

Article original

Cartographie des zones d'inondation pluviale et prévalence des maladies hydriques dans la ville de Cotonou

Naboua KOUHOUNDJI^{*1 & 5}; Jean HOUNKPE²; C. Charles HOUNTON⁴; Clément C. GNIMADI³; Expédit Wilfried VISSIN³; Bergez Merveille Audrey d'OLIVEIRA²

¹ Université d'Abomey-Calavi, Laboratoire d'Hydraulique et de Maîtrise de l'Eau (LHME), 072 BP 50 Cotonou ; Tél : +229 0197951711 ; Email: kouhoundjiab@gmail.com

² Université d'Abomey-Calavi, Institut National de l'Eau (INE)

³ Université d'Abomey-Calavi, Institut du Cadre de Vie (ICAV)

⁴ Université de Parakou

* Auteur pour les correspondances

Réf : AUM12-0233

Résumé : Les inondations causées par les pluies extrêmes représentent une menace majeure pour la santé des 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, surtout l'apparition de maladies hydriques. 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 augmentant ainsi

le degré d'apparition des maladies hydriques. D'un autre côté, les inondations de longues périodes de retour 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 et de maladies hydriques. 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, maladies hydriques, Cotonou, SIG.

Mapping of rainfall flood zones and prevalence of waterborne diseases in the city of Cotonou

Abstract: Flooding caused by extreme rainfall poses a major threat to the health of urban populations, particularly in coastal cities such as Cotonou. This study aims to map the flood-prone areas of the city of Cotonou based on rainfall of different return periods (2, 5, 10, 20, 30, and 50 years) to better understand its spatial distribution and facilitate hazard management, especially the occurrence of waterborne diseases. To do this, a frequency analysis of rainfall heights was carried out using data from three weather stations in Cotonou, covering the period from 1993 to 2023. These data made it possible to determine the rainfall 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 exposed to short return periods, thus increasing the incidence of waterborne diseases. On the other hand, floods with long return periods also affect more densely urbanized areas. This mapping helps identify priorities for drainage and urban zoning interventions to strengthen Cotonou's resilience to flood and waterborne disease risks. These results can serve as a basis for prevention and development actions in a climate change context.

Keywords: Pluvial flooding, frequency analysis, waterborne diseases, Cotonou, GIS.

1.1.1. Introduction

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, p335). 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 (Agoïnon et al., 2012, p62). Les changements climatiques exacerbent cette situation, influençant les régimes de précipitations et augmentant la fréquence des événements météorologiques extrêmes (IPCC, 2014 ; p177). Selon les projections, l'Afrique de l'Ouest pourrait connaître des précipitations plus intenses et de plus courte durée, augmentant ainsi le risque d'inondation dans des villes comme Cotonou (Sylla et al., 2016, p105). 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, p57). 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. Pour cela, les outils du système d'information géographique (SIG) fournissent une base solide en facilitant la prévention, la gestion de crise et l'évaluation des impacts post-catastrophe (Smith et al., 2016, p330 ; Alfieri et al., 2012, p918 ; Jha & Blöschl, 2011, p1020). Ainsi, cette étude vise à cartographier les zones inondables de Cotonou en fonction des précipitations associées à différentes périodes de retour (2, 5, 10, 20, 30 et 50 ans). En s'appuyant sur une analyse fréquentielle des précipitations et des techniques de spatialisation via les Systèmes d'Information Géographique (SIG), cette recherche apporte des éléments d'identification des priorités pour des interventions de drainage et de zonage urbain afin de renforcer la résilience de Cotonou face aux risques d'inondation et de maladies hydriques.

2. Matériels et Méthode

2.1. Données

Les données de précipitations utilisées dans cette étude proviennent de trois stations météorologiques situées à Cotonou, gérées par l'Agence Nationale de la Météorologie du Bénin. Elles couvrent la

période de 1993 à 2023. Le tableau 1 présente le récapitulatif des stations.

Tableau 1 : 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	

Source : Agence MÉTEO-Bénin, 2024

Les données cartographiques utilisées dans cette étude incluent des fonds topographiques issus de l'Institut Géographique National (IGN) (figure 1) et un modèle numérique de terrain (MNT) à une résolution de 30 mètres, fourni par la plateforme OpenTopography.

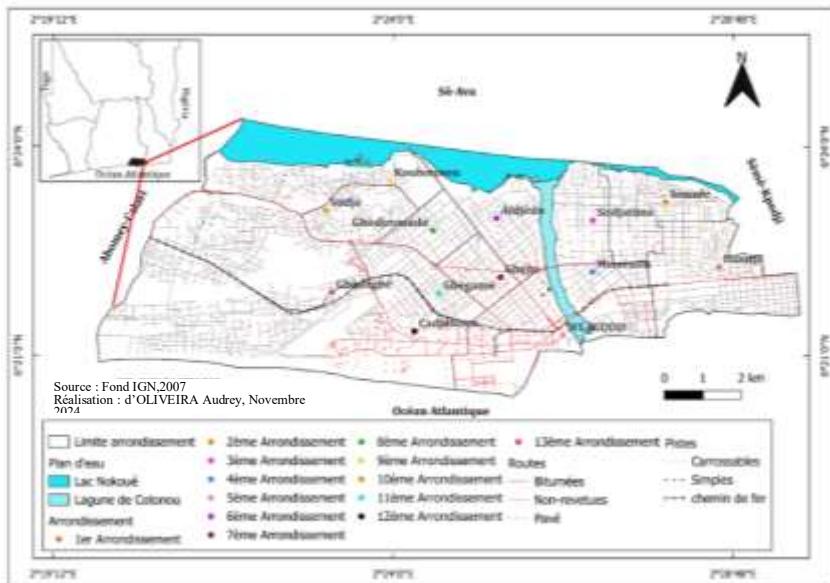


Figure 1: Carte de localisation de Cotonou

Les maxima journaliers ont été extraits pour réaliser une analyse fréquentielle, et le MNT a été corrigé dans ArcGIS pour éliminer les anomalies topographiques. L'analyse des précipitations a permis de calculer des quantiles, spatialement intégrés avec les polygones de Thiessen pour évaluer l'aléa d'inondation. Ces données ont été ensuite intégrées au MNT corrigé sous forme de raster pour identifier les zones inondables.

2.2. Méthode d'analyse fréquentielle des hauteurs de pluies

L'analyse fréquentielle a permis de prédire les probabilités futures d'événements hydrologiques, tels que les précipitations intenses, en étudiant les occurrences passées (Meylan et al., 2008, p99). Réalisée ici avec le logiciel R, elle modélise les données historiques pour estimer la probabilité d'événements similaires à l'avenir, aidant à quantifier la récurrence des pluies extrêmes à Cotonou et anticiper les risques d'inondation. Les étapes suivies pour l'analyse fréquentielle sont : réalisation des tests d'hypothèses, ajustement des lois extrêmes aux données, vérification des tests d'adéquation, contrôle des ajustements, et détermination des périodes de retour et calcul des quantiles.

2.2.1. 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. Les résultats sont évalués par la statistique de test et la p-value, comparée au niveau de signification de $\alpha = 0.05$, à travers le tableau 2.

Tableau 2 : Tests statistiques et leurs hypothèses

Test	Hypothèse nulle (H_0)	Hypothèse alternative (H_1)	Statistique de test
Test d'homogénéité de Wilcoxon	Les distributions des deux périodes sont identiques	Les distributions des deux périodes sont différentes	$W = \min (W_1, W_2)$ (Wilcoxon, 1945),
Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz	Les observations sont indépendantes	Il existe une dépendance dans les données	$Z = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R}$ (Wald et Wolfowitz, 1940)
Test de Mann-Kendall	Il n'y a pas de tendance	Il existe une tendance	$S = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=i+1}^n sign(x_j - x_i)$ (Mann, 1945 ; Kendall, 1975)

Source : Résultats de recherche exploratoire, 2024

2.2.2. Ajustement des lois extrêmes aux données

Il a été utilisé la méthode du maximum de vraisemblance (MLE) pour l'ajustement de la loi de probabilité. Cette méthode est réputée pour fournir des estimateurs efficaces et consistants (Tableau 3).

Tableau 3 : Méthode d'estimation et fonctions de vraisemblance

Méthode d'estimation	Fonction de vraisemblance (L)	Log-vraisemblance (l)
Maximum de vraisemblance (MLE)	$L(\theta; X) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta)$	$L(\theta; X) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta)$

Source : Adapté de Hosking et Wallis, 1997

Cinq (05) lois de probabilité ont été utilisées pour déterminer celle qui représente le mieux les caractéristiques des données de précipitations extrêmes à Cotonou (Tableau 4).

Tableau 4: Lois de probabilité et leurs fonctions de répartition

Loi	Fonction de répartition	Paramètres
Loi GEV (Generalized Extreme Value)	$F_{GEV}(x) = \exp \left[- \left(1 - \frac{K}{\alpha} (x - \mu) \right)^{\frac{1}{K}} \right] \quad k \neq 0$ $F_{GEV}(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{(x-\mu)}{\alpha} \right) \right] \quad k = 0$ <small>(El Adlouni, S., & Ouarda, T. B. M., 2008)</small>	μ, α, k
Loi normale	$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du$; (Laborde, 2009)	μ, σ
Loi de Weibull	$F(x) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{x}{a} \right)^c \right), x > 0$; (Perreault & Bobée, 1992)	a, c
Loi de Gumbel	$F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-b}{a} \right) \right]$; (Laborde, 2009)	a, b
Loi exponentielle	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, x \geq 0$; (Brunet-Moret, 1969)	λ

Source : Résultats de recherche exploratoire, 2024

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 (Tableau 5).

Tableau 5 : Intervalle de confiance pour la moyenne selon la distribution

Distribution	Intervalle de confiance pour μ (moyenne)
Loi normale	$IC_{\hat{\lambda}} = \left[\hat{\lambda} - z_{a/2} \cdot \frac{\hat{\lambda}}{\sqrt{n}}, \hat{\lambda} + z_{a/2} \cdot \frac{\hat{\lambda}}{\sqrt{n}} \right]$; (Laborde, 2009)

Source : Résultats de recherche exploratoire, 2024

2.2.3. Vérification des tests d'adéquation

Après ajustement des lois de probabilité, la pertinence de ces ajustements a été vérifiée par des tests d'adéquation. Les tests de Khi2, 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 (Tableau 6).

Tableau 6: Statistiques des tests d'adéquation

Test d'adéquation	Statistique de test
Test de Chi-carré	$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$; (Karl Pearson., 1900)
Test de Kolmogorov-Smirnov (KS)	$D_n = \sup_x F_n(x) - F(x) $; (Kolmogorov, 1933 ; Smirnov, 1939)
Test d'Anderson-Darling (AD) (Anderson & Darling, 1952)	$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \left[(2i+1) \left(\ln(F(Y_i)) + \ln(1 - F(Y_{n+1})) \right) \right]$
Test de Cramer-Von-Mise (CVM) (Cramér, 1946 ; von Mises, 1954)	$W^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (F_n(x) - F(x))^2 dF(x)$

Source : Résultats de recherche exploratoire, 2024

2.2.4. Contrôle des ajustements

Pour évaluer la qualité des ajustements et comparer les modèles probabilistes, plusieurs critères de p-value, Akaike Information Criterion (AIC) et Bayesian Information Criterion (BIC) ont utilisés (Tableau 7). Ces critères permettent d'identifier la loi qui ajuste le mieux les données tout en évitant un sur-ajustement.

Tableau 7 : Méthodes d'évaluation des modèles

Méthode	Formule	Utilisation
p-value	Calculée en fonction de la distribution de la statistique de test	Permet de rejeter ou non H_0 selon le seuil α
AIC (Akaike Information Criterion)	$AIC = 2k - 2\ln(L)$; (Akaike., 1974)	Compare la qualité d'ajustement de modèles avec pénalité sur la complexité
BIC (Bayesian Information Criterion)	$BIC = k\ln(n) - 2\ln(L)$; Schwarz (1978)	Similaire à AIC, mais pénalise davantage les modèles complexes

Source : Résultats de recherche exploratoire, 2024

2.2.5. Détermination des périodes de retour et calcul des quantiles

La période de retour estime la fréquence des précipitations extrêmes. Celles de 2 à 50 ans sont couramment utilisées pour prévoir ces événements et adapter les infrastructures (Maidment D. R., 1993, p140). Les quantiles déterminent les niveaux de précipitation associés. Les L-moments (Hosking & Wallis, 1997, p103) améliorent l'estimation des quantiles pour les distributions asymétriques comme la loi GEV, affinant la prévision des événements rares.

2.3. Méthode de spatialisation des quantiles de pluies pour l'évaluation de l'aléa inondation pluviale

Pour évaluer les risques d'inondation à Cotonou, la méthode des polygones de Thiessen a été utilisée, adaptée aux zones à faible densité de stations. Chaque zone est associée à la station la plus proche, répartissant les données pluviométriques de manière homogène. La précipitation moyenne pondérée est calculée par :

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

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 et n : Le nombre des stations. Cette méthode permet de visualiser la répartition des quantiles de pluie et d'identifier les zones vulnérables aux inondations.

2.4. Cartographie des zones inondables

La cartographie des zones inondables combine la répartition spatiale des précipitations et la topographie locale selon les étapes suivantes :

- ✓ Rastérisation des polygones de Thiessen : Conversion des polygones en raster dans QGIS pour faciliter la superposition avec d'autres couches.
- ✓ Intégration du MNT : Utilisation du MNT corrigé pour repérer les zones de faible élévation, plus sujettes aux inondations.
- ✓ Combinaison des rasters : Multiplication des rasters des polygones de Thiessen et du MNT, puis division par 255 dans ArcGIS pour normaliser les valeurs entre 0 et 1.

Ce modèle final identifie les zones à haut risque d'inondation en fonction des précipitations et de la topographie locale, optimisant ainsi la visualisation et l'interprétation des résultats.

3. Résultats

3.1. Analyse fréquentielle et calcul des quantiles

A l'issue de l'analyse des données de précipitations des 3 stations étudiées, les p-values des tests d'homogénéité et de stationnarité sont supérieures au niveau de signification de $\alpha = 0,05$ pour toutes les stations. La statistique Z du test d'indépendance est inférieure à la valeur critique (ZC) pour les stations Cotonou Aéroport et Cotonou Port, mais supérieure pour Cotonou Ville. Ainsi, Cotonou Aéroport et Cotonou Port présentent des données homogènes, indépendantes et

stationnaires, ce qui signifie que les précipitations extrêmes y sont régulières et prévisibles. En revanche, Cotonou Ville, bien qu'homogène et stationnaire, montre une dépendance entre les observations, indiquant une variabilité locale influençant la fréquence des fortes pluies (Tableau 8).

Tableau 8 : Résultats des tests d'hypothèse

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

Source : Résultats de tests, 2025

A travers les tests d'adéquation, les graphiques de la figure 2 montrent qu'à la station Cotonou Aéroport, les trois lois montrent un bon ajustement aux données avec des p-values supérieurs à 0.05, mais la loi GEV se démarque avec des p-values élevées et des critères AIC/BIC faibles, la rendant optimale. À la station Cotonou Ville, bien que la loi Normale ait les meilleures p-values, la loi de Weibull est plus performante avec des critères AIC/BIC plus bas, prouvant son adéquation. À la station Cotonou Port, les trois lois s'ajustent correctement, mais la loi Normale est retenue pour ses critères AIC/BIC les plus faibles.

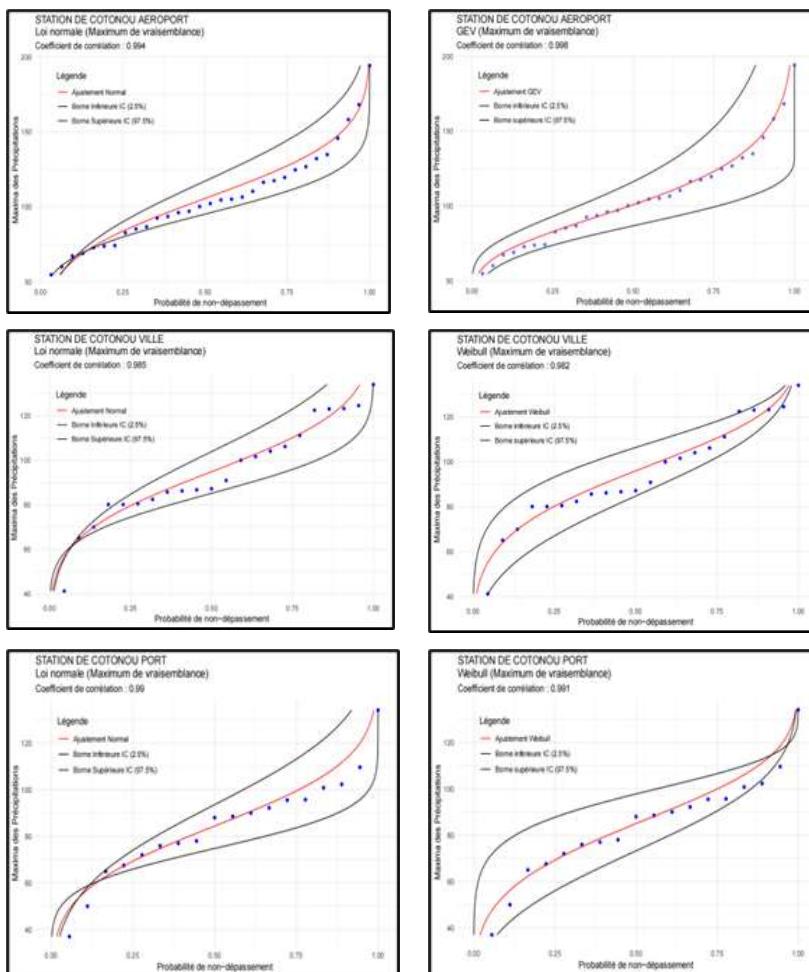


Figure 2 : Ajustement des maxima des précipitations des deux meilleures lois de distribution pour chacune des trois stations avec un intervalle de confiance de 95%

À la station Cotonou Aéroport, la loi GEV se distingue par une excellente adéquation aux précipitations extrêmes et modérées, avec un coefficient de corrélation de 0,998, confirmant sa

supériorité. A la station Cotonou Ville, la loi Normale avec un coefficient de corrélation de 0,985 sous-estime les précipitations extrêmes, tandis que la loi Weibull avec un coefficient de corrélation de 0,982 les ajuste mieux, bien qu'imparfaitement. La loi Weibull est donc plus adaptée pour modéliser les événements rares et intenses de cette station. Quant à la station Cotonou Port, les lois Weibull (0,991) et Normale (0,99) montrent des ajustements proches. La loi Normale est retenue grâce à des critères AIC/BIC plus favorables.

✓ **Calcul des quantiles**

Les quantiles de précipitation augmentent avec les périodes de retour, conformément à la théorie des valeurs extrêmes. Cotonou Aéroport affiche les quantiles les plus élevés, Cotonou Ville des quantiles légèrement inférieurs et Cotonou Port les quantiles les plus bas (Tableau 9).

Tableau 9 : Résultats du calcul des quantiles pour les périodes de retour

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

Source : Résultats de recherche, 2025

3.2. Evaluation de l'aléa inondation pluviale

La carte (figure 3) présentée illustre la spatialisation des pluies selon la méthode de polygonation de Thiessen, montrant la répartition des zones d'influence des trois stations : Cotonou Aéroport (ouest), Cotonou Port (centre) et Cotonou Ville (est).

Cette répartition reste identique pour toutes les périodes de retour ; seuls les quantiles de précipitations varient, reflétant des intensités croissantes des précipitations extrêmes. Ces résultats mettent en évidence l'importance de l'analyse fréquentielle pour cibler les zones à risque et mieux gérer les inondations (figure 3).

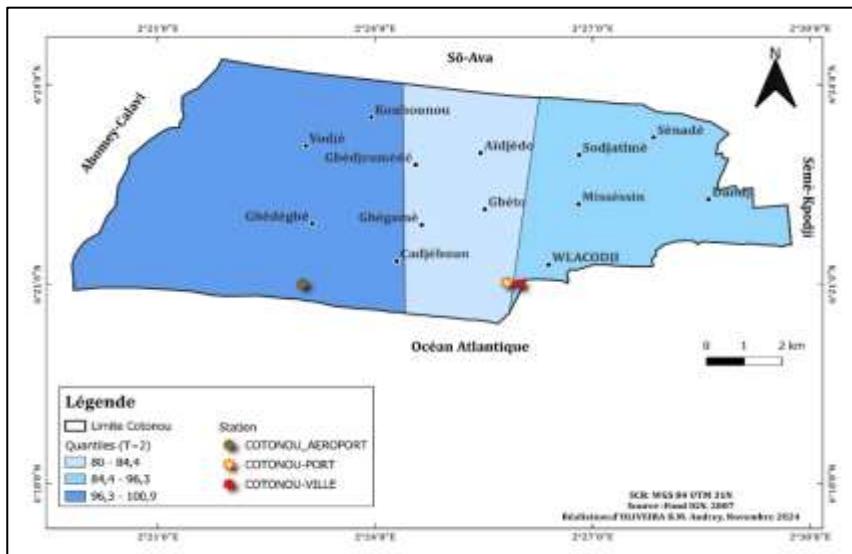


Figure 3 : Spatialisation des quantiles de pluies des périodes de retour de 2 ans

Sur cette figure, Cotonou-ouest enregistre moyennement plus de précipitations (entre 96 et 100 mm de hauteur d'eau par mois). Cette zone est suivie de Cotonou-est qui enregistre 84 à 96 mm d'eau par mois. Cotonou-centre apparaît en 3ème position avec une précipitation moyenne mensuelle comprise entre 80 et 84 mm. Ces précipitations, en fonction des périodes de retour, pourraient produire des inondations à des degrés différents.

3.3. Cartographie des zones inondables

Les figure 4, planche 1, planche 2 et figure 5 présentent successivement les cartes de susceptibilité à l'inondation de la ville de Cotonou pour les périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 30 et 50 ans. 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'Ahogbohoué-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.

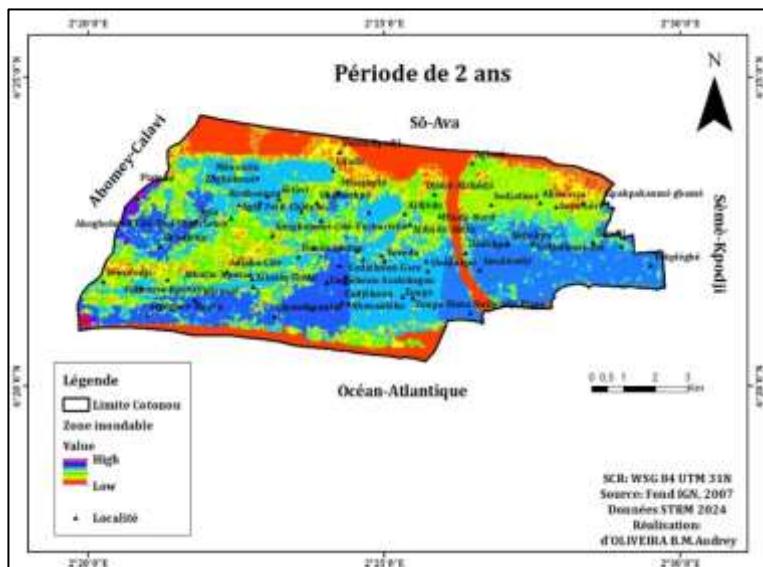


Figure 4 : Modélisation des zones inondables pour une période de retour de 2 ans

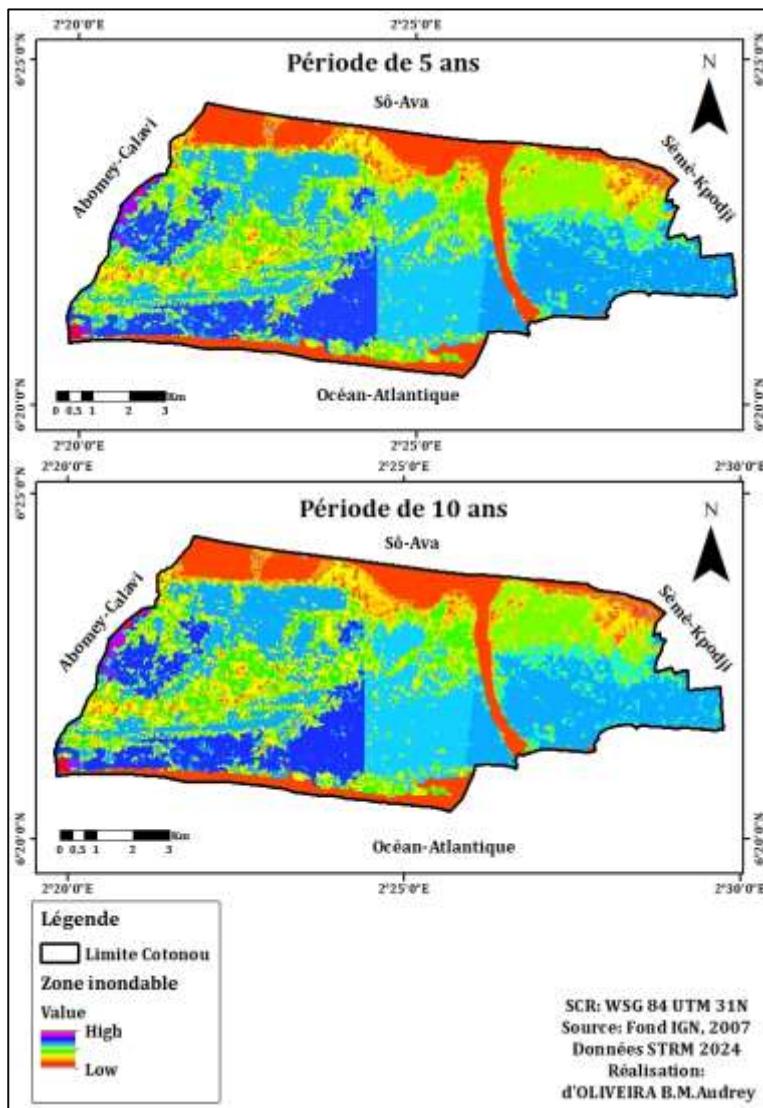


Planche 1 : Modélisation des zones inondables pour une période de retour de 5 et 10 ans

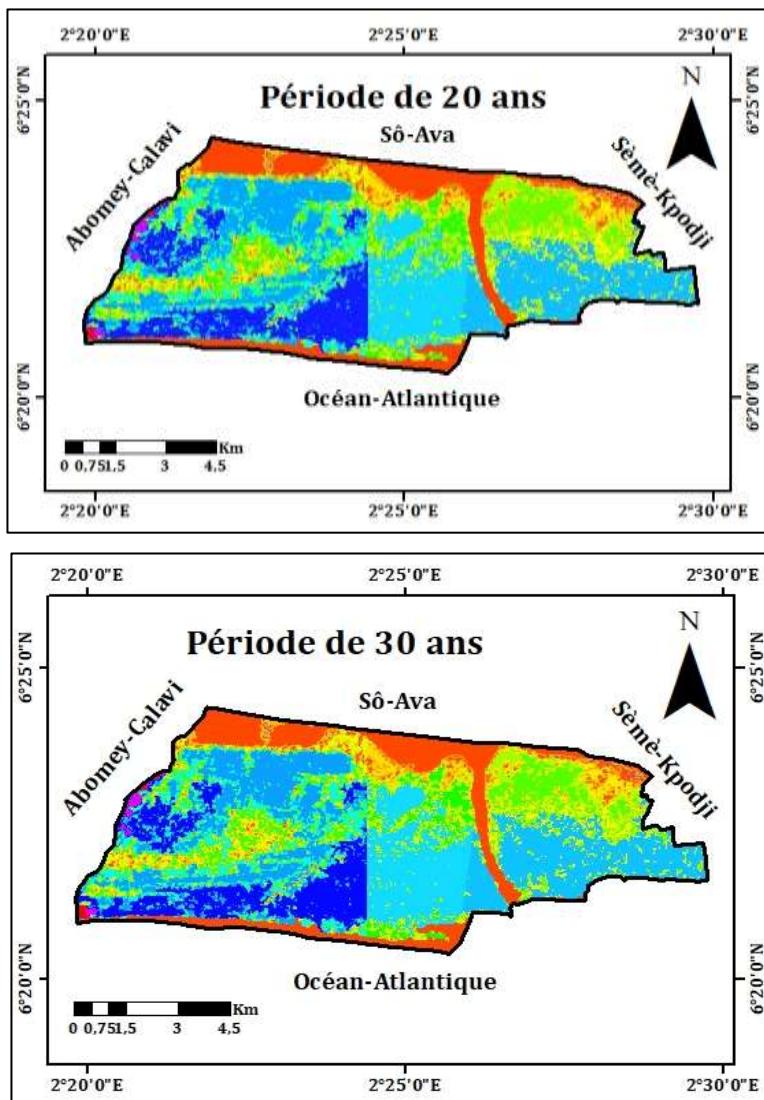


Planche 2 : Modélisation des zones inondables pour une période de retour de 20 et 30 ans

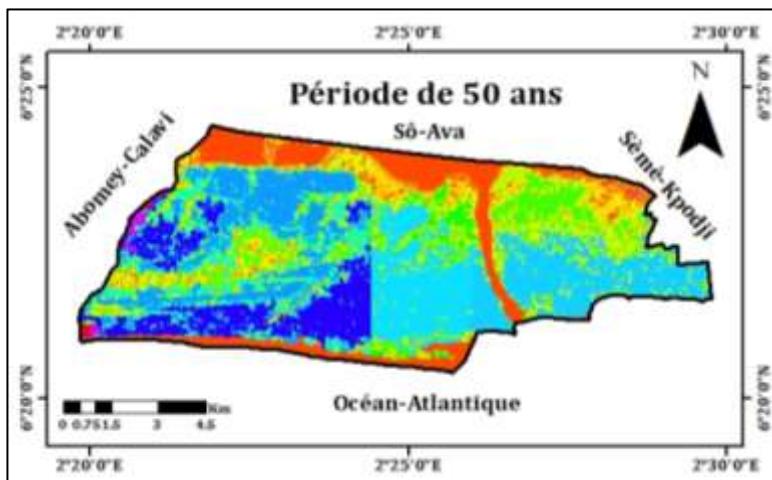


Figure 5 : Modélisation des zones inondables pour une période de retour de 50 ans

4. Discussion

Cette étude vise à 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, 5, 10, 20, 30 et 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.

Les résultats ont montré une répartition spatiale des précipitations, avec Cotonou Aéroport couvrant l'ouest (Kouhounou, Cadjéhoun, Vodjè), Cotonou Port influençant le centre (Aïdjèdo, Gbété, 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 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, p47), 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.

Dans les zones inondables de Cotonou, les maladies hydriques courantes sont la diarrhée/ gastro-entérite, le paludisme et le choléra. Les zones inondables de Cotonou concentrent le plus de paludisme et diarrhées. Sur les cartes d'inondation, ce sont des zones allant de l'orange au rouge. Ces constats avaient été faits par Blalogoe C. P. (2014, p.120) et confirmés par AHOLOU M. G. M. & MONGBO R. L. (2020, p.50) et Ahouansè S. D. M., Agossou N. & Houssou S. (2020, p.408).

Les quartiers périphériques et marécageux (Mènontin, zones proches du lac Nokoué) montrent les plus fortes prévalences du paludisme. Dans ces zones, le risque de paludisme s'accroît de 6 fois par rapport aux zones non inondables ou qui le sont faiblement (Soton A., 1995, cité par Blalogoe C. P., 2014, p.125).

Les données hospitalières confirment que les diarrhées/gastro-entérites sont les affections hydriques les plus fréquentes en routine. Ces maladies ont une prévalence de 12 fois en zones inondables par rapport aux zones non inondables. On dénombre en moyenne 365 cas/an.

D'un autre côté, le choléra apparaît sous forme d'épidémies saisonnières, souvent après de fortes pluies. Plus de 1400 cas ont été signalés dans certains quartiers essentiellement inondables, avec une létalité de 1,4 % (Soton A., 1995, p40).

4.1.1. Conclusion

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 ville. En appliquant des méthodes statistiques rigoureuses, les inondations potentielles avec leurs corollaires de maladies hydriques peuvent être anticipées par l'évaluation de leur fréquence. Ainsi les décideurs politiques, à partir des cartes d'aléas élaborées, peuvent mieux prendre des décisions de planification urbaine, facilitant ainsi la mise en œuvre des 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 krigage 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 la 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 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 commune.

4.1.2. Références bibliographiques

- Agoïnon, N., Toffi, M. D., Orekan, V., Chibozo, H. C. F., Oyédé L. M. (2012). Erodibilité pluviale et gestion des terres agricoles dans le bassin inférieur du Zou (Bénin en Afrique de l'Ouest). *Revue de géographie de l'Université de Ouagadougou N°01 - décembre 2012*, pp55-71.
- AHOLOU, M. G. M., & MONGBO, R. L. (2020). Risques sanitaires liés au recours à la restauration hors domicile : perceptions et pratiques des acteurs sociaux à Cotonou. *Revue Espace, Territoires, Sociétés et Santé*, 3 (5), pp41-60 (<https://www.retssa-ci.com/pages/Numero5/AHOLOU/TAP-Tome-2.Retssa-Vol.3-N%c2%b05-Juin%202020.pdf>)
- Ahouansè, S. D. M., Agossou, N., & Houssou, S. (2020). Eau de consommation et maladies hydriques dans la commune de Lokossa au sud-ouest de la République du BENIN (Afrique de l'ouest). *European Scientific Journal May 2020 edition Vol.16, No.15 ISSN: 1857-7881 (Print) e - ISSN 1857-7431. Pp393-417.*
- Akaike, H. (1974). "A new look at the statistical model identification." *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716-723

- Alfieri L., Browning M., Salamon P. (2012). An integrated flood-risk mapping approach using engineering, GIS and multi-criteria decision analysis. *Natural Hazards*, 64(1), 897–923.
- 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.
- Assogba, L. P. (2010). Étude de l'influence du lac Nokoué et du chenal sur les inondations dans la ville de Cotonou au Bénin. Mémoire de Master, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 62p.
- Blalogoe C. P. (2014). Stratégies de lutte contre les inondations dans le grand Cotonou : Diagnostic et alternative pour une gestion durable. Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 264p.
- Cramér, H. (1946). *Mathematical Methods of Statistics*. Princeton University Press, 79p
- El Adlouni, S., & Ouarda, T. B. M. J. (2008). Comparaison des méthodes d'estimation des paramètres du modèle GEV non stationnaire. *Revue des Sciences de l'Eau*, 21(1), pp35–48.
- Gumbel, E. J. (1958). *Statistics of Extremes*. Columbia University Press, 110p
- Hosking, J. R. M., & Wallis, J. R. (1997). *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*. Cambridge University Press, ISBN : 978-0-521-43045-2, 224p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014). Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability (Part A: Global and sectoral aspects; Part B: Regional aspects). Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, ISBN : 978-1-107-05807-1, 1820p.
- Jha S. K., Blöschl G. (2011). Using remote sensing and GIS for flood hazard mapping: an updated review. *Hydrological Sciences Journal*, 56(7), 1007–1028.
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin, 88p

- Laborde, J.-P. (2009). *Éléments d'hydrologie de surface*. Éd. Université de Nice – Sophia Antipolis, Département Hydroinformatique et Ingénierie de l'Eau, 202p.
- L'Hôte, Y., Mahé, G., Somé, B., & Triboulet, J.-P. (2002). Analysis of recent rainfall conditions in West Africa. *Water Resources Management*, 16(4), pp327–344.
- Maidment, D. R. (Ed.). (1993). *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, ISBN : 0-07-039732-5 (relié) 978-0-07-039732-3, 1420p.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), pp245–259.
- Meylan, P., Favre, A.-C., & Musy, A. (2008). *Hydrologie fréquentielle : Une science prédictive*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Collection : Sciences et ingénierie de l'environnement, ISBN : 978-2-88074-734-6, 296p.
- 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*, 50-65
- Pearson, K. (1900). "On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling." *Philosophical Magazine*, 50(302), 157-175
- Perreault, L. et Bobée, B. (1992). *Statistical analysis of extreme hydrological events*.
- Schwarz, G. (1978). "Estimating the dimension of a model." *The Annals of Statistics*, 6(2), pp461-464.
- Smirnov, N. V. (1939). On the estimation of the discrepancy between empirical curves of distribution for two independent samples. *Bulletin of Moscow University, Series A: Mathematics and Mechanics*, 2, pp3–16.
- Smith K., Ward R. D., Tarolli P. (2016). *Flood risk mapping at different spatial scales: Challenges and prospects for urban applications*. *Journal of Flood Risk Management*, 9(4), 323–336.

Soton, A. (1995). Analyse des indicateurs de santé environnementale pour une prise de décision : étude de cas à Cotonou. Rapport interne, OMS, 49p.

Sylla, M. B., Giorgi, F., Coppola, E., & Mariotti, L. (2016). Uncertainties in daily rainfall over Africa: The role of different model configurations. *Climate Dynamics.* <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3315-2>, 100-113.

Tanguy M. (2012). *Cartographie du risque d'inondation en milieu urbain adaptée à la gestion de crise. Analyse préliminaire*

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. *Annals of Mathematical Statistics,* 11, 147-162.

Wilcoxon, F. (1945). Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics Bulletin,* 1(6), 80-83.