre l'érosion. Cependant, elles sont menacées par les projets d'aménagement et la pollution, accentuant les risques d'inondation dans les zones périphériques (Gnéle, 2000). Dans les secteurs urbanisés, la végétation est principalement constituée d'espèces ornementales et exotiques comme le *Khaya senegalensis*, le *Terminalia catappa*, le *Mangifera indica*, les palmiers royaux et les bougainvilliers, plantés le long des avenues et dans les espaces verts pour leur résistance aux conditions urbaines (Kanda et al., 2023), insuffisantes pour contrer les impacts de l'urbanisation rapide. En périphérie, des fragments de savane et des terres cultivées subsistent, mais ces espaces naturels sont également menacés par la pression démographique et le développement urbain (Djiogbénu et al., 2015).

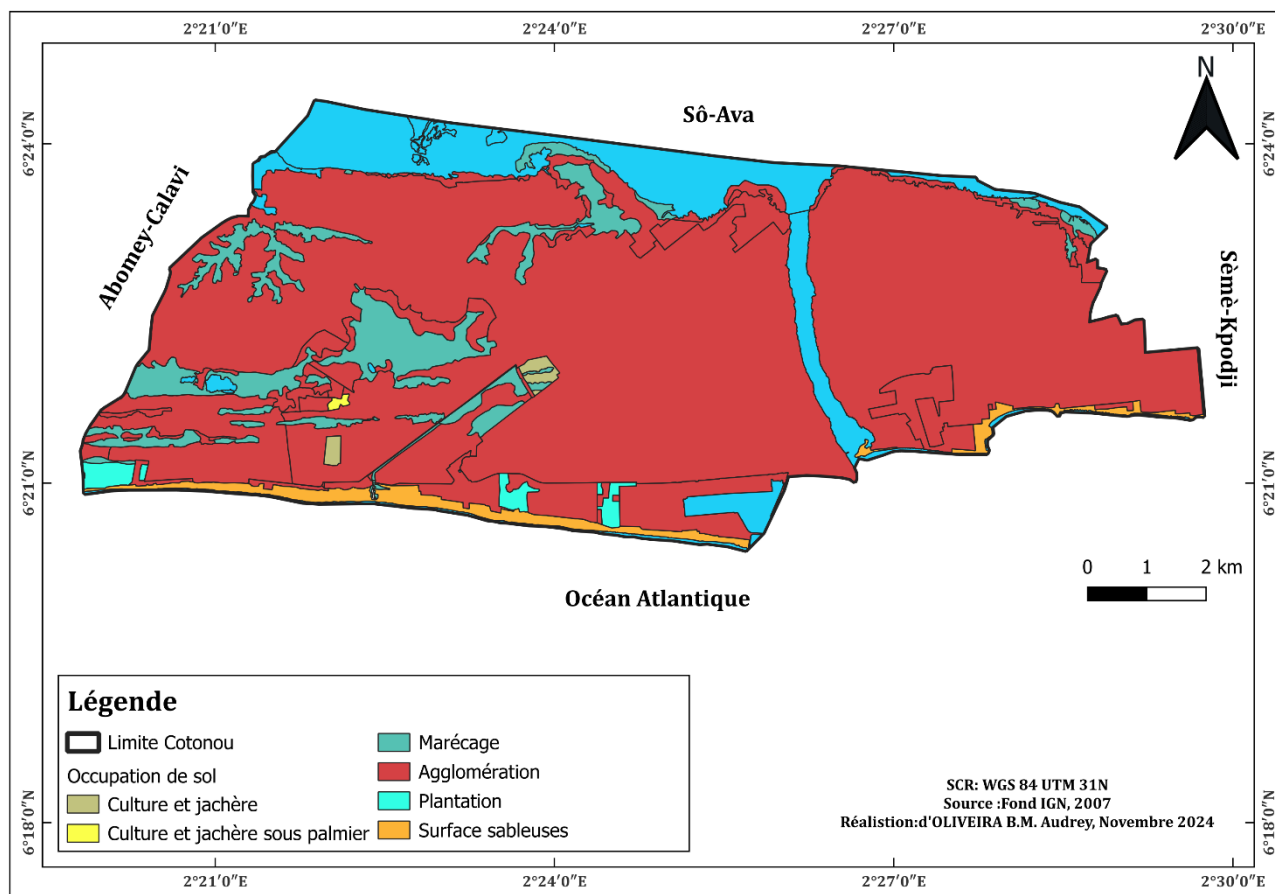


Figure 5 : Carte d'occupation des sols de Cotonou

2.1.4.3. Climat

Cotonou bénéficie d'un **climat subéquatorial chaud et humide** avec des températures annuelles moyennes autour de **27°C**, variant entre **25°C** et **31°C**. L'ensoleillement est important, avec près de **2000 heures de soleil par an**, et atteint son pic entre novembre et mars (Ozer et al., 2003). La ville reçoit en moyenne 1200 mm de précipitations par an, réparties en deux saisons des pluies et deux saisons sèches. La grande saison des pluies s'étend de mi-mars à juillet et la petite saison des pluies d'octobre à novembre (Akponikpè & Aïzén, 2005). Les vents dominants provenant du sud-ouest, avec des vitesses moyennes de **15 à 25 km/h**, apportent une humidité constante, et le taux d'humidité reste élevé toute l'année, oscillant entre **70% et 95%** (Adam & Boko, 1993). Les changements climatiques augmentent l'intensité des précipitations et des vents, aggravant la vulnérabilité de la ville aux inondations et à l'érosion côtière (Ozer et al., 2003).

2.1.4.4. Hydrographie

Cotonou possède un réseau hydrographique dense, bordé au sud par l'océan Atlantique et au nord par le lac Nokoué, une vaste lagune d'eau saumâtre de 180 km², qui régule les eaux pluviales mais peut déborder en saison des pluies (Houemenou, 2020). Le lac communique avec

l'océan par le Chenal de Cotonou, augmentant les risques d'inondation lors des fortes pluies. Le réseau est complété par des lagunes intérieures comme la Lagune de Cotonou et la Lagune de Dantokpa, des canaux et des rivières tels que le Canal de Cotonou, le Canal Avlékété et la Rivière Couffo, qui assurent le drainage des eaux pluviales et usées (IWMI Reports, 2020).

Ces zones humides et dépressions naturelles, situées autour de la lagune de Cotonou, jouent un rôle crucial en absorbant l'excès d'eau pendant les crues, mais leur destruction par l'urbanisation non régulée a réduit leur efficacité de régulation (Meylan et al., 2008). L'accumulation de déchets dans les canaux obstrués accroît également les risques d'inondation lors des précipitations intenses.

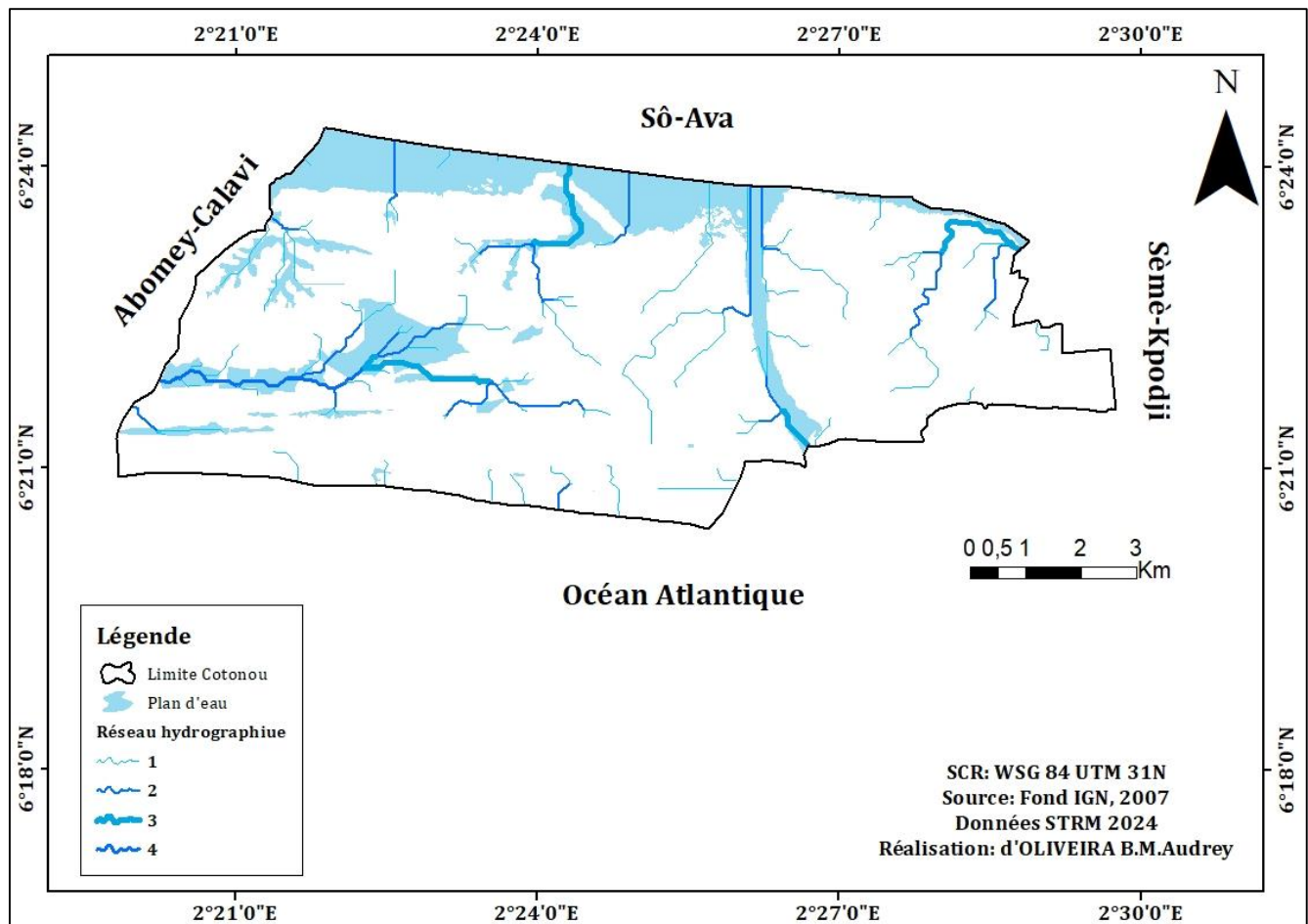


Figure 6: Carte des réseaux hydrographiques de Cotonou

2.2. Données utilisées

2.2.1. Données météorologiques

Les données de précipitations utilisées pour cette étude ont été obtenues, à partir de trois stations météorologiques situées à Cotonou, de l'Agence Nationale de la Météorologie du Bénin (METEO-BENIN): la station synoptique Cotonou Aéroport, et les stations pluviométriques Cotonou Ville et Cotonou Port.

Tableau 1: Tableau récapitulatif des stations utilisées

Station	Type	Longitude	Latitude	Période
Cotonou Aéroport	Synoptique	2°3833 E	6°35 N	1993-2023
Cotonou Ville	Pluviométrique	2°43333 E	6°35 N	
Cotonou Port	Pluviométrique	2°430317 E	6°350381 N	

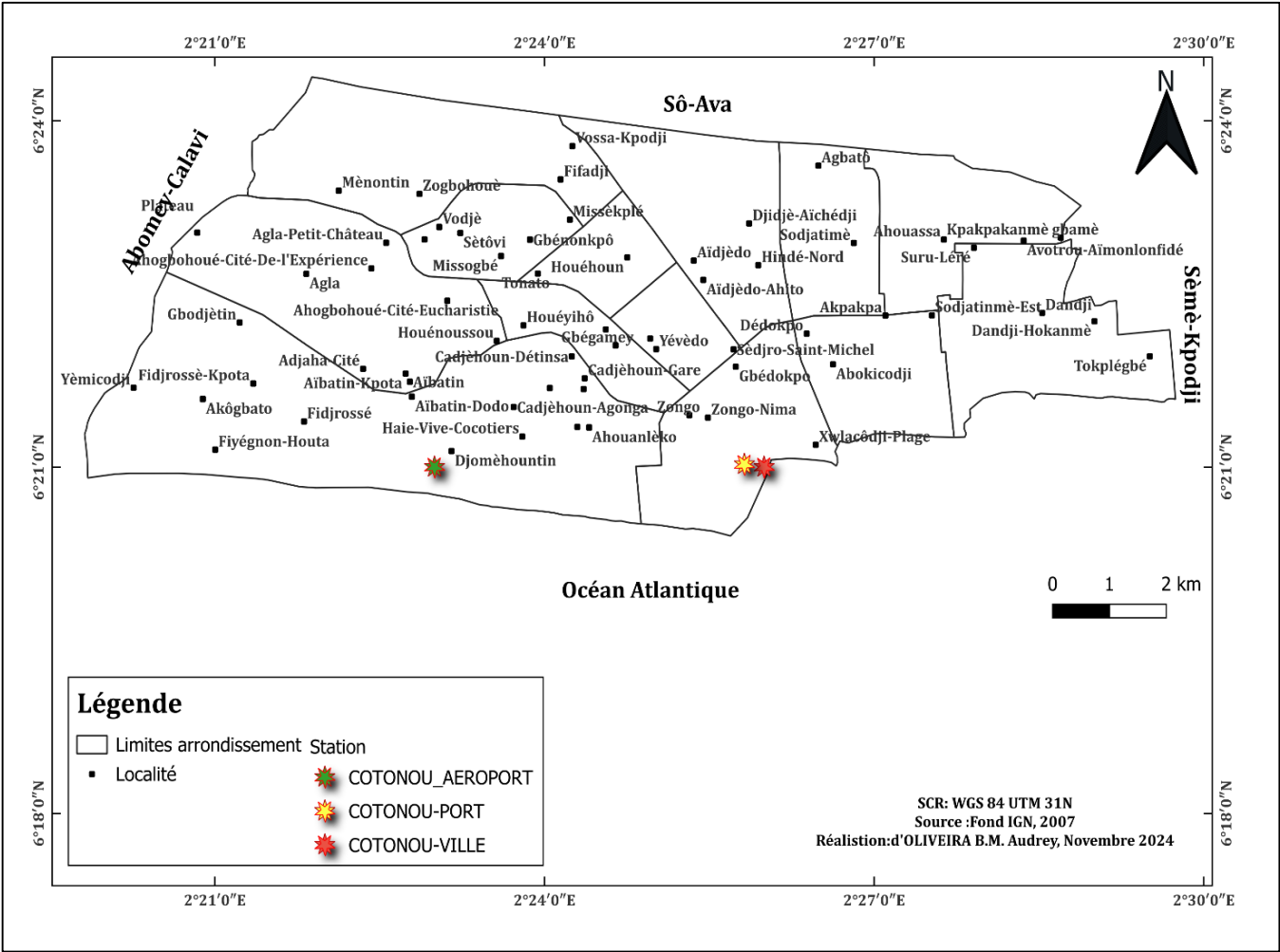


Figure 7 : Répartition spatiale des stations sur Cotonou

2.2.2. Données Cartographique

Les données cartographiques utilisées pour l'étude incluent à la fois des couches vectorielles et des rasters, chacun apportant des informations cruciales pour la spatialisation et l'analyse des zones inondables. Toutes les données **au format shapefile (SHP)** ont été issues du fond topographique fourni par l'Institut Géographique National (IGN). **Un modèle numérique de terrain (MNT)** a été utilisé pour représenter l'élévation de la zone d'étude. Ce raster, obtenu

via [OpenTopography](#), fournit des informations détaillées sur la topographie, avec une résolution suffisante pour analyser les variations de relief dans les zones d'accumulation potentielles des eaux de pluie.

2.3. Matériel utilisé

Pour la réalisation de cette étude et afin d'assurer un traitement efficace et précis des données, un ordinateur a été utilisé avec les logiciels suivant :

- **Microsoft Word 2013** : pour la rédaction de ce mémoire.
- **Microsoft Excel 2013** : pour le traitement initial des données de précipitations.
- **RStudio** : pour les ajustements statistiques et l'analyse fréquentielle.
- **Arcgis et Qgis** : pour l'analyse et le traitement des données géospatiale.

2.4. Méthodes

2.4.1. Traitement des données

❖ Données météorologiques

Un soin particulier a été apporté à la qualité des données pour garantir la précision de l'analyse. Les données de la station synoptique de Cotonou Aéroport étaient complètes, ce qui a permis une organisation des séries temporelles et l'extraction des maxima journaliers annuels, assurant ainsi l'intégrité des données. En revanche, les stations de Cotonou Ville et du Port de Cotonou présentaient des lacunes. Pour le pré-traitement, plusieurs analyses ont été faites parmi lesquelles on peut lister :

- **Calcul du pourcentage de lacunes** : Les données manquantes ont été signalées par la valeur NA, facilitant ainsi l'identification des positions exactes des données manquantes dans les ensembles de données. Le traitement des données hydrologiques nécessite une gestion précise des valeurs manquantes pour garantir la fiabilité des analyses. Dans ce contexte, l'exclusion des années présentant plus de 25% de lacunes a été retenue comme critère. Maidment (2002) explique que la gestion des données manquantes par l'imputation est recommandée lorsque les lacunes représentent moins de 30% de la série, au-delà de quoi les résultats des analyses peuvent être significativement biaisés. Ainsi, en choisissant un seuil de 25%, on maintient un compromis entre la qualité des données et la robustesse des résultats.
- **Gestion des données par saison** : Les lacunes en dehors de la saison des pluies (avril à octobre) ont été ignorées puisqu'elles n'affectent pas l'analyse. En revanche, les années avec des lacunes pendant les périodes pluvieuses (juin à octobre) ont été exclues pour éviter des biais dans l'analyse fréquentielle.

Après ces ajustements, les maxima journaliers de pluie ont été extraits pour chaque année et chaque station, constituant une base solide pour l'analyse fréquentielle.

❖ Données cartographiques

La correction du Modèle Numérique de Terrain (MNT), obtenu via OpenTopography, est essentielle pour une cartographie précise. Cette correction vise à éliminer les anomalies topographiques susceptibles de fausser les analyses hydrologiques :

- **Identification et suppression des dômes** : Les dômes, ou pics d'altitude anormalement élevés, ont été détectés par une visualisation hillshade. Ces anomalies ont été corrigées par une interpolation locale, utilisant un filtre de médiane (3x3 cellules) dans le calculateur raster d'ArcGIS pour lisser le relief.

Ces étapes, inspirées des pratiques recommandées dans le document « Préparer un MNT corrigé pour l'hydrologie », permettent un MNT fidèle à la topographie naturelle, garantissant une représentation fiable des flux d'eau et des zones d'accumulation pour une modélisation hydrologique rigoureuse.

2.4.2. Analyse fréquentielle des hauteurs de pluies

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique visant à prédire les probabilités futures d'événements hydrologiques, tels que les précipitations intenses, en étudiant les occurrences passées (Meylan et Musy., 1999). Cette approche, réalisée ici à l'aide du logiciel R, modélise les données historiques pour estimer la probabilité d'événements similaires à l'avenir, permettant de quantifier la récurrence des pluies extrêmes à Cotonou et d'anticiper les risques d'inondation.

Les étapes de l'analyse fréquentielle suivies dans cette étude sont :

- ✓ **Réalisation des tests d'hypothèses**
- ✓ **Ajustement des lois extrêmes aux données**
- ✓ **Vérification des tests d'adéquations**
- ✓ **Contrôle des ajustements**
- ✓ **Détermination des périodes de retour et calcul des quantiles**

Le but de l'analyse fréquentielle des hauteurs de pluie à Cotonou, est d'évaluer la récurrence des événements pluvieux extrêmes afin de mieux comprendre et anticiper les risques d'inondation. En identifiant les précipitations maximales annuelles et en estimant les périodes de retour des pluies intenses, cette analyse permet de quantifier la probabilité que certaines hauteurs de pluie soient atteintes ou dépassées.

2.4.2.1. Réalisation des tests d'hypothèses

Les précipitations maximales journalières ont été analysées à l'aide des tests d'indépendance de Wald-Wolfowitz, d'homogénéité de Wilcoxon, et de stationnarité de Mann-Kendall pour évaluer la structure temporelle des données. Chaque test inclut une hypothèse nulle H_0 , que l'on cherche à rejeter, et une hypothèse alternative H_1 , que l'on cherche à prouver. Les résultats de ces tests sont évalués par une statistique de test et une p-value, comparée au niveau de signification de $\alpha = 0,05$ ici.

❖ Test d'homogénéité de Wilcoxon

Le test de Wilcoxon vérifie l'homogénéité entre deux périodes sans hypothèse de distribution (Wilcoxon, 1945), en comparant les rangs des valeurs dans les deux groupes. La statistique W , calculée comme

$$W = \min(W1, W2) \quad (1)$$

où $W1$ et $W2$ sont les sommes des rangs des deux groupes, permet de déterminer si les distributions sont identiques (H_0) ou différentes (H_1).

❖ Test d'Indépendance de Wald-Wolfowitz

Le test de Wald-Wolfowitz, non paramétrique, examine l'indépendance des observations dans une série (Wald et Wolfowitz, 1940). Les données de précipitation sont codées en séquence binaire : les valeurs supérieures à la médiane sont codées 1, et les valeurs inférieures ou égales, 0. La statistique Z est ensuite calculée comme suit :

1. **Nombre de séries (R)** : Le nombre total de séries consécutives de valeurs identiques (1 ou 0) est noté RRR.
2. **Calcul de Z** : La statistique de test

$$Z = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \quad (2)$$

est comparée à la valeur critique de la distribution normale standard pour un test bilatéral avec $\alpha=0,05$. Si la valeur absolue de Z est supérieure à la valeur critique, H_0 (indépendance des observations) est rejetée, indiquant une dépendance dans les données.

❖ Test de Mann-Kendall pour la Stationnarité

Le test de Mann-Kendall détecte une tendance dans une série temporelle sans hypothèse de distribution (Mann, 1945 ; Kendall, 1975). Il utilise la statistique S , qui est la somme des signes des différences entre les paires de valeurs de la série. La formule de S est la suivante :

$$S = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (3)$$

Où $\text{sign}(x_j - x_i)$ donne +1 si $x_j > x_i$, -1 si $x_j < x_i$ et 0 sinon.

La p-value associée à S permet de déterminer si une tendance significative est présente. H_0 représente l'absence de tendance, tandis que H_1 indique une tendance dans les données.

2.4.2.2. Ajustement lois extrêmes aux séries de données

L'ajustement d'une loi de probabilité à des données consiste à déterminer la distribution qui représente le mieux le comportement des données observées. Le choix de la méthode dépend souvent de la loi choisie et de la quantité/qualité des données.

Nous avons utilisé la méthode du maximum de vraisemblance puisqu'il est généralement le choix le plus approprié pour ajuster des lois de probabilité aux données, notamment pour les distributions de valeurs extrêmes comme la loi GEV. Cette méthode est réputée pour fournir des estimateurs efficaces et consistants, ce qui est crucial pour l'analyse des événements rares et extrêmes (Teegavarapu et al., 1970). Sa compatibilité avec les tests d'hypothèses en fait un outil indispensable pour les analyses statistiques rigoureuses. Elle surpasse d'autres techniques comme la méthode des moments, car elle offre une plus grande précision dans l'estimation des paramètres pour les distributions asymétriques (Hosking et Wallis., 1997). Mathématiquement, la fonction de vraisemblance est exprimée par :

$$L(\theta; X) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta) \quad (4)$$

Où $(x_i; \theta)$ est la densité de probabilité pour les valeurs x_i observées. En pratique, on maximise souvent le logarithme de cette fonction, appelé la log-vraisemblance, pour simplifier les calculs :

$$l(\theta; X) = \sum_{i=1}^n \log(f(x_i; \theta)) \quad (5)$$

Cette méthode est privilégiée pour son efficacité et sa capacité à fournir des estimateurs consistants, notamment pour les distributions de valeurs extrêmes.

Le choix du modèle en analyse fréquentielle est sans doute l'étape la plus critique introduisant les plus grandes incertitudes (Meylan et Musy., 1999). Ce choix s'est porté ici sur cinq lois extrêmes pour déterminer celle qui représente le mieux les caractéristiques des données.

- **La loi GEV (Generalized Extreme Value)**

La loi GEV, qui combine trois types de lois de valeurs extrêmes, est utilisée pour modéliser des maxima de variables aléatoires (Fisher & Tippett, 1928 ; Jenkinson, 1955). Sa fonction de répartition est donnée par :

$$F_{GEV}(x) = \exp \left[- \left(1 - \frac{k}{\alpha} (x - \mu) \right)^{\frac{1}{k}} \right] \quad k \neq 0 \quad (6)$$

$$F_{GEV}(x) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{(x - \mu)}{\alpha} \right) \right] \quad k = 0 \quad (7)$$

Où $\mu + \frac{\alpha}{k} \leq x \leq \infty$ pour $k < 0$, $-\infty < x < +\infty$ pour $k = 0$ et $-\infty < x \leq \mu + \frac{\alpha}{k}$ pour $k > 0$; μ , α , et k sont respectivement les paramètres de position, d'échelle, et de forme. Les paramètres sont estimés via MLE, et les intervalles de confiance sont calculés pour évaluer leur variabilité (Adlouni & Ouarda, 2008).

- **La loi normale**

La loi de Gauss, ou loi normale, utilisée pour modéliser des variables continues symétriques, la loi normale est définie par les paramètres suivant : la moyenne (μ) et l'écart-type (σ). Sa fonction de répartition est donnée par :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (8)$$

Les paramètres sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance (MLE), et des intervalles de confiance sont calculés à partir des variances des estimations, en utilisant la distribution normale et la statistique du pour un niveau de confiance donné (Laborde, 2009).

- **La loi de Weibull**

Utilisée pour modéliser les événements extrêmes, la loi de Weibull est définie par les paramètres de forme c et d'échelle a . Sa fonction de répartition est :

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{a}\right)^c\right), x > 0 \quad (9)$$

Les paramètres sont estimés par MLE, et la matrice d'information de Fisher est utilisée pour calculer les intervalles de confiance (Perreault & Bobée, 1992).

- **Loi de Gumbel**

La loi de Gumbel, ou loi des valeurs extrêmes de type I, modélise les maxima dans des séries de données indépendantes. Sa fonction de répartition est :

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-b}{a}\right)\right] \quad (10)$$

où a et b sont les paramètres d'échelle et de position (Laborde, 2009).

- **Loi exponentielle**

Utilisée pour les temps d'attente entre événements, la loi exponentielle simple est définie par le paramètre de taux λ :

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad x \geq 0 \quad (11)$$

Dans sa version généralisée, la fonction de répartition est :

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad x \geq 0 \quad (12)$$

où x_0 , s , et θ sont les paramètres de position, d'échelle et de forme. Les paramètres sont estimés par MLE, et des intervalles de confiance sont calculés à partir de la variance des estimations (Brunet-Moret, 1969).

- **Estimation des Paramètres et Intervalles de Confiance**

Les paramètres pour chaque distribution sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance, et les intervalles de confiance sont obtenus en fonction de la variance des estimations. Pour la loi normale, par exemple, l'intervalle de confiance pour la moyenne μ est :

$$IC_{\lambda} = \left[\hat{\lambda} - z_{\alpha/2} \cdot \frac{\hat{\lambda}}{\sqrt{n}}, \hat{\lambda} + z_{\alpha/2} \cdot \frac{\hat{\lambda}}{\sqrt{n}} \right] \quad (13)$$

où $z_{\alpha/2}$ est la valeur critique pour le niveau de confiance (Laborde, 2009).

Ces ajustements par MLE offrent une base statistique robuste pour l'analyse des précipitations extrêmes, essentielle dans la modélisation des risques hydrologiques.

2.4.2.3. Vérification des tests d'adéquation

Après ajustement des lois de probabilité, la pertinence de ces ajustements est vérifiée par des tests d'adéquation. Les tests de Kolmogorov-Smirnov (KS), Anderson-Darling (AD) et Cramér-von Mises (CVM) ont été choisis pour évaluer la concordance entre les distributions théoriques ajustées et les données empiriques, en maintenant une p-value de $\alpha=0,05$. Ces tests permettent de confirmer la robustesse des prévisions pour les précipitations extrêmes (Meylan et Musy., 1999).

- **Test de Chi-carré**

Le test du Chi-carré compare les fréquences observées et théoriques des données (Karl Pearson., 1900). La statistique de test est :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (14)$$

où O_i et E_i représentent respectivement les fréquences observées et attendues pour chaque classe, avec k catégories et $k - 1$ degrés de liberté (Feller, 1968). Ce test est particulièrement adapté pour vérifier l'ajustement des données de précipitations à une distribution hypothétique, comme la loi normale ou la loi de Gumbel.

- **Test de Kolmogorov-Smirnov (KS)**

Le test KS développé par **Andrey Kolmogorov** en 1933 et amélioré par **Nikolai Smirnov** en 1939, mesure l'écart maximal entre la fonction de répartition empirique et la fonction théorique d'une distribution. La statistique de test est donnée par :

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)| \quad (15)$$

où $F_n(x)$ est la fonction empirique et $F(x)$ la fonction théorique. Si D_n est grand, cela indique que les données diffèrent significativement de la distribution théorique sous l'hypothèse nulle H_0 (Kolmogorov, 1933 ; Smirnov, 1939).

- **Test d'Anderson-Darling (AD)**

La statistique A^2 diffère selon la distribution théorique utilisée (GEV, Weibull, etc.), car elle se base sur la fonction de répartition la distribution considérée.

Le test AD, plus sensible aux extrémités de la distribution que le test KS, mesure les écarts entre les distributions théoriques et empiriques, en accordant un poids plus élevé aux différences dans les queues. La statistique de test est :

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \left[(2i - 1) \left(\ln(F(Y_i)) + \ln(1 - F(Y_{n+1})) \right) \right] \quad (16)$$

où Y_i sont les valeurs ordonnées de l'échantillon. Ce test est particulièrement efficace pour détecter les écarts dans les extrémités de la distribution (Anderson & Darling, 1952). L'hypothèse nulle H_0 du test postule que les données suivent la distribution théorique.

- **Test de Cramer-Von-Mise**

Le test CVM évalue l'ajustement global entre les fonctions de répartition empirique et théorique en mesurant la somme des écarts quadratiques sur toute la distribution :

$$W^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (F_n(x) - F(x))^2 dF(x) \quad (17)$$

où $F_n(x)$ et $F(x)$ sont les fonctions de répartition empirique et théorique. Ce test est particulièrement adapté pour évaluer l'ajustement global sans se focaliser sur les extrémités (Cramér, 1946 ; von Mises, 1954). L'hypothèse nulle H_0 du test postule que les données suivent la distribution théorique.

2.4.2.4. Contrôle des ajustements

- **Comparaison des Critères d'Information**

Les **critères d'information** sont des outils statistiques utilisés pour comparer des modèles et évaluer leur adéquation aux données, tout en tenant compte de leur complexité. Leur objectif est de trouver un équilibre entre la qualité de l'ajustement et la simplicité du modèle, en évitant le surajustement, qui se produit lorsque le modèle est trop spécifique aux données d'entraînement. Principaux critères d'information :

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

Les critères d'information, comme l'AIC et le BIC, sont utilisés pour évaluer la qualité d'ajustement des modèles tout en tenant compte de leur complexité, en évitant le surajustement. Proposé par Akaike (1974), l'AIC est calculé par la formule :

$$AIC = 2k - 2\ln(L) \quad (18)$$

Où k est le nombre de paramètres et L la vraisemblance du modèle. Un AIC plus faible indique un meilleur équilibre entre précision et simplicité (Burnham & Anderson, 2002).

- **Critère d'Information Bayésien (BIC)**

Introduit par Schwarz (1978), le BIC est formulé comme :

$$BIC = k\ln(n) - 2\ln(L) \quad (19)$$

Avec n représentant la taille de l'échantillon. Le BIC pénalise davantage les modèles complexes, surtout dans de grands échantillons.

- **Comparaison des p-values**

Les p-values, associées aux tests d'hypothèses, permettent de déterminer si les données soutiennent l'hypothèse nulle. Un modèle produisant une p-value élevée et minimisant l'AIC ou le BIC est considéré comme optimal. Cependant, la p-value n'indique pas la probabilité que l'hypothèse nulle soit vraie, mais la probabilité d'observer les résultats si elle l'était (Gelman & Loken, 2013). La taille de l'échantillon peut également influencer les p-values (Efron, 1986).

2.4.2.5. Détermination des périodes de retours et calcul des quantiles

La période de retour est un concept clé en hydrologie pour estimer la fréquence des événements extrêmes, tels que les fortes précipitations. Les périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 30, et 50 ans sont couramment utilisées pour prévoir les précipitations extrêmes et adapter les infrastructures (Maidment, 2002), ce qui fut le choix pour cette étude.

Les quantiles, qui divisent la distribution des données, permettent de déterminer les niveaux de précipitation associés à chaque période de retour. Par exemple, le quantile d'une période de 50 ans indique une probabilité annuelle de 2 % d'observer une précipitation supérieure au niveau estimé (Gumbel, 1958). Les L-moments, comme proposés par Hosking & Wallis (1997), sont utilisés pour l'estimation des quantiles des distributions asymétriques, telles que la loi GEV, améliorant ainsi la précision pour les événements rares.

2.4.3. Evaluation de l'aléa d'inondation pluviale

L'évaluation de l'aléa inondation pluviale dans cette étude repose sur la spatialisation des précipitations et la classification des valeurs maximales de pluie selon différentes périodes de retour.

2.4.3.1. Méthode de spatialisation des quantiles de pluies

Pour évaluer les risques d'inondation à Cotonou, la méthode des polygones de Thiessen a été utilisée, adaptée aux zones avec une densité limitée de stations de mesure. Cette technique attribue chaque zone géographique à la station de mesure la plus proche, en formant des polygones autour de chaque station et en répartissant les données pluviométriques de manière homogène. La précipitation moyenne pondérée par surface est calculée par :

$$P_{moy} = \frac{1}{S_T} \sum_{i=1}^n P_i \times S_i \quad (20)$$

Où :

- P_{moy} : La pluie moyenne sur le bassin ;
- P_i : est la précipitation mesurée au niveau de chaque station ;
- S_i : La surface du polygone correspondant ;
- S_T : La surface totale ;
- n : Le nombre des stations (Ouatiki, 2014).

Cette méthode permet ainsi de visualiser efficacement la répartition des quantiles de pluie pour les différentes périodes de retours définis et d'identifier les zones les plus vulnérables aux inondations.

2.4.4. Cartographie des zones inondables

La cartographie des zones inondables a été réalisée en combinant la répartition spatiale des précipitations et la topographie locale. Ce processus permet de produire un modèle précis des zones susceptibles d'être inondées. Nous avons suivi les étapes suivantes :

❖ Rastérisation des Polygones de Thiessen

Les polygones de Thiessen, représentant la répartition spatiale des précipitations autour de chaque station météorologique, ont d'abord été convertis en raster à l'aide de l'outil "**Rastériser (vecteur vers raster)**" dans **QGIS** facilitant la superposition avec d'autres couches raster.

❖ **Intégration du Modèle Numérique de Terrain (MNT)**

Le MNT corrigé a été utilisé pour identifier les zones de faible élévation, plus susceptibles d'accumuler de l'eau et d'être inondées.

❖ **Combinaison des Rasters pour Déterminer les Zones Inondables**

Les rasters des polygones de Thiessen et du MNT ont été multipliés, et le résultat a été divisé par 255 pour standardiser les valeurs dans **ArcGIS** en utilisant l'outil "**Multiplication de raster**". Dans ce contexte, **255** représente la valeur maximale possible dans un raster de type 8 bits, où chaque pixel peut avoir une valeur comprise entre 0 et 255. Cette normalisation permet d'obtenir des valeurs comprises entre **0 et 1**, facilitant ainsi la visualisation et l'interprétation des résultats. Ce modèle final permet d'identifier les zones à haut risque d'inondation en fonction de l'intensité des précipitations et de la topographie locale, facilitant ainsi la visualisation et l'interprétation des résultats.

Chapitre 3 : Résultats et discussion

3.1. Résultats

3.1.1. Analyse fréquentielle des hauteurs de pluies

3.1.1.1. Tests d'hypothèse

Le tableau 2 présente les résultats des tests d'hypothèses de stationnarité, d'indépendance et d'homogénéité sur les maxima journaliers annuels tirés des 3 stations.

L'analyse du tableau montre que les p-values obtenus pour les tests d'homogénéité et de stationnarité sont supérieurs au seuil de signification $\alpha=0.05$ pour toutes les stations. La valeur Z de la statistique du test d'indépendance quant à lui est inférieur à la valeur critique (Z_C) pour les stations **Cotonou Aéroport** et **Cotonou Port** tandis qu'elle est supérieur à Z_C pour la station **Cotonou Ville**.

On en déduit que les stations **Cotonou Aéroport** et **Cotonou Port** montrent une **homogénéité**, une **indépendance** des observations, et une **stationnarité** des données ce qui suggère une stabilité dans les précipitations extrêmes et renforce la validité des analyses stationnaires basées sur ces données tandis que la station **Cotonou Ville** présente une **dépendance** des observations, bien qu'elle reste **homogène** et **stationnaire** indiquant une corrélation entre les événements extrêmes, suggérant une variabilité locale qui pourrait influencer la fréquence des épisodes pluvieux extrêmes.

Tableau 2 : Résultats des tests d'hypothèses de stationnarité, d'indépendance et d'homogénéité

Stations	Test d'Homogénéité (Wilcoxon)	Test d'Indépendance (Wald-Wolfowitz)	Test de Stationnarité (Mann-Kendall)
Cotonou Aéroport	p-value = 0.5196	Z = 0.189 $Z_C = 1.96$	p-value = 0.6101
Cotonou Ville	p-value = 0.3578	Z = 2.1847 $Z_C = 1.96$	p-value = 0.7563
Cotonou Port	p-value = 0.3283	Z = -0.486 $Z_C = 1.96$	p-value = 0.4954

3.1.1.2. Tests d'adéquations et comparaison des lois

Les tests d'hypothèse réalisés sur les données des trois stations ont permis de vérifier leur stationnarité, leur homogénéité et leur indépendance. Ces propriétés fondamentales assurent la validité des séries temporelles pour des analyses fréquentielles robustes. Sur cette base, nous avons procédé à l'ajustement de différentes lois de probabilité (GEV, Weibull et Normale) aux données, afin de déterminer celle qui représente le mieux les précipitations maximales journalières.

Le tableau 3 présente les résultats des différents tests d'adéquations de la loi Normale, Weibull et GEV des trois stations (03). Ce tableau répertorie les valeurs logarithmiques de vraisemblance, AIC, BIC et p des tests du Chi carré, de Kolmogorov-Smirnov, d'Anderson-Darling et de Cramer-Von Mises de chaque loi de distribution.

✓ **Station Cotonou Aéroport**

Pour cette station, les p-values des quatre tests d'adéquation sont toutes supérieures au seuil de signification $\alpha = 0,05$ pour les trois lois étudiées (GEV, Weibull et Normale), indiquant un ajustement statistique satisfaisant. Cependant, la loi **GEV** se distingue par des p-values plus élevées pour les tests de Kolmogorov-Smirnov, Cramer-Von Mises et Anderson-Darling, ainsi que par les valeurs AIC et BIC les plus faibles. Ces résultats suggèrent que la loi GEV est la plus adaptée pour modéliser les précipitations maximales à cette station, particulièrement pour les événements extrêmes.

✓ **Station Cotonou Ville**

Les résultats des tests sont divergents :

- La loi Normale affiche les p-values les plus élevées pour les trois tests d'adéquation, suggérant un bon ajustement statistique global.
- La loi de Weibull, en revanche, présente les valeurs AIC et BIC les plus faibles, indiquant une meilleure performance selon les critères d'information.

Ces résultats montrent qu'il est pertinent de prendre en compte plusieurs critères pour déterminer l'ajustement le plus adéquat.

La loi de Weibull est retenue pour cette station en raison de ses meilleures performances sur les critères AIC et BIC, ce qui signifie qu'elle représente un ajustement optimal pour les données tout en évitant la surcomplexité. Bien que la loi Normale ait de meilleures p-values, la loi de Weibull est souvent utilisée pour modéliser des distributions de précipitations extrêmes et est plus appropriée dans ce contexte d'évaluation du risque d'inondation.

✓ **Station Cotonou Port**

Comme pour la station **Cotonou Aéroport**, les p-values pour les trois lois étudiées dépassent 0,05 dans tous les tests, confirmant leur ajustement adéquat aux données. Cependant :

- La loi Normale présente les valeurs AIC et BIC les plus faibles, ce qui en fait le choix le plus pertinent pour cette station.
- La loi de Weibull, bien qu'ayant obtenu un bon score moyen pour les p-values, n'égale pas les performances globales de la loi Normale selon les critères d'information.

La loi Normale a été retenue en raison de ses performances selon les critères AIC et BIC, bien que la loi de Weibull puisse également être considérée en raison de sa performance solide dans les tests de conformité.

Tableau 3: Résultats des tests d'adéquations sur la loi Normale, Weibull et GEV aux données des trois stations de Cotonou

Station	Test	Loi Normale		Loi Weibull		Loi GEV	
		Statistique	p-value	Statistique	p-value	Statistique	p-value
Cotonou aéroport	Log-vraisemblance	-151.2404		-151.5202		149.4226	
	AIC	306.4808		307.0403		304.8452	
	BIC	309.3488		309.9083		309.1417	
	Chi-Carré	2.1648	0.539	3.1525	0.3686	2.4849	0.2886
	Kolmogorov-Smirnov (KS)	0.1006	0.8814	0.1001	0.8843	0.0789	0.9821
	Anderson-Darling (AD)	0.3467	0.8987	0.4116	0.836	0.112	0.999
	Cramer-Von Mise	0.4881	0.8905	0.0570	0.8363	0.00064	0.996
Cotonou Ville	Log-vraisemblance	-99.4151		-99.27		-98.932	
	AIC	202.8303		202.538		203.864	
	BIC	205.0124		204.721		207.1371	
	Chi-Carré	7.3704	0.061	9.4407	0.024	8.8224	0.0121
	Kolmogorov-Smirnov (KS)	0.1319	0.8381	0.1484	0.7177	0.154	0.6739
	Anderson-Darling (AD)	0.3757	0.8711	0.4318	0.8151	0.4603	0.7829
	Cramer-Von Mise	0.0582	0.8304	0.0704	0.7539	0.0042	0.632
Cotonou Port	Log-vraisemblance	-80.9524		-81.0168		-81.063	
	AIC	165.9049		166.0337		168.1257	
	BIC	167.6856		167.8145		170.797	
	Chi-Carré	2.4813	0.467	2.1894	0.5340	2.4775	0.2897
	Kolmogorov-Smirnov (KS)	0.12	0.932	0.1082	0.969	0.1187	0.9359
	Anderson-Darling (AD)	0.2438	0.9734	0.2589	0.9652	0.2813	0.951
	Cramer-Von Mise	0.0365	0.9543	0.0361	0.9559	0.0026	0.883

3.1.1.3. Ajustement graphique des lois extrêmes aux données

Les graphiques de la figure 8 présentent l'ajustement des maxima des précipitations des deux meilleures lois pour chacune des trois stations. Ces graphiques permettent de valider visuellement les performances des lois sélectionnées sur la base des tests d'adéquation et des critères d'information. Les axes montrent :

- **X** : Probabilité de non-dépassement (c'est-à-dire la probabilité que les précipitations maximales ne dépassent pas une certaine valeur).
- **Y** : Les maxima des précipitations en millimètres (mm).

Les ajustements sont accompagnés d'intervalles de confiance (IC) inférieurs et supérieurs, représentés sur les graphiques pour indiquer la variabilité potentielle autour de la courbe ajustée.

À la station **Cotonou Aéroport**, la **loi Normale**, avec un coefficient de corrélation de 0,994, présente un ajustement global acceptable. Cependant, elle sous-estime les valeurs extrêmes, en particulier dans les queues de distribution. Bien que son ajustement soit satisfaisant pour les précipitations modérées, elle est moins adaptée pour modéliser les précipitations rares et intenses, essentielles pour l'évaluation des risques d'inondation à cette station. En revanche, la **loi GEV** montre une excellente adéquation avec les valeurs extrêmes des précipitations, capturant les queues de distribution sans biais notable, ni sous-estimation ni surestimation. Avec un coefficient de corrélation élevé (0,998), la loi GEV se distingue par sa capacité à modéliser précisément les précipitations rares et extrêmes, confirmant sa supériorité par rapport à la loi Normale et en accord avec les résultats des tests d'adéquation.

À la station **Cotonou Port**, la **loi Weibull**, avec un coefficient de corrélation de 0,991, ajuste bien les précipitations moyennes, mais sur-estime nettement les valeurs extrêmes. La **loi Normale**, avec un coefficient légèrement inférieur (0,99), montre également une bonne capacité à ajuster les précipitations moyennes, mais présente une sous-estimation plus marquée des précipitations extrêmes. Les résultats des tests d'adéquation sont confirmés par l'analyse graphique, où les ajustements des deux lois sont relativement proches. Cependant, bien que la loi de Weibull offre un léger meilleur ajustement pour les extrêmes parmi les deux, elle n'égale pas la loi Normale selon les critères AIC et BIC, qui montrent des valeurs plus faibles pour cette dernière, indiquant un meilleur ajustement global. C'est donc la **loi Normale** qui est adaptée pour modéliser les risques d'inondation à cette station.

Enfin, à la station **Cotonou Ville**, l'ajustement graphique révèle que la **loi Normale**, avec un coefficient de corrélation de 0,985, sous-estime les valeurs extrêmes, bien qu'elle offre un bon ajustement pour les précipitations moyennes. La **loi Weibull**, avec un coefficient de corrélation de 0,982, ajuste également les précipitations moyennes de manière satisfaisante, mais sous-estime les extrêmes dans une moindre mesure que la loi Normale. Cela confirme que la **loi Weibull** est plus adaptée que la loi Normale pour modéliser les précipitations rares et intenses observées à cette station.

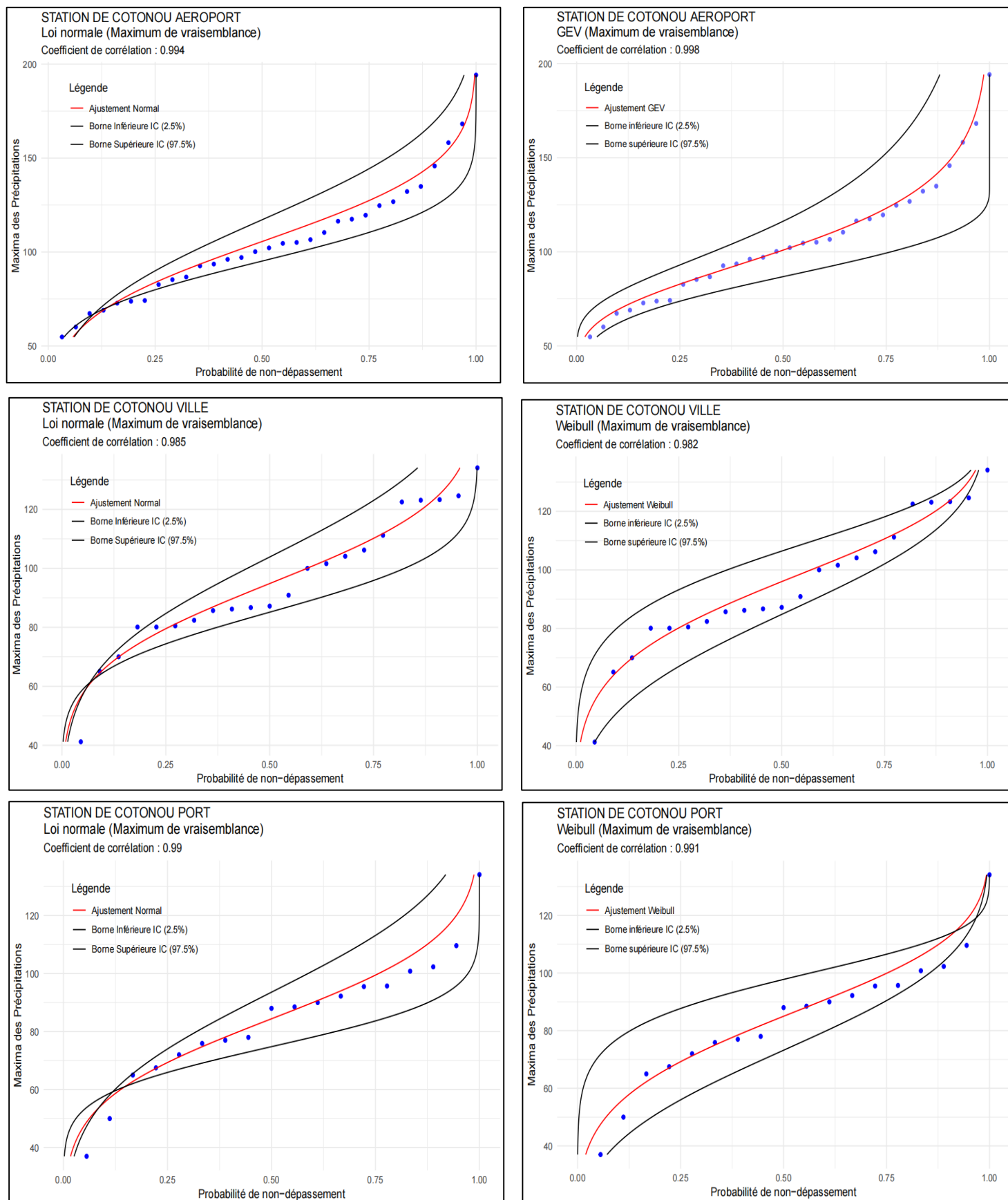


Figure 8 : Ajustement des maximas des précipitations des deux meilleures lois de distribution pour chacune des trois stations avec un intervalle de confiance de 95%

3.1.1.4. Calcul des quantiles de pluie

Les résultats du tableau 4 présentent les quantiles de précipitations pour des périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 30 et 50 ans, calculés pour trois stations (Cotonou Aéroport, Cotonou Ville, et Cotonou Port). Ces quantiles ont été obtenus à partir des lois de distribution (Weibull, GEV et Normale) retenues pour leur bon ajustement aux données.

Les données montrent une augmentation régulière des quantiles de précipitation en fonction des périodes de retour pour les trois stations, ce qui est conforme à la théorie des valeurs extrêmes. **Cotonou Aéroport** présente les valeurs de quantiles les plus élevées, ce qui suggère que cette station est la plus susceptible d'enregistrer des précipitations extrêmes. Cela peut être expliqué par des facteurs géographiques particuliers qui influencent l'intensité des événements météorologiques. **Cotonou Ville** affiche des quantiles légèrement inférieurs à ceux de Cotonou Aéroport, indiquant des précipitations maximales relativement modérées. Cela pourrait être dû à son environnement urbain relativement protégé et à une moindre exposition aux influences météorologiques extrêmes par rapport à Cotonou Aéroport. En comparaison, **Cotonou Port** présente les quantiles les plus bas, ce qui suggère des précipitations maximales modérées. Cette tendance pourrait être liée à l'effet modérateur des conditions maritimes et de l'environnement urbain portuaire, qui limitent l'intensité des pluies extrêmes.

Tableau 4: Résultats du calcul des quantiles pour les périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 30 et 50 ans des différentes lois distribution Weibull, GEV et Normale des trois stations.

Période de retour	Station Cotonou aéroport	Station Cotonou ville	Station Cotonou port
2	100.90	96.03	84.4
5	129.42	114.08	103.2
10	147.64	122.75	113.2
20	164.63	129.54	121.13
30	174.20	132.94	125.36
50	185.94	136.80	130.27

○ Visualisation graphique

Le graphique 9 ci-dessous présente la relation entre les quantiles de précipitation et les périodes de retour des (03) stations.

Le graphique montre clairement la tendance croissante des quantiles avec les périodes de retour pour les trois stations, tout en mettant en évidence les différences de niveaux de précipitation extrêmes attendus entre elles.

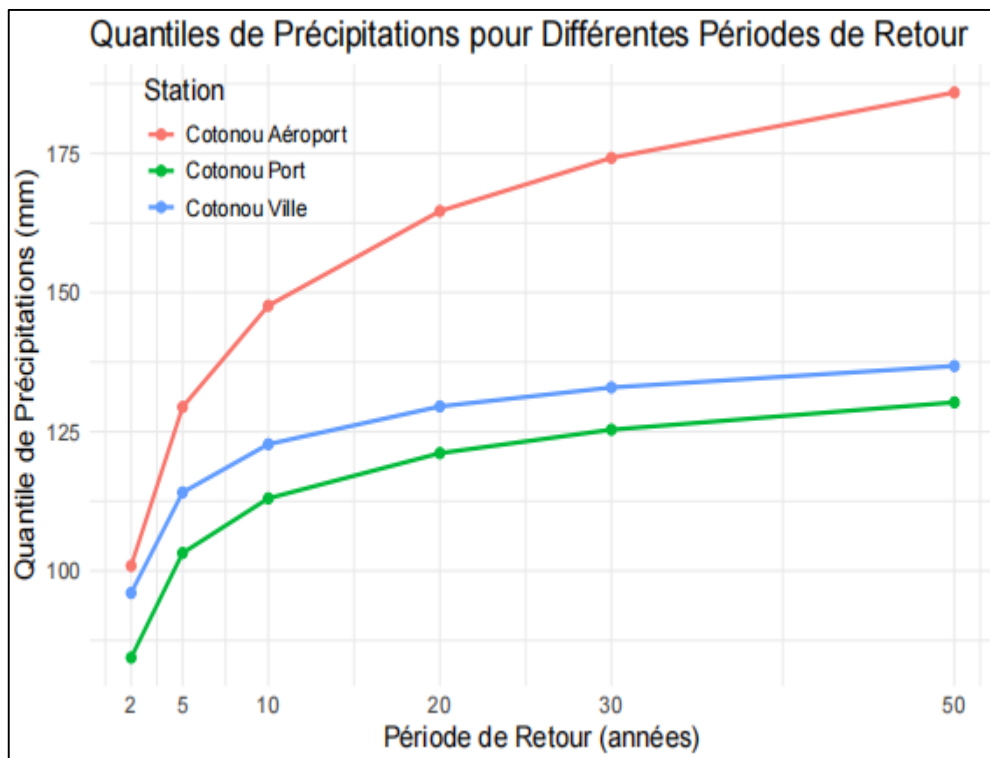


Figure 9 : Relation entre les quantiles de précipitation et les périodes de retour des (03) stations.

3.1.2. Evaluation de l'aléa d'inondation pluviale

Les cartes de spatialisation des précipitations ont été générées à partir des quantiles calculés pour chaque station (Cotonou Aéroport, Cotonou Port, Cotonou Ville) et pour les différentes périodes de retour. Ces cartes ont été réalisées en utilisant la méthode des polygones de Thiessen pour délimiter les zones d'influence de chaque station et de comprendre la répartition géographique des valeurs de pluies maximales.

Les cartes des figures 10, 11 et 12 présentent la spatialisation des quantiles de pluie par la méthode des polygones de Thiessen des différentes périodes de retour entre les trois stations.

Les résultats montrent que la station :

- **Cotonou Aéroport** couvre majoritairement l'ouest de la ville, incluant les quartiers de Kouhounou, Cadjéhoun et Vodjè ;
- **Cotonou Port** influence le centre de la ville, avec des localités telles qu'Aïdjèdo, Gbéto et Gbégamè.
- **Cotonou Ville** englobe principalement l'est de la ville, desservant des zones comme Wlacodji, Sodjatinmè et Dandji.

L'observation des cartes de spatialisation des pluies des différentes périodes de retour ($T = 2, 5, 10, 20, 30$ et 50 ans) révèle une augmentation progressive des intensités de précipitations à travers la ville. Les périodes de retour courtes (2 et 5 ans) présentent des valeurs de précipitations relativement faibles, généralement inférieures à 100 mm, tandis que les périodes de retour longues (jusqu'à 50 ans) montrent des valeurs dépassant les 150 mm, en particulier dans la zone nord-est de la ville. Cette augmentation progressive correspond à une intensification de la pluviométrie en fonction de la période de retour.

En résumé, la spatialisation des pluies, basée sur la méthode des polygones de Thiessen, offre une répartition précise des quantiles de précipitations pour chaque station, ce qui permet d'identifier clairement les zones à risque. Ces résultats soulignent l'importance de l'analyse fréquentielle des précipitations pour la gestion des risques d'inondation et la planification des mesures d'adaptation dans les zones vulnérables de Cotonou.

CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES DUES AUX PRECIPITATIONS DANS LA VILLE DE COTONOU

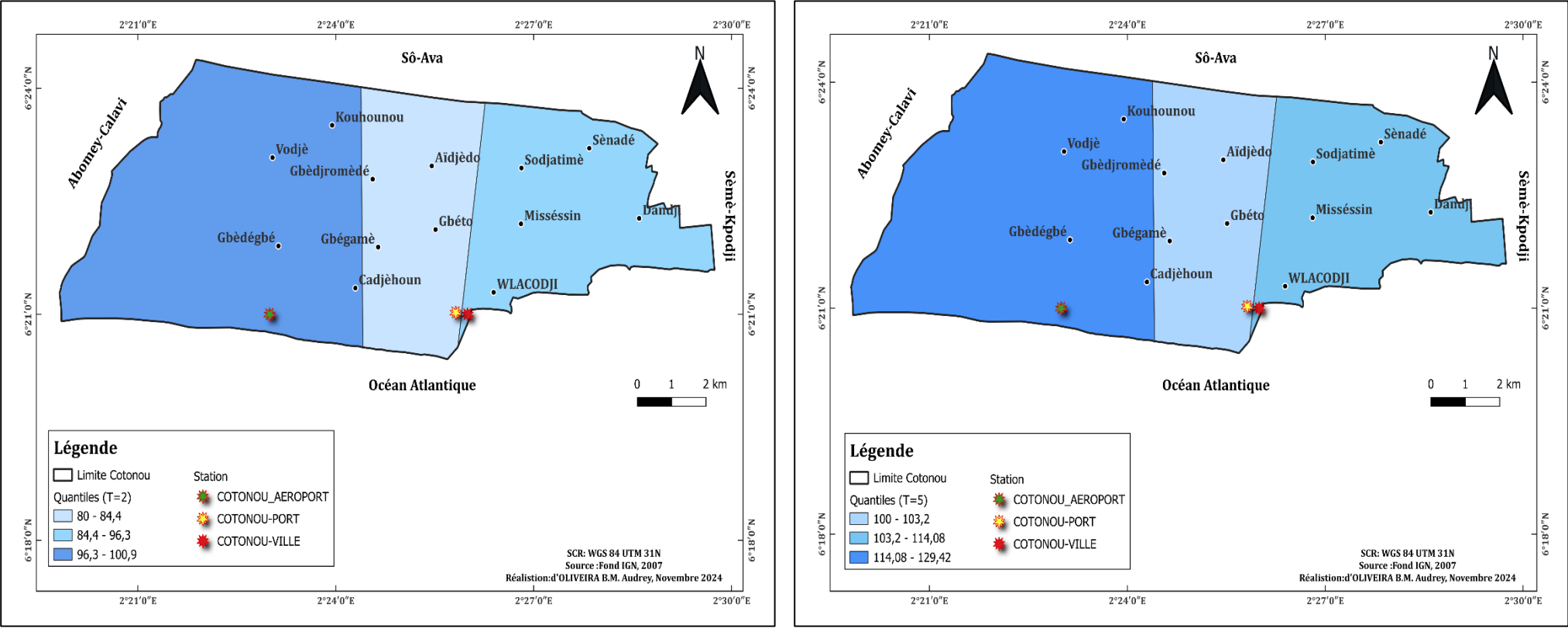


Figure 10 : Spatialisation des quantiles de pluies des périodes de retours de 2 et 5 ans entre les trois stations

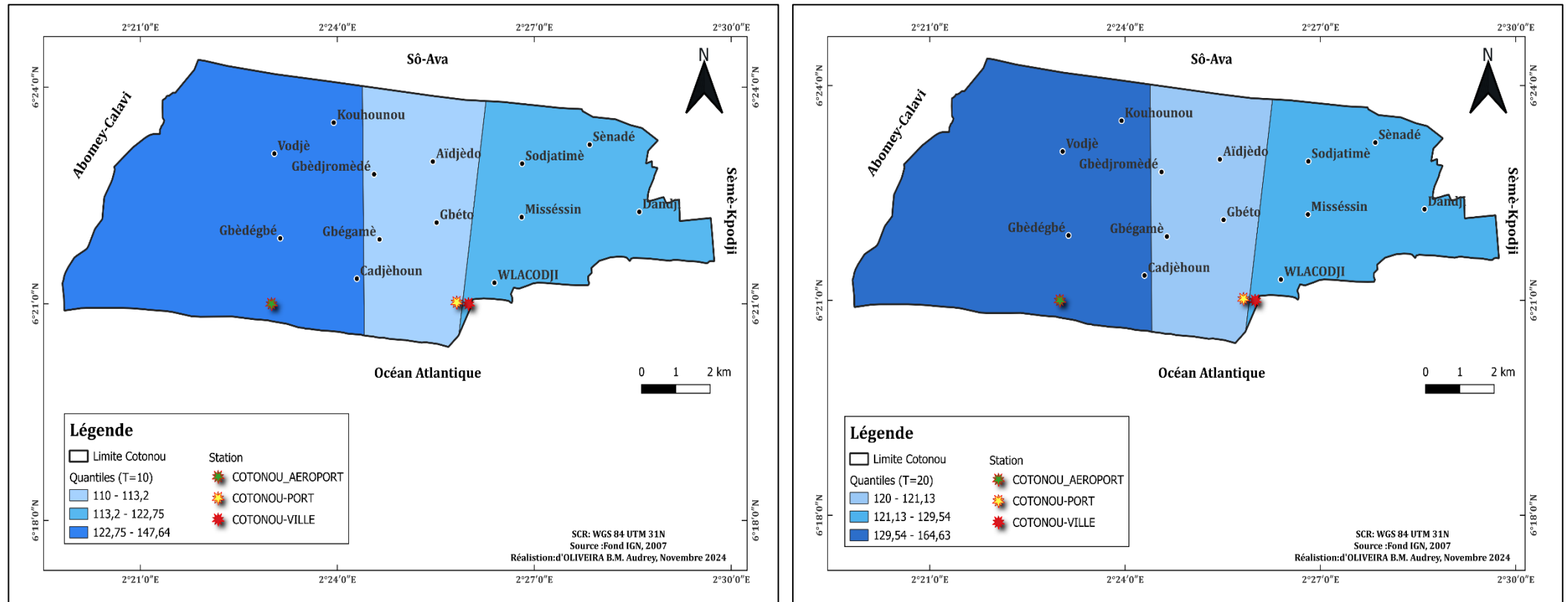


Figure 11: Spatialisation des quantiles de pluies des périodes de retours de 10 et 20 ans entre les trois stations

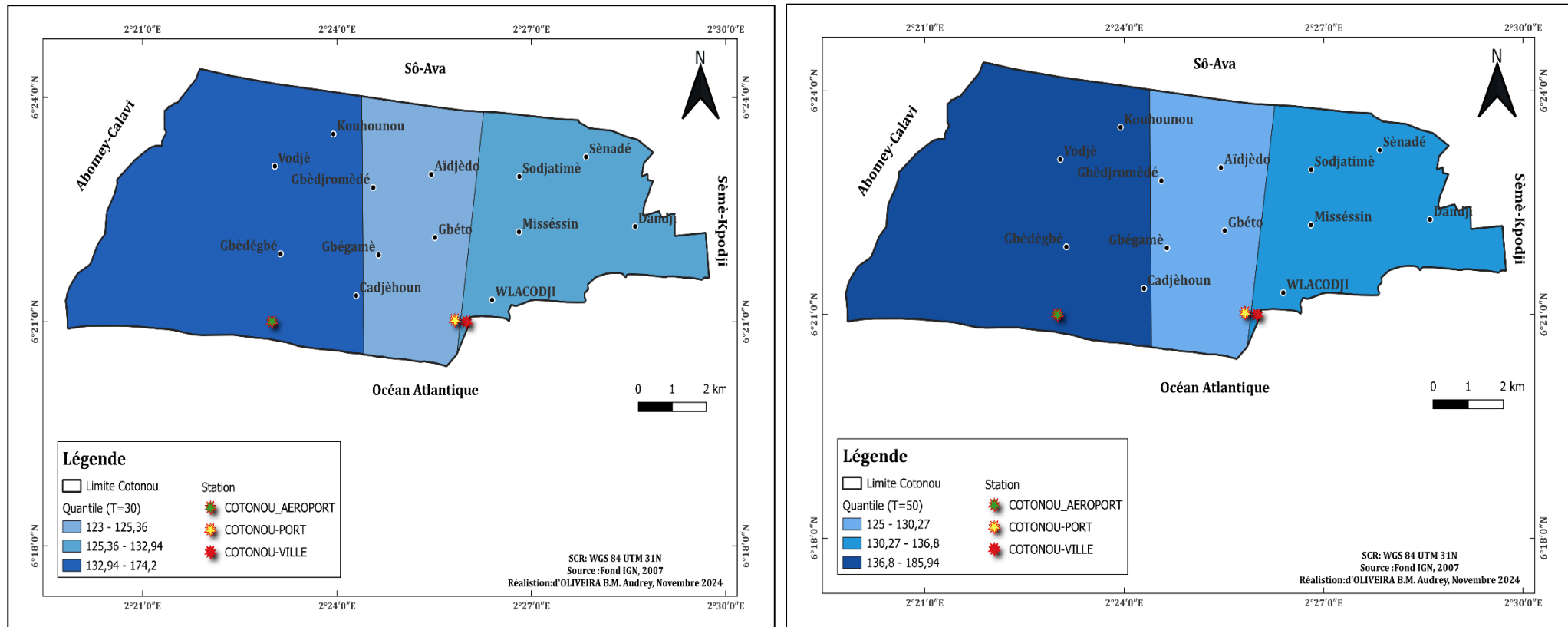


Figure 12 : Spatialisation des quantiles de pluies des périodes de retours de 30 et 50 ans entre les trois stations

3.1.3. Cartographie des zones inondables

Les cartes des figures 13, 14 et 15 présentent la répartition spatiale des zones inondables à Cotonou pour différentes périodes de retour : 2, 5, 10, 20, 30 et 50 ans. Ces cartes ont été générées en combinant les données pluviométriques, les polygones de Thiessen et un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) pour tenir compte des variations topographiques de la région. Cette intégration permet d'identifier avec précision les zones les plus exposées aux inondations, en particulier les zones basses sujettes à l'accumulation d'eau.

L'analyse des cartes montre une évolution notable de l'étendue et de l'intensité des inondations à Cotonou en fonction de la période de retour. Les résultats indiquent une extension progressive des zones à risque, notamment dans les parties sud-est et sud-ouest de la ville, ainsi que dans les zones côtières proches de l'océan Atlantique et des abords du lac Nokoué comme Vossa-Kpodji, où les terrains bas sont particulièrement vulnérables à l'accumulation d'eau, un phénomène qui devient de plus en plus visible à mesure que la période de retour augmente. Pour les périodes de retour courtes (2 et 5 ans), les zones faiblement inondables (en bleu) sont prédominantes. Toutefois, à partir de 10 ans, les zones modérément à fortement inondables (jaune, orange et rouge) s'étendent davantage, touchant des localités vulnérables telles qu'Ahogbohoulé-Cité-Eucharistie, Suru-Léré, Fidjrosè-Kpota et Fifadji. À partir de la période de retour de 20 ans, une intensification notable des inondations est observée, affectant particulièrement les secteurs situés dans des dépressions naturelles et des zones densément peuplées. Cette évolution souligne une probabilité croissante d'inondations sévères lors des épisodes pluvieux extrêmes, mettant en évidence la nécessité de mesures préventives pour réduire les impacts sur les infrastructures et la population.

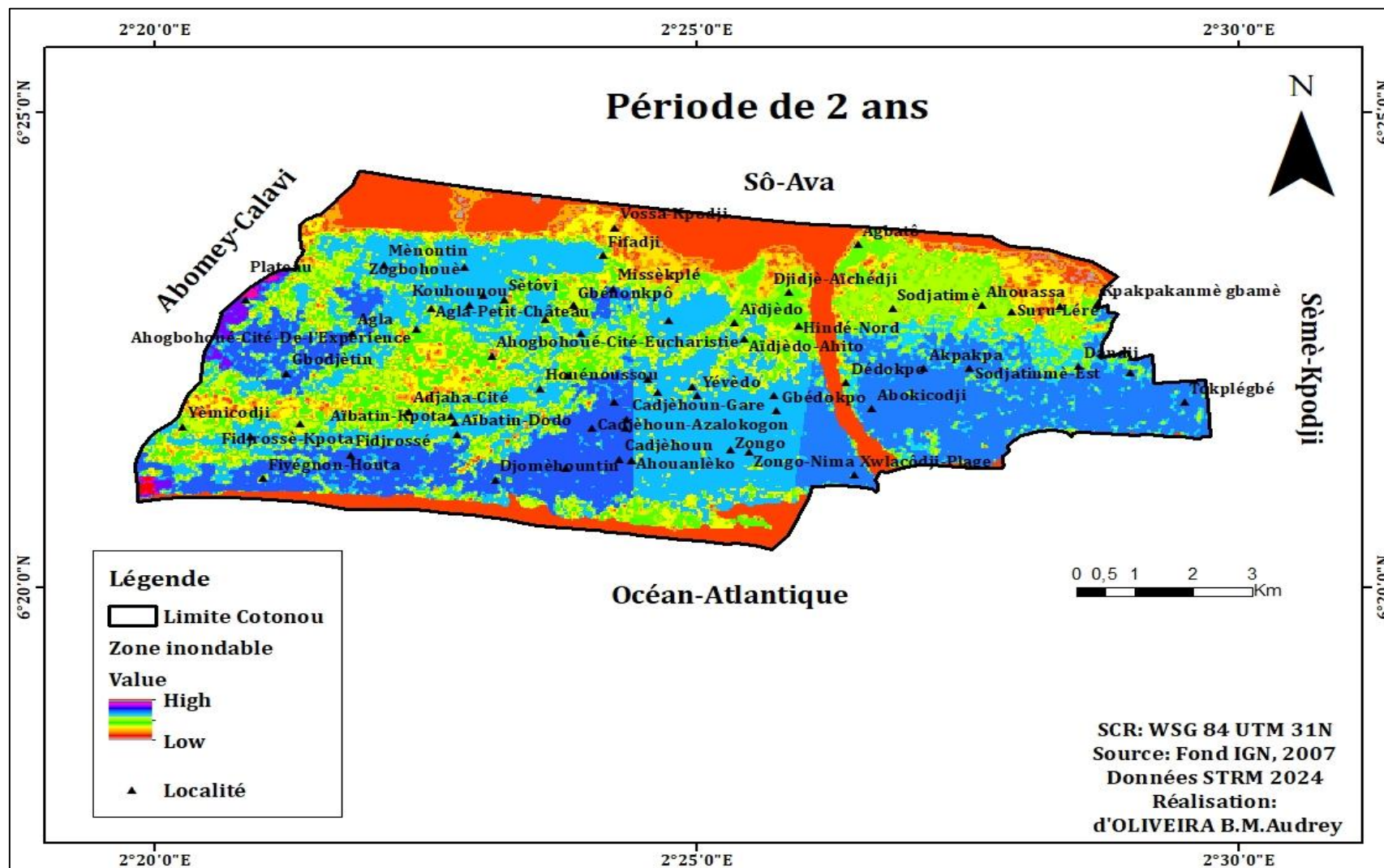


Figure 13: Zones inondables de Cotonou selon la période de retour de 2 ans

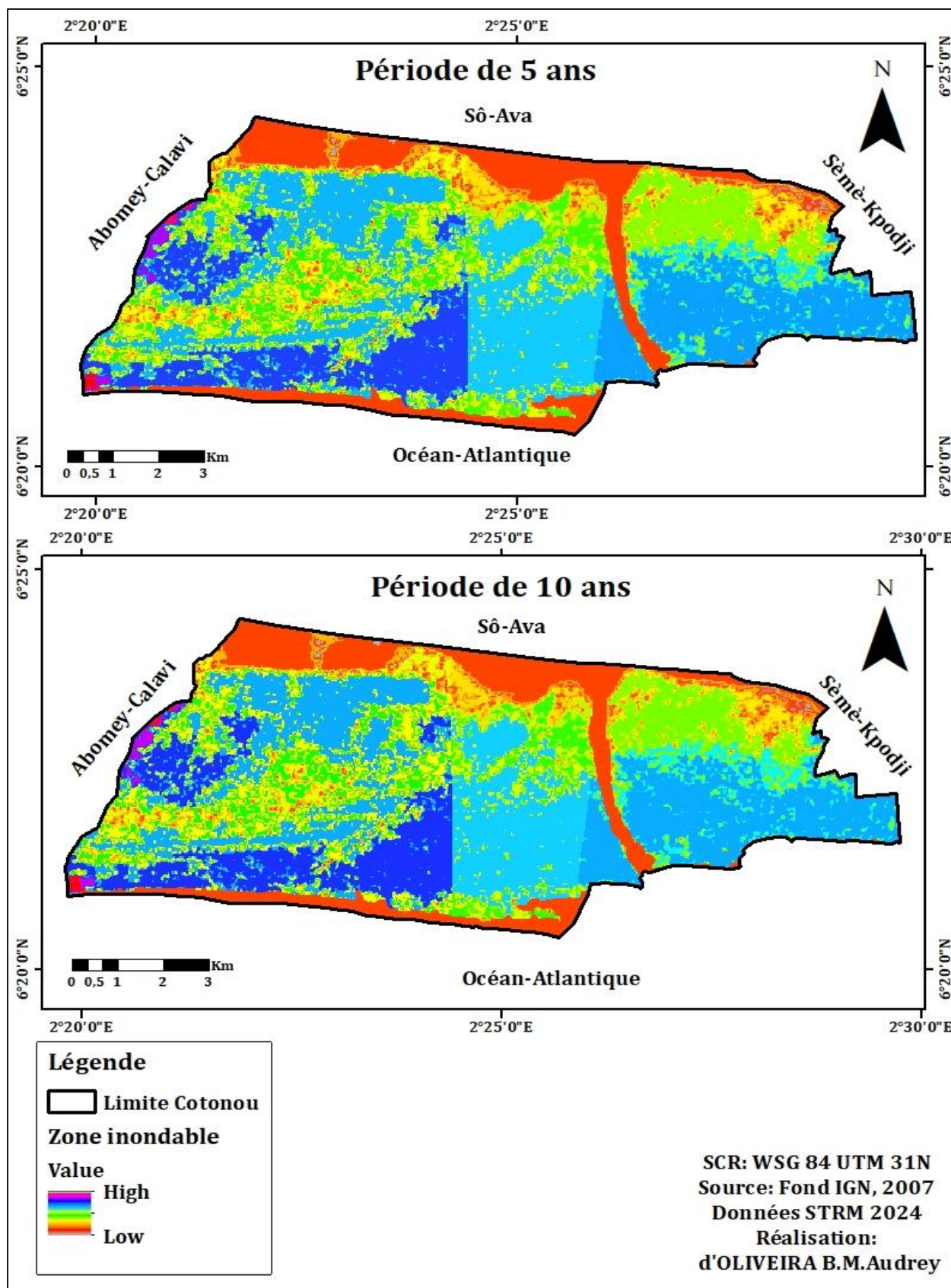


Figure 14: Zones inondables de Cotonou selon les périodes de retour de 5 et 10 ans

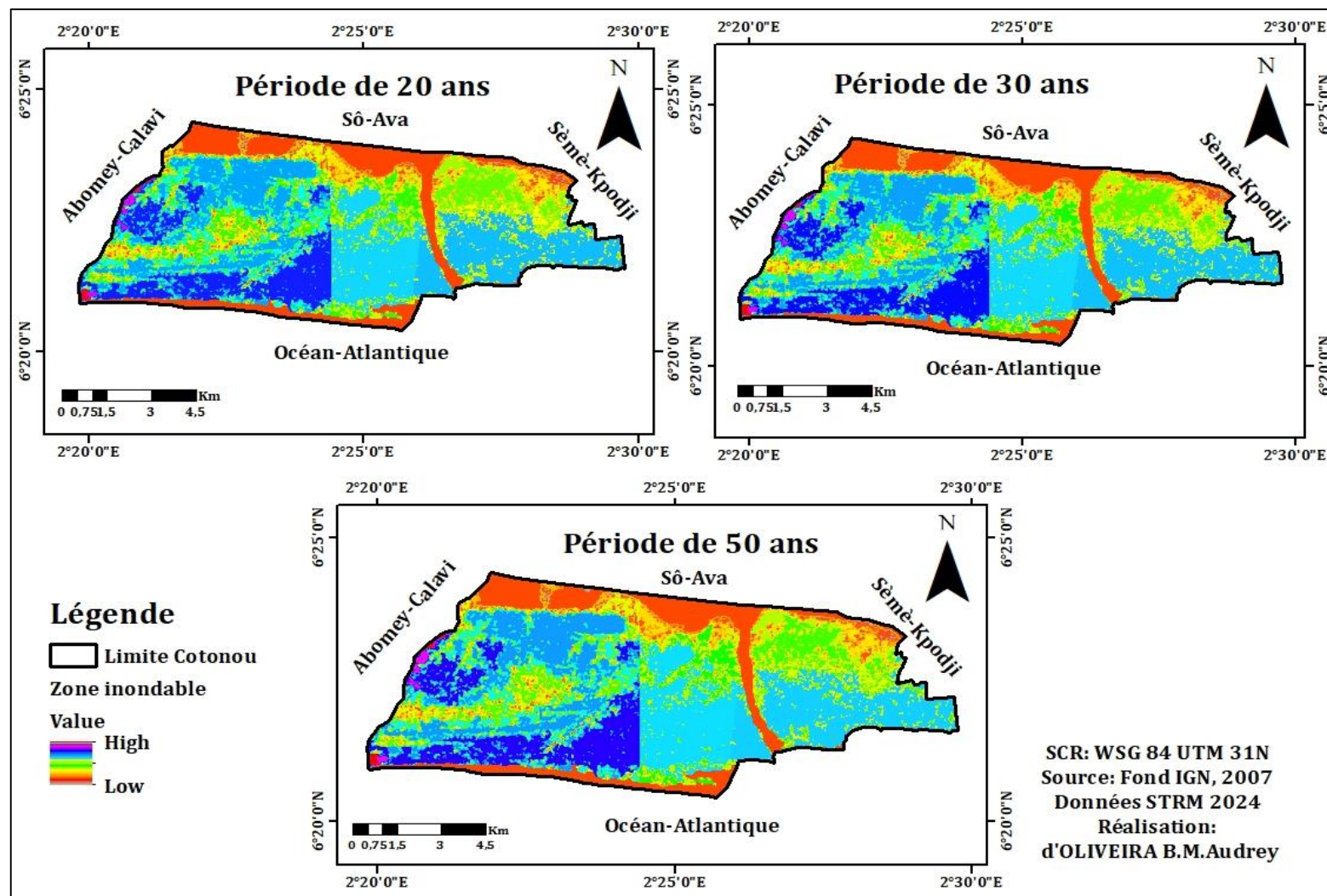


Figure 15: Zones inondables de Cotonou selon les périodes de retour de 20, 30 et 50 ans

3.2. Discussion

Au cours de cette étude, le principal objectif était de cartographier les zones à risque d'inondation à Cotonou en prenant en compte les précipitations extrêmes et les fréquences des hauteurs de pluie associées à des périodes de retour de 2 à 50 ans. Les analyses ont utilisé des données pluviométriques des stations de Cotonou Aéroport, Cotonou Ville et Cotonou Port, combinées à des modèles statistiques (lois de Weibull et GEV) pour modéliser les précipitations extrêmes. Des cartes de spatialisation des précipitations ont été générées à partir des quantiles calculés pour chaque station, tandis que la méthode des polygones de Thiessen a délimité les zones d'influence de chaque station, offrant ainsi une représentation précise des pluies maximales à travers la ville.

Les résultats ont montré une répartition spatiale distincte des précipitations, avec Cotonou Aéroport couvrant l'ouest (Kouhounou, Cadjéhoun, Vodjè), Cotonou Port influençant le centre (Aïdjèdo, Gbéto, Gbégamè), et Cotonou Ville représentant l'est (Wlacodji, Sodjatinmè, Dandji). Une augmentation progressive des intensités de précipitation a été observée avec l'augmentation des périodes de retour, ce qui souligne la nécessité d'une analyse fréquentielle pour la gestion des risques d'inondation et la planification des mesures d'adaptation.

Les cartes générées, en combinant les données pluviométriques, les polygones de Thiessen et le Modèle Numérique d'Élévation (MNE), ont permis de mieux identifier les zones inondables. Celles-ci se trouvent principalement dans les parties sud-est, sud-ouest et près du lac Nokoué (comme Vossa-Kpodji), et elles s'étendent avec l'augmentation de la période de retour. Ces observations sont en accord avec celles d'Assogba (2010), qui a également identifié ces secteurs comme étant particulièrement exposés à cause de leur topographie basse et de l'occupation non contrôlée des terres humides. Pour les périodes de retour courtes (2 et 5 ans), les zones faiblement inondables prédominent. À partir de 10 ans, les zones modérément à fortement inondables s'élargissent, touchant des localités telles qu'Ahogbohoulé, Suru-Léré, Fidjrosè-Kpota et Fifadji. À 20 ans, l'intensité des inondations augmente, affectant particulièrement les zones en dépression et densément peuplées. Cette évolution met en évidence la nécessité de mesures préventives pour limiter les impacts sur les infrastructures et la population.

Conclusion générale et perspectives

La présente étude a permis d'analyser la cartographie de l'aléa d'inondation à Cotonou, en mettant l'accent sur l'examen approfondi des données de précipitation recueillies au cours des trente dernières années. Cette recherche a contribué à une meilleure compréhension de la dynamique des précipitations, mettant en lumière les tendances annuelles et saisonnières qui influencent le risque d'inondation dans la région. En appliquant des méthodes statistiques rigoureuses, telles que le modèle de distribution de Weibull et d'autres approches de distribution, nous avons évalué les événements extrêmes et leur fréquence, ce qui est essentiel pour anticiper les inondations potentielles. De plus, la cartographie des aléas élaborée dans ce travail constitue un outil précieux pour les décideurs et les planificateurs urbains, facilitant ainsi la mise en œuvre de stratégies d'atténuation des risques.

Cependant, plusieurs axes de recherche et d'application méritent d'être explorés pour renforcer la résilience de Cotonou face aux inondations. Tout d'abord, certaines méthodes d'analyse des hauteurs de pluie, telles que les techniques d'analyse des séries temporelles et les modèles de prévision climatique, n'ont pas été appliquées dans cette étude. L'intégration de ces méthodes pourrait offrir une compréhension plus dynamique des tendances de précipitation et des mécanismes sous-jacents. En outre, des méthodes de spatialisation, comme l'interpolation géographique des données de précipitation par krigeage ou par méthodes des voisins les plus proches, n'ont pas été explorées. Ces approches permettraient une meilleure représentation spatiale des risques d'inondation en tenant compte des variations locales des précipitations. De plus, une évaluation des aléas d'inondation sous d'autres angles, comme l'analyse des sols, l'occupation des terres et les infrastructures existantes, pourrait enrichir notre compréhension des facteurs contribuant à la vulnérabilité des zones inondables. L'intégration de données supplémentaires, telles que les caractéristiques socio-économiques des communautés locales, serait également bénéfique pour évaluer la résilience des populations face aux risques.

Concernant la cartographie des risques, il serait pertinent d'inclure des éléments physiographiques supplémentaires, tels que la pente, l'usage des sols et la végétation, pour affiner les résultats. Une analyse multidimensionnelle prenant en compte ces facteurs physiques permettrait de mieux cibler les zones les plus vulnérables aux inondations.

À l'avenir, ces perspectives visent non seulement à renforcer les capacités d'adaptation de Cotonou face aux risques d'inondation, mais aussi à offrir des solutions durables pour la résilience des communautés vulnérables. L'approfondissement de ces recherches, en intégrant des données variées et des méthodes d'analyse avancées, contribuera à une gestion plus efficace des risques d'inondation dans la région.

Références bibliographiques

- Adam, K. S., & Boko, M. (1993). *Le Climat du Bénin*.
- Adger, W. N. (2006). *Vulnerability*. *Global Environmental Change*, 16(3), 268-281.
- Akaike, H. (1974). "A new look at the statistical model identification." *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716-723.
- Akponikpè, P. J., & Aizén, H. (2005). *Les ressources en eau et la gestion de l'environnement au Bénin*.
- Anderson, T. W., & Darling, D. A. (1952). "Asymptotic theory of certain goodness-of-fit criteria based on stochastic processes." *The Annals of Mathematical Statistics*, 23(2), 193-212.
- Aschan-Leygonie C., et Baudet-Michel S. (2009) *Risque, vulnérabilité, résilience : comment les définir dans le cadre d'une étude géographique sur la santé et la pollution atmosphérique en milieu urbain ?*
- Assogba, L. P. *Etude de l'influence du lac Nokoué et du chenai sur les inondations dans la ville de Cotonou au Bénin*.
- Bedient, P. B., & Huber, W. C. (2008). *Hydrology and Floodplain Analysis*. Prentice Hall.
- Boko, M. (1988). *Les Villes du Golfe de Guinée et leurs Enjeux Environnementaux : Le Cas de Cotonou*.
- Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2002). *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach* (2nd ed.). Springer.
- Chokpon, A., Ozer, P., & Lawin, E. (2021). *Assessment of Flood Risk in Cotonou Areas Surrounding Nokoué Lake Due to the Effect of Climate Change*. *Journal of Geoscience and Environment Protection*.
- Cramér, H. (1946). *Mathematical Methods of Statistics*. Princeton University Press.
- Direction Générale de la Coordination et du Suivi des Objectifs de Développement Durable. (2019). *Spatialisation des cibles prioritaires des ODD au Bénin : Monographie des communes des départements de l'Atlantique et du Littoral*.
- Djiogbénou, F. et al. (2015). *Évaluation de la végétation et de l'hydrologie dans le cadre des changements climatiques*.
- Efron, B. (1986). "Why isn't everyone a Bayesian?" *The American Statistician*, 40(1), 1-5.
- Feller, W. (1968). *An Introduction to Probability Theory and Its Applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Fisher, R. A. (1925). *Statistical Methods for Research Workers*. Oliver and Boyd.
- Folke, C. (2006). *Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses*. *Global Environmental Change*, 16(3), 253-267.
- Gelman, A., & Loken, E. (2013). *The garden of forking paths: Why multiple comparisons can be a problem, even when there is no "fishing expedition" or "p-hacking" and the research hypothesis was posited ahead of time*.
- Gnéle, J. E. (2000). *Géomorphologie et hydrogéologie de Cotonou*. Université d'Abomey-Calavi.
- Goodchild, M. F. (1993). *Geographic Information Systems and Science*. Wiley.
- Gumbel, E. J. (1958). *Statistics of Extremes*. Columbia University Press.
- Hailegeorgis. T. T., Thorolfsson. S. T., & A. Knut. (2008). *Regional frequency analysis of extreme precipitation with consideration of uncertainties to update idf curves for the city of trondheim*
- Hosking, J. R. M., & Wallis, J. R. (1997). *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*. Cambridge University Press.
- Houessinon D. R. B., Tchibozo E. M., Vissin E. W. & Ognondoun. (2022). *Cartographie du risque d'inondation dans l'agglomération urbaine du Grand Nokoué au Bénin : SIG et approche multicritère*
- Hountondji, B., Codo, F. P., Dahounto, S. V. H., & Gbaguidi, T. B. (2019). *Gestion des inondations en milieu urbain : cas de la ville de Cotonou au Bénin*. Larhyss Journal.
- Institut National de la Statistique du Bénin (1979). *Recensement de la population*.
- Institut National de la Statistique du Bénin (2013). *Recensement de la population*.

- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press.
- IWMI Reports (2020).
- Kanda, M. et al. (2023). "Trees Diversity and Species with High Ecological Importance for a Resilient Urban Area: Evidence from Cotonou City (West Africa)." *MDPI*. Cet article détaille la diversité des espèces d'arbres dans Cotonou et leur importance écologique dans un contexte urbain.
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin.
- Kolmogorov, A. N. (1933). "Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione."
- Laborde, J. (2009). *Éléments d'hydrologie de surface*.
- L'Hôte, Y., Mahé, G., Somé, B., & Triboulet, J. P. (2002). *Analysis of Recent Rainfall Conditions in West Africa*. Water Resources Management.
- Maidment, D. R. (2002). *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill.
- Mann, H. B. (1945). *Nonparametric tests against trend*. Econometrica.
- Meylan, P. et Musy, I. (1999). *Analyse fréquentielle*. *Annale revue hydrologie*.
- Meylan, P., Favre, A. C., & Musy, A. (2008). *Hydrologie fréquentielle: une science prédictive*.
- Ouatiki H., (2014) *Spatialisation des pluies et étude physiographique du sous bassin versant de Tillouguite à l'aide des outils de modélisation géospatiale*.
- Ozer, A., Erpicum, M., & Demaree, G. (2009). *Impact of Rainfall Variability on Flood Risk in Urban Areas in Sub-Saharan Africa*. International Journal of Climatology.
- Ozer, P. et al. (2003). *L'impact des changements climatiques au Bénin*.
- Pelling, M. (2003). *The Vulnerability of Cities: Natural Disasters and Social Resilience*. Earthscan Publications Ltd.
- Perreault, L. et Bobée, B. (1992). *Statistical analysis of extreme hydrological events*
- Saizonou, M., B. Yehouenou., H. S. Bankolé., R. G. Jossé., Henri Soclo. (2010). *Impacts des déchets de l'Abattoir de Cotonou dans la dégradation de la qualité des eaux de la nappe phréatique*
- Salaheddine El Adlouni et Taha B.M.J. Ouarda (2008) *Comparaison des méthodes d'estimation des paramètres du modèle GEV non stationnaire*
- Schwarz, G. (1978). "Estimating the dimension of a model." *The Annals of Statistics*, 6(2), 461-464.
- Séguis, L., Cappelaere, B., & Peugeot, C. (2004). *Rainfall Variability and its Impact on Runoff and Flooding in West African Urban Areas*. Journal of Hydrology.
- Smirnov, N. V. (1939). "On the estimation of the discrepancy between empirical curves of distribution for two independent samples."
- Smith, K., & Ward, R. C. (1998). *Floods: Physical processes and human impacts*. John Wiley & Sons.
- Sylla, M. B., Giorgi, F., Coppola, E., & Mariotti, L. (2016). *Uncertainties in Daily Rainfall over Africa: The Role of Different Model Configurations*. Climate Dynamics.
- Tanguy M. (2012). *Cartographie du risque d'inondation en milieu urbain adaptée à la gestion de crise. Analyse préliminaire*
- UNISDR (2009). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. United Nations International Strategy for Disaster Reduction.
- von Mises, R. (1954). *Probability, Statistics and Truth*. Dover Publications.
- Wald, A., & Wolfowitz, J. (1940). *On a Test Whether Two Samples Are from the Same Population*. The Annals of Mathematical Statistics.
- Wald, A., & Wolfowitz, J. (1940). *On a test whether two samples are from the same population*. *Annals of Mathematical Statistics*, 11, 147-162.
- World Bank. (2020). *Managing Coastal Risk in West Africa: Strengthening Resilience to Coastal Erosion and Flooding*.
- World Bank. (2020). *West Africa Coastal Areas Management Program (WACA)*.
- Zoumenou P., DhossouVI I., Ahlinhan M., & Tankpinou Kiki Y. (2020). *Comportement face à l'érosion côtière du trait de côte à l'Est de Cotonou*