

CARTOGRAPHIE DES RISQUES D'INONDATION DANS LA VILLE DE ZUENOULA (CENTRE-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE)

Kouakou Charles KONAN¹, Amlando Marie-Paule Dominique KOUASSI², Kikoun Brice-Yves KOUAKOU³, Zamblé Armand TRA BI⁴

¹Enseignant-Chercheur, Université Alassane Ouattara - Côte d'Ivoire, UFR-CS, charlykouakou26@gmail.com,

²Mastérisant, Département de Géographie, Université Alassane Ouattara - Côte d'Ivoire, UFR-CS, amlandomariepaulekouassi@gmail.com

³Enseignant-Chercheur, Université Jean Lorougnon Guédé, Département de géographie, UFR-SSH, Côte d'Ivoire, kikoun2008@hotmail.fr

⁴Enseignant-Chercheur, Université Alassane Ouattara - Côte d'Ivoire, UFR-CS, zambtra@yahoo.fr

Résumé

Les inondations représentent l'un des risques les plus graves auxquels le monde est confronté. En Côte d'Ivoire, la topographie du terrain, l'intensité pluviométrique, la densité du réseau hydrographique, les types d'occupation du sol ainsi que la densité démographique figurent parmi les facteurs fréquemment identifiés comme déterminants dans l'occurrence des phénomènes d'inondation. Cette étude vise à identifier et de cartographier les zones à risque d'inondation à Zuénoula, au centre-ouest de la Côte d'Ivoire. Les données utilisées sont composées de données pluviométriques mensuelles de 1988 à 2024 issues de la base de données de la NASA, de l'image satellitaire SENTINEL 2A de 2024 et SRTM. La méthodologie à consister à réaliser des cartes d'aléa et de vulnérabilité à l'inondation par une analyse multicritère. La combinaison pondérée de ces deux indicateurs a permis de générer une carte de risque d'inondation de la ville de Zuénoula.

Les résultats montrent que 78 % de la ville de Zuénoula est exposé au risque élevé d'inondation. Les zones les plus exposées se trouvent en périphérie du fleuve Bandama rouge et sur de faible pente. Il s'agit notamment des quartiers tels que Dioulabougou, Sokoura, Ancien marché, Aviation, Ancienne gare, Liberté.

Mots clés : *Zuénoula, risque d'inondation, aléa, vulnérabilité, débordement des cours d'eau*

Flood risk mapping in the city of Zuenoula (Central-West of Ivory Coast)

Abstract

Flooding is one of the most serious risks facing the world. In Côte d'Ivoire, the topography of the land, rainfall intensity, the density of the hydrographic network, land use patterns, and population density are among the factors frequently identified as determinants in the occurrence of flooding. This study aims to identify and map flood-prone areas in Zuénoula, in central-western Côte d'Ivoire.

The data used consists of monthly rainfall data from 1988 to 2024 from the NASA database, the 2024 SENTINEL 2A satellite image, and SRTM. The methodology consists of producing flood hazard and vulnerability maps using a multi-criteria analysis. The weighted combination of these two indicators has made it possible to generate a flood risk map for the city of Zuénoula.

The results show that 78% of the city of Zuénoula is exposed to a high risk of flooding. The most exposed areas are located on the outskirts of the Red Bandama River and on gentle slopes. These include neighborhoods such as Dioulabougou, Sokoura, Ancien Marché, Aviation, Ancienne Gare, and Liberté.

Keywords: *Zuénoula, flood risk, hazard, vulnerability, river overflow*

Introduction

Les multiplications et l'intensification des crues et des inondations constituent aujourd'hui une problématique environnementale majeure (A. Faye et *al.*, 2019, p.8). À l'échelle du globe, les inondations sont considérées comme l'un des phénomènes naturels qui affectent le plus l'équilibre socio environnemental. En Afrique subsaharienne, elles affectent environ 171 millions de personnes (J. Rentschler et *al.*, 2020, p.1). Ces événements hydrométéorologiques mettent en péril les moyens de subsistance et accentuent la vulnérabilité des populations, tant dans les milieux urbains que ruraux. Les projections indiquent qu'en 2050, environ 2,5 milliards de personne pourraient être exposées à des crues dévastatrices, en raison de la pression démographique sur les zones inondables, les effets du changement climatique, de la montée du niveau des mers, ainsi que de la déforestation (F. Ramade, 2006, p.94).

Sur le plan hydrodynamique, les crues se produisent lorsque les cours d'eau débordent de leur lit mineur et envahissant leur lit majeur. Ce processus est particulièrement marqué dans les zones tropicales lors d'épisodes pluviométriques extrêmes. L'importance du ruissellement superficiel, principal facteur générateur de crues, est directement corrélée à l'intensité et à la durée des précipitations dans les zones aménagées (N. H. MELEDJE et *al.*, 2015, p.187).

En Côte d'Ivoire, l'analyse des événements météorologiques récents et leurs impacts montrent une fréquence et une augmentation des inondations, notamment celles dues aux crues de nombreux cours d'eau (CIMA Research Foundation, 2021, p.17). Ces inondations provoquent des dommages considérables, comme des pertes en vies humaines, destructions de cultures, des coupures de voies de communication, des destructions d'habitations et des rétentions d'eau à certains endroits des villes de la Côte d'Ivoire. Un exemple frappant est celui de la ville de Zuénoula, durement touchée en 2018 par de violentes pluies diluviennes ayant entraîné le débordement du fleuve Bandama, causant d'importants dégâts matériels et affectant de nombreuses familles (F. Kouamé, 2023, p.67). Les actions ont été menées par l'État en vue de réduire les risques d'inondations à travers les stratégies et les plans d'action telle que la

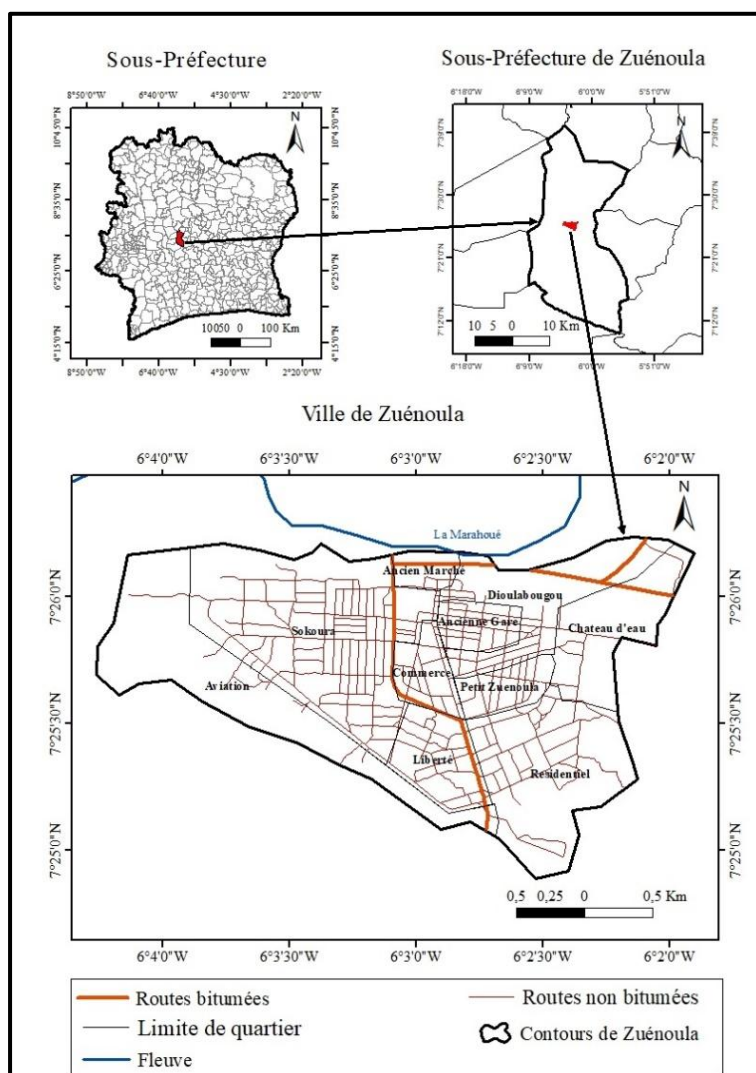
construction des infrastructures de drainage, la sensibilisation et la mise en place de plans d'action locaux. Malgré ces efforts, les problèmes d'inondations sont toujours constatés dans la ville de Zuénoula, révélant la nécessité d'une approche intégrée.

Dans ce contexte, cette étude vise à cartographier le risque d'inondation dans la ville de Zuénoula en vue de contribuer à sa prévention et à sa gestion efficace. De façon spécifique, il s'agira d'une part d'établir les cartes d'aléa et de vulnérabilité et d'autre part de générer une cartographie intégrée des zones à risque.

1. Matériel et méthodes

1.1. Présentation du site d'étude

La ville de Zuénoula est située dans le centre-ouest de la Côte d'Ivoire (figure 1). Le choix de la ville de Zuénoula comme zone d'étude est justifié par sa vulnérabilité aux inondations. En septembre 2018, la ville a été victime d'une inondation affectant près de 2400 personnes (F. Kouamé, 2023 p.67). Zuénoula renferme plus de 48 701 habitants (INS, 2021). Cette importante démographie engendre une expansion anarchique de l'habitat, souvent dans des zones inondables ce qui renforce la vulnérabilité des habitants. La figure 1 présente la zone d'étude.



Source : BNEDT, 2021

Figure 1 : Localisation de la ville de Zuénoula

Le climat de Zuénoula est tropical humide, caractérisé par des températures élevées et une forte pluviométrie. Les précipitations sont importantes surtout en saison des pluies, avec 1200 à 1500mm de pluie par an (K. C. KONAN, 2023, p.144). Les températures mensuelles quant à elles varient en moyenne entre 24°C (mois d'août) et 28°C (mois de mars) tout au long de l'année.

Zuénoula est traversée du Nord au Sud par le fleuve Marahoué, un affluent du Bandama (G. Girard et al., 1971, p. 115). Ce fleuve crée des zones marécageuses, des plaines inondables et favorise la présence de petites affluents et cours d'eau secondaire dans la zone d'étude. Le relief est aussi marqué par la présence du

fleuve Marahoué, offrant ainsi un paysage varié. Ainsi, la zone d'étude enregistre la présence de quelques dômes cristallins de faible altitude, généralement entre 200 et 300 mètres (J. M. Avenard, 1971, p. 28).

1.2. Données

Les données pluviométriques annuelles et mensuelles ont été téléchargées sur le site de la NASA via le lien <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. Ces données couvrent la période de 1988 à 2024. Elles ont servi à spatialiser l'intensité pluviométrique dans la zone d'étude afin d'établir le rapprochement aux inondations causés.

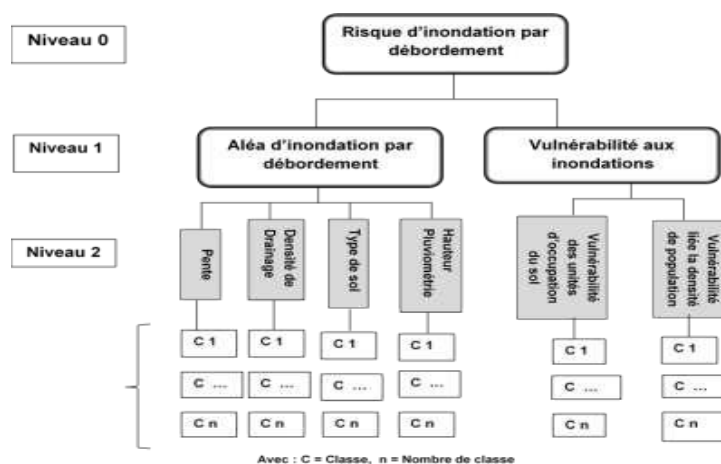
Les données statistiques sont nécessaires dans l'étude de la densité de la population, de connaître la limite des quartiers. Ces données ont été élaboré par l'Institut National de la Statistique (INS). Quant aux données images et cartographiques elle a été obtenue gratuitement par téléchargement des images satellitaires sur le site Earth Explorer qui sont issues de la National Aeronautic and Space Administration (NASA). Les images satellitaires utilisées sont SENTINEL 2A de 2024 et le modèle numérique de terrain (MNT) du capteur SRTM de 2021 de la zone d'étude.

1.3. Méthode d'analyse multicritère pour la cartographie des zones à risque d'inondation

L'objectif de cette étape est de créer des cartes thématiques qui permettent de décrire les zones à risque d'inondation dans la ville de Zuénoula en utilisant les SIG. Pour modéliser les indicateurs d'aléa, de vulnérabilité et de risque d'inondation la méthode d'analyse multicritère est utilisée (A. Kangah et *al.*, 2024, p. 94).

1.3.1. Identification et élaboration des critères de décisions

Le risque est exprimé par le produit d'un aléa et d'une vulnérabilité (H. K. Boyossoro et *al.*, p.121) : $\text{Risque} = \text{Aléa} * \text{Vulnérabilité}$ (figure 9).



Source : H. K. *Boyossoro* et al., p.121

Figure 2 : Hiérarchie des paramètres retenus pour le risque d'inondation par débordement

Pour l'évaluation du risque d'inondation, les facteurs utilisés pour la cartographie de l'aléa inondation dans cette étude sont les pentes, la densité de drainage et l'intensité pluviométrique. Concernant la détermination de la vulnérabilité à l'inondation, les variables nécessaires sont de plusieurs types. Il s'agit de l'occupation du sol et la densité de population. La carte du risque d'inondation par le débordement résulte de la combinaison par codification des cartes de vulnérabilité et de l'aléa.

1.3.2. Classification et pondération des critères

La classification des critères est une étape qui consiste à rendre les facteurs (qualitatif et quantitatif) comparables. À partir de la construction d'une matrice carrée, l'importance relative d'un facteur par rapport à un autre est évaluée, en utilisant pour cela, une échelle adéquate telle proposée par T. L. Saaty (1980, p. 19) (Tableau I).

Tableau I : Échelle de comparaison binaire

Degré d'importance numérique	Degré d'importance verbale
1	Égale importance
3	Un élément est plus important (sensible) que l'autre
5	Un élément est plus important (sensible) que l'autre
7	Un élément est beaucoup plus important (sensible) que l'autre
9	Un élément est absolument plus important (sensible) que l'autre
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines
1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9	Valeurs réciproques des appréciations précédentes

Source : T.L. Saaty, (1980, p 19)

Les matrices de comparaison par paire des critères d'aléa et de vulnérabilité, dont les valeurs sur la diagonale sont à 1, sont respectivement illustrées dans les tableaux 2 et 3. Chaque valeur par ligne est mise en comparaison avec chaque colonne pour déterminer la pertinence de chaque facteur dans le but d'obtenir une valeur.

Tableau II : Matrice de comparaison par paire des critères d'aléa

	HP	P	DD	S
HP	1	3	5	5
P	1/3	1	3	3
DD	1/5	1/3	1	3
S	1/5	1/3	1/3	1

Avec **HP** = Hauteur de pluie, **P** = Pente, **DD** = Densité de Drainage, **S** = Type de sol

Source : Kouamé, (2013, p. 30)

Tableau III : Matrice de comparaison par paire des critères de vulnérabilité (V)

	OS	DP
OS	1	3
DP	1/3	1

Avec **OS** = Occupation du Sol, **DP** = Densité de Population

Source : Kouamé, (2013, p. 34)

Après avoir complété la matrice de comparaison, la valeur propre associée à chaque élément ainsi que le vecteur propre qui s'y rattache ont été déterminés. Le coefficient de pondération (Cp) ou le vecteur propre (Vp) détermine la hiérarchie des facteurs analysés. Les équations 1 et 2 sont utilisées pour calculer ces paramètres. Ces éléments sont essentiels pour estimer la probabilité et serviront à déterminer la valeur relative de chaque élément contribuant à l'inondation.

$$Vp = KW1 \times \dots \times Wk$$

k = nombre de paramètres comparé et W_k = principales notes attribuées aux paramètres

$$Cp = \frac{Vp}{Vp1 + \dots + Vpk}$$

La somme des Cp de tous les paramètres d'une matrice doit être égale à 1. Cette étape a été suivie par le calcul de λ_{max} , Ic (indice de cohérence) et Rc (Ratio de cohérence). Les valeurs calculées des λ_{max} , Ic et Rc pour les facteurs d'aléa sont consignés respectivement dans le tableau 8.

Lorsque Rc < 10 %, cela montre que les jugements des experts sont cohérents. Le Rc calculé est de 0,073 = 7,3 % (< 10 %) pour les facteurs d'aléa et de 0 pour les facteurs de vulnérabilité (Tableau IV). Par conséquent, les jugements pour ces deux types de facteurs sont qualifiés de cohérents.

Tableau IV : Matrice de pondération des facteurs d'aléa

	HP	P	DD	S		V _p	C _p (poids)
HP	1	3	5	5		2,94	0,55
P	1/3	1	3	3		1,32	0,25
DD	1/5	1/3	1	3		0,67	0,13
S	1/5	1/3	1/3	1		0,39	0,07
Σ	1,73	4,66	9,33	12		5.31	1
K = 4		Ia = 0,90					
λ _{max} = 4,197				Ic = 0,065			Rc = 0,073

Source : Kouamé, (2013, p. 34)

La somme de tous les Cp de chaque paramètre dans une matrice doit être égale à 1. L'étape suivante a consisté à calculer λ_{max}, Ic (indice de cohérence) et Rc (Ratio de cohérence). Le tableau V présente respectivement les valeurs calculées de λ_{max}, Ic et Rc pour les facteurs de vulnérabilités.

Tableau V : Matrice de pondération des facteurs de vulnérabilité

	OS	DP		V _p	C _p (poids)
OS	1	3		1.73	0.5
DP	1/3	1		0.58	0.5
Σ	1.33	4		2.31	1
K = 2		Ia = 0			
λ _{max} = 2.00				Ic = 0	Rc = 0

Source : Kouamé, (2013, p. 34)

La formule de Voogd H (1983, p. 255), qui représente la combinaison linéaire des couches thématiques avec leurs poids correspondants, est employée pour obtenir la fonction « d'aléa inondation par débordement » ainsi que la vulnérabilité. L'équation est comme suit :

$$I = \sum_{j=1}^n w_j w_{ij}$$

Avec I : l'indice lié à l'indicateur, W_j : le poids du paramètre j, w_{ij} : le poids de la classe i dans le paramètre j et n : le nombre de paramètres. Par conséquent, la fonction « d'aléa inondation par débordement » est exprimée selon l'équation suivante :

AID (Aléa Inondation par Débordement) = (0,55 x Intensité pluviométrique + 0,25 x Pente + 0,13 x Densité de drainage + 0,07 x types de sol).

En ce qui concerne la vulnérabilité, elle est donnée par l'équation suivante : **V = (0,5 x Occupation du Sol + 0,5 x Densité de Population)**. En outre, il faut noter que pour chaque facteur ou critère, il peut être défini une ou plusieurs classes. Pour cette étude, le nombre de classe défini est 5. Ce nombre a été défini en s'appuyant sur les travaux antérieurs, M. B. Saley (2003, p.211), V. H. N'guessan Bi (2014, p.228) et H. K. Boyossoro et al., p.122. Les poids attribués aux

différentes classes des critères d'aléa sont consignés respectivement dans le tableau VI.

Tableau VI : Classes des critères d'aléa et leur poids

Indicateur	Critères	Qualificatifs des critères	Classes	Codes de sensibilité	Poids (Cp)
Aléa d'inondation par débordement	Pente (P) en %	Très faible	0 - 3	9	0,25
		Faible	3 – 6	7	
		Moyen	6 – 9	5	
		Forte	9 – 12	3	
		Très forte	12 - 19	1	
	Hauteur Pluviométrique (HP)	Très faible	1436.55 - 1436.6	1	0,55
		Faible	1436.61 – 1436.65	3	
		Moyen	1436.66 – 1436.71	5	
		Forte	1436.72 – 1436.76	7	
		Très forte	1436.77 – 1436.82	9	
	Type de sol (S)	Faible	Sol hydromorphe à gley et pseudo gley	1	0,07
		Très forte	Sol remanié induré	5	
	Densité de drainage (DD) (km/km ²)	Très faible	0.27 - 0.58	1	0,13
		Faible	0.59 - 0.9	3	
		Moyen	0.91 - 1.22	5	
		Forte	1.23 -1.54	7	
		Très forte	1.55 – 1.86	9	

Source : H. K. *Boyassoro et al.*, p.122

Les poids attribués aux différentes classes des critères de vulnérabilité sont consignés respectivement dans le tableau VII.

Tableau VII : Classes des critères de vulnérabilité et leur poids

Indicateur	Critères	Qualificatifs des critères	Classes	Code de vulnérabilité	Poids (Cp)
Vulnérabilité	Occupation du sol	Très faible	Eau	0	0,5
		Faible	Végétation	1	
		Moyen	Sol nu	1	
		Fort	Culture et jachère	5	
		Très fort	Habitats	9	
	Densité de population	Très faible	1 - 34	1	0,5
		Faible	35 - 56	3	
		Moyen	57 - 67	5	
		Forte	68 - 175	7	
		Très fort	176 - 367	9	

Source : H. K. *Boyassoro et al.*, p.123

L'établissement de la spatialisé du Risque d'Inondation par Débordement (RID) a été réalisé en recourant à la méthode de combinaison linéaire, aussi appelée WLC method Voogd, H. (1983, p 255). Cette technique représente la

combinaison linéaire des strates thématiques avec leurs poids correspondants conformément à l'équation ci-dessous : RID se calcule comme suit:

RID = AID + V = ((0,55xIntensité pluviométrique + 0,25xPente + 0,13xDensité de drainage + 0,07xtypes de sol) + (0,5xOccupation du Sol + 0,5xDensité de Population)). Avec : RID = Risque d'Inondation par Débordement ; AID = Aléa Inondation par Débordement ; V = Vulnérabilité.

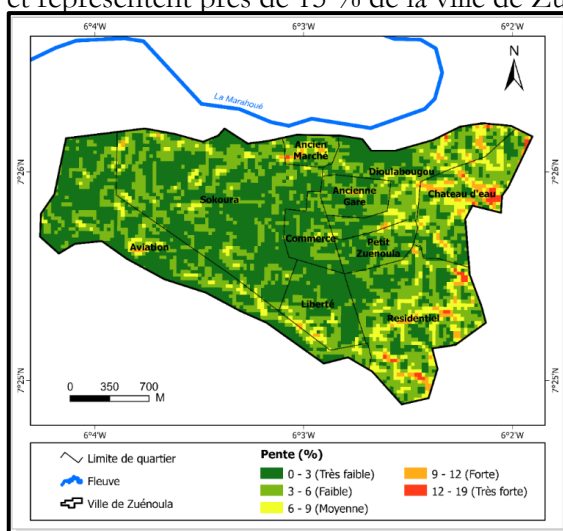
Toutes les couches ou cartes thématiques mentionnées ont été mises dans le même système de projection (UTM WGS 84) afin d'être intégrées dans le SIG ArcGIS utilisant le module Spatial Analyst.

2. Résultats

2.1. Aléa d'inondation et facteur hydrodynamiques dans la commune de Zouénoula

2.1.1. Facteurs d'aléas générateurs des crues et d'inondation

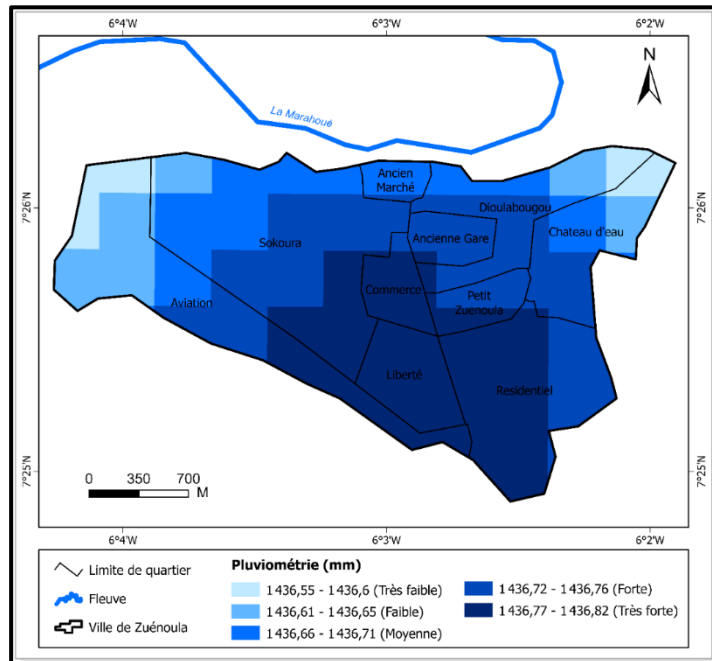
Les facteurs d'aléa pris en compte dans cette étude sont la pente, l'intensité des précipitations, la densité de drainage et les types de sol. La figure 3 ci-dessous présente la carte des pentes. Dans la ville de Zouénoula, les pentes varient de 0 à plus de 19 %. En effet, les pentes très faibles à faibles (inférieures à 6 %) couvrent environ 32 % de la zone d'étude. Ces faibles inclinaisons favorisent fortement la stagnation des eaux, ce qui augmente le risque d'inondation. En revanche, les pentes moyennes à fortes se situent principalement dans la partie sud de la zone d'étude, où l'altitude varie entre 215 et 242 mètres. Ces zones, notamment les quartiers comme Château d'eau et Résidentiel, sont plus favorables au ruissellement et représentent près de 15 % de la ville de Zouénoula.



Source : MNT-STRM, 2014

Figure 3 : Pentes de la ville de Zouénoula

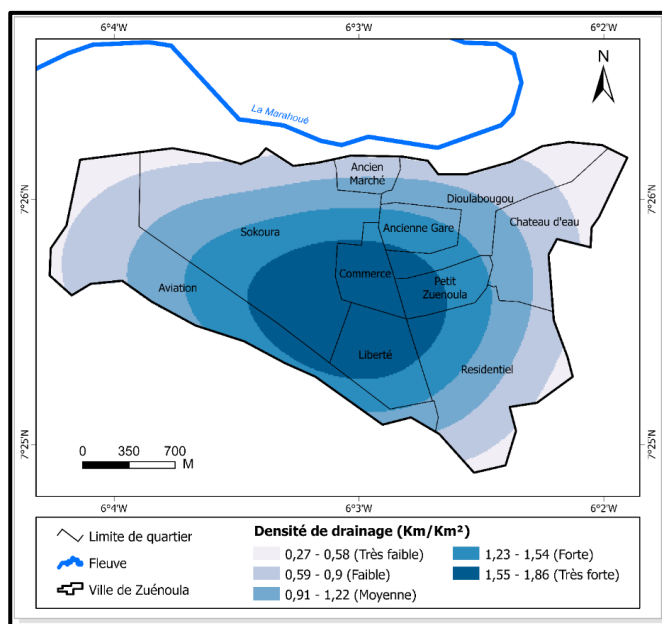
La carte des isohyètes (figure 4) montre l'intensité des précipitations sur l'ensemble de la zone d'étude. Elle révèle que la plus grande partie de la ville est exposée à une forte pluviométrie, avec des cumuls annuels supérieurs à 1436,55 mm. Cette répartition suit un gradient croissant du nord vers le sud. Les quartiers situés au sud de la ville, tels qu'Aviation, Liberté, Résidentiel, Commerce et Sokoura, enregistrent les niveaux de précipitations les plus élevés, atteignant ou dépassant 1436,82 mm. Cette forte intensité pluviométrique accroît le risque d'inondations dans la zone d'étude.



Source : SODEXAM, 2024

Figure 4 : Intensité pluviométriques

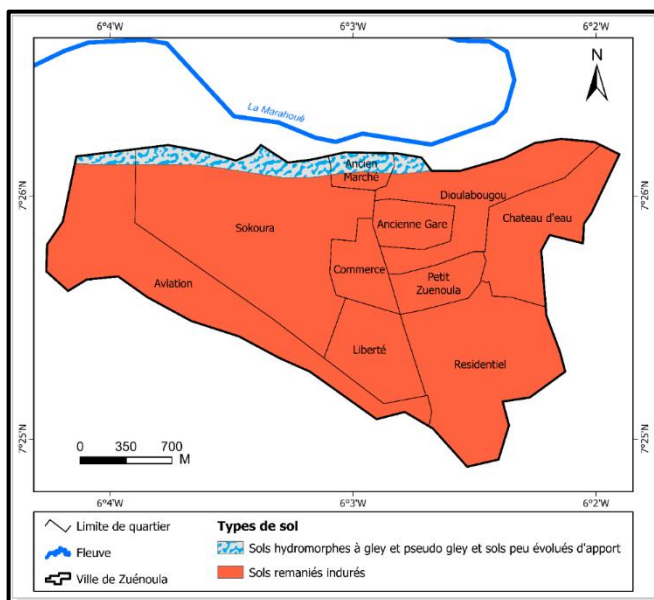
La densité de drainage oscille entre 0 et 1,86 km/km², avec une répartition spatiale qui présente de fortes similitudes avec celle observée sur la carte des pentes. Les valeurs les plus élevées de densité de drainage (supérieures à 1,54 km/km²) sont principalement localisées au centre de la zone d'étude, ainsi qu'en partie dans la zone sud. Cette concentration s'explique par la présence d'un bas-fond situé dans la partie sud de Zuénoula, qui favorise l'écoulement et la concentration des réseaux de drainage naturels. Ces zones à forte densité indiquent une susceptibilité accrue au ruissellement et à la formation de crues localisées.



Source : MNT-SRTM, 2014

Figure 5 : Densité de drainage

L'analyse de la figure 6 met en évidence la présence de plusieurs types de sols répartis selon les caractéristiques géologiques, climatiques et hydriques locales.



Source : IRD, 1979

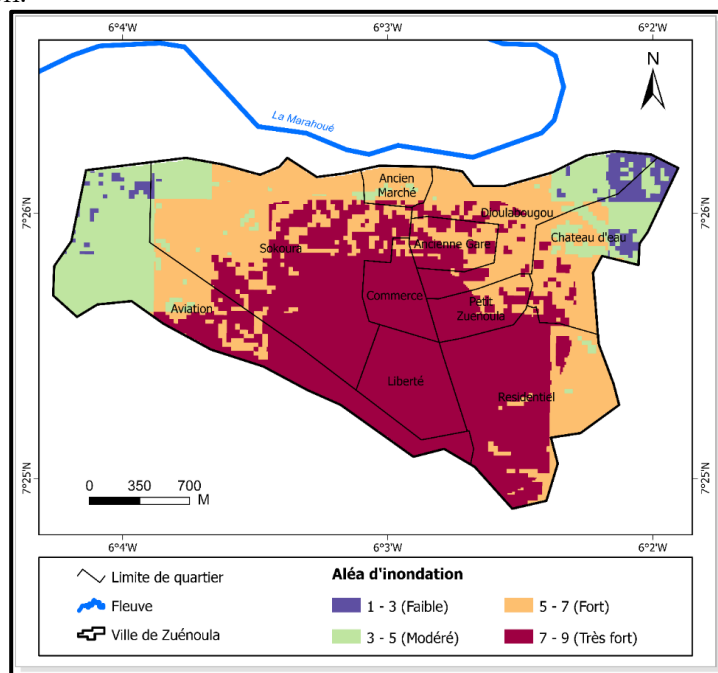
Figure 6 : Type de sol de la ville de Zuenoula

Les sols de la ville de Zuenoula sont de type ferralitique faiblement dessaturé à densité élevée et généralement issus d'une roche mère granitique. Ainsi, les sols

tropicaux essentiellement remaniés et indurés couvrent plus 90 % de la zone d'étude. Ils résultent de la transformation de matériaux anciens sous l'effet du climat tropical, avec des phases de remaniement (déplacement ou réorganisation des horizons du sol) et une tendance à l'induration (durcissement). Concernant les sols hydromorphes à gley et pseudo-gley, ils se retrouvent aux abords du fleuve Bandama, mal drainées ou périodiquement inondées. Ils se caractérisent par une saturation en eau prolongée, ce qui entraîne une mauvaise aération et une réduction des éléments ferreux, donnant une coloration gris-bleutée typique (gley) ou tachetée (pseudo-gley).

2.1.2. Cartographie de l'aléa d'inondation

La carte d'aléa d'inondation (figure 7) de la ville de Zuénoula révèle une répartition spatiale des niveaux de risque suivant une orientation allant du Nord-Est et du Nord-Ouest vers le Sud. En effet, Le faible degré d'aléa concerne seulement 3 % de la zone étudiée. Il est localisé dans les quartiers d'Aviation, Dioulabougou et Château d'eau, qui sont relativement moins exposés aux phénomènes d'inondation.



Source : Nos traitement, 2025

Figure 7 : Aléa d'inondation

Le degré modéré d'aléa couvre 16 % de la zone d'étude. Il touche principalement les quartiers Sokoura, Aviation, Château d'eau, Dioulabougou et Ancien marché. Ces quartiers présentent un risque moyen, avec une possibilité d'inondation lors de fortes précipitations. Enfin, le fort au très fort degré d'aléa s'étend sur 81 % du territoire communal, affectant les quartiers Dioulabougou, Château d'eau,

Ancien marché, ainsi qu'une grande partie de Sokoura, Aviation, Liberté, Résidentiel, Ancienne gare, Petit Zuénoula et Commerce. Cette forte exposition est principalement due à la présence de bas-fonds, qui favorisent la stagnation des eaux en saison de pluies abondantes, augmentant ainsi le risque d'inondations. Cette situation met en évidence la nécessité d'une gestion appropriée du drainage urbain et d'un aménagement du territoire tenant compte des contraintes naturelles. Le tableau 8 nous montre la proportion du niveau d'aléa d'inondation.

Tableau VIII : Répartition du niveau d'aléa d'inondation

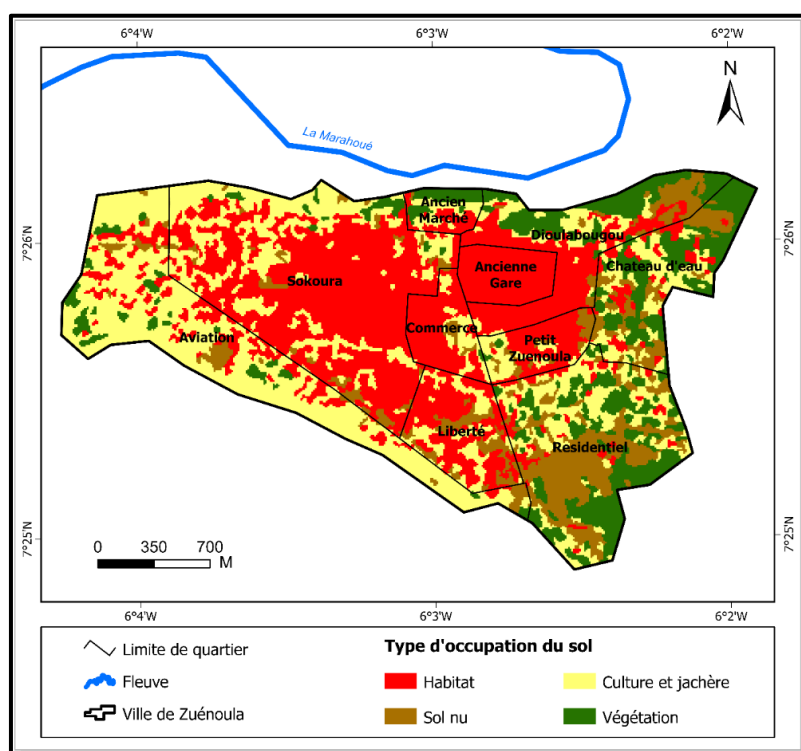
	Classes	Pourcentage
Aléa d'inondation	Faible	3 %
	Modérée	16%
	Fort	33%
	Très fort	48%

Source: Nos traitements, 2025

2.2. Vulnérabilité à l'inondation et paramètres hydrodynamiques dans la commune de Zouénoula

2.2.1. Facteurs de vulnérabilité à l'inondation

Les facteurs de vulnérabilité pris en compte dans cette étude sont l'occupation du sol et la densité de population. En ce qui concerne la vulnérabilité liée à l'occupation du sol, celle-ci a été choisie selon les critères de l'échelle de Saaty. Il en ressort que la classe "habitats", qui regroupe les infrastructures socioéconomiques telles que les résidences, bureaux, écoles, hôpitaux et routes représente 39 % de la superficie de Zuénoula. En plus, les cultures et jachères, localisée dans les plaines inondables occupent 33 % de la zone d'étude. Ce type d'occupation du sol présente une vulnérabilité élevée, du fait de son exposition directe aux aléas hydriques. Aussi, les sols nus et la végétation couvrent respectivement 13 et 15 % de la ville de Zuénoula. La végétation composée principalement de plantations agricoles (anacardiens, pâturages, cacaoyères, etc.), présente une vulnérabilité faible, en raison de la moindre valeur stratégique ou humaine directement exposée. La figure 8 présente l'occupation du sol de la ville de Zuénoula.



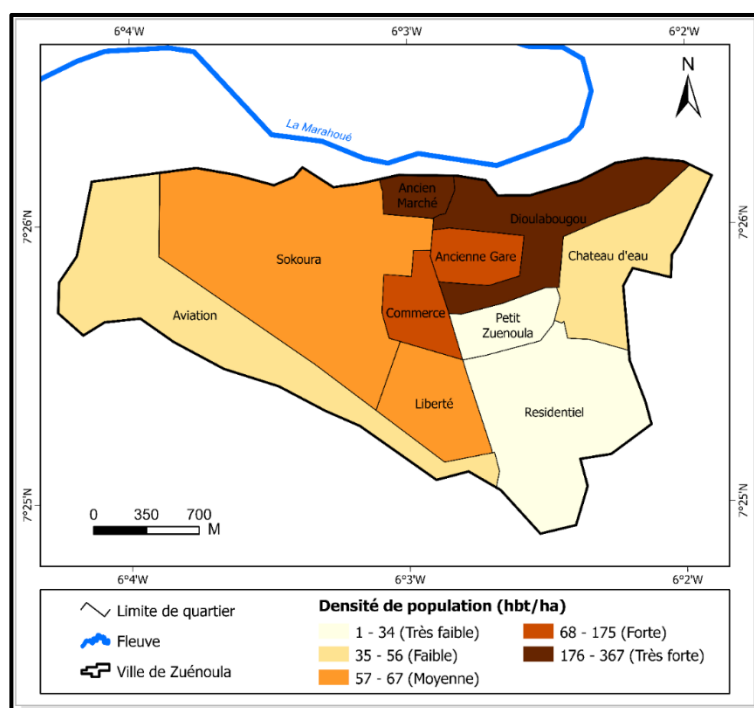
Source : Sentinel 2A, 2024

Figure 8 : Occupation du sol en 2024

La densité de population (D_p) dans la ville de Zuénoula varie entre 1 et 367 habitants par kilomètre carré (hab./km²) (figure 9). Elle a été classée en cinq catégories correspondant à différents niveaux de vulnérabilité :

- De 1 à 34 hab./km² : très faible vulnérabilité
- De 35 à 56 hab./km² : faible vulnérabilité
- De 57 à 67 hab./km² : vulnérabilité moyenne
- De 68 à 175 hab./km² : forte vulnérabilité
- De 176 à 367 hab./km² : très forte vulnérabilité

La très faible vulnérabilité est observée dans les quartiers Résidentiel et Petit Zuénoula, où la densité de population est très faible. Les niveaux de faible et moyenne vulnérabilité sont localisés dans les quartiers Aviation, Sokoura et Château d'eau, qui présentent des densités modérées. En revanche, la forte vulnérabilité est retrouvée dans les quartiers Commerce, Ancienne gare, Ancien marché et Dioulabougou, où la densité dépasse les 67 hab./km², traduisant une concentration humaine plus importante et donc une exposition plus marquée en cas d'aléa. La figure 9 présente la densité de population de la ville de Zuénoula.



Source : Mairie de Zuénoula, 2025

Figure 9 : Densité de population

2.2.2. Cartographie de la vulnérabilité à l'inondation de la ville de Zuénoula

La figure 10 montre quatre niveaux de vulnérabilité à l'inondation, allant de la très faible à la très forte vulnérabilité. La répartition spatiale montre que les zones à vulnérabilité faible à modérée couvrent une grande partie de la ville de Zuénoula, représentant environ 59 % de la zone d'étude. Ces zones se situent principalement en périphérie du centre urbain de Zuénoula, notamment dans les quartiers Aviation (à l'Ouest), Petit Zuénoula, Château d'eau, Résidentiel (à l'Est), ainsi qu'en partie dans les quartiers situés au nord, tels que Sokoura, Dioulabougou et Ancien marché. Ces zones présentent des conditions d'occupation du sol et de densité de population modérées, ce qui limite leur niveau de vulnérabilité face aux aléas.

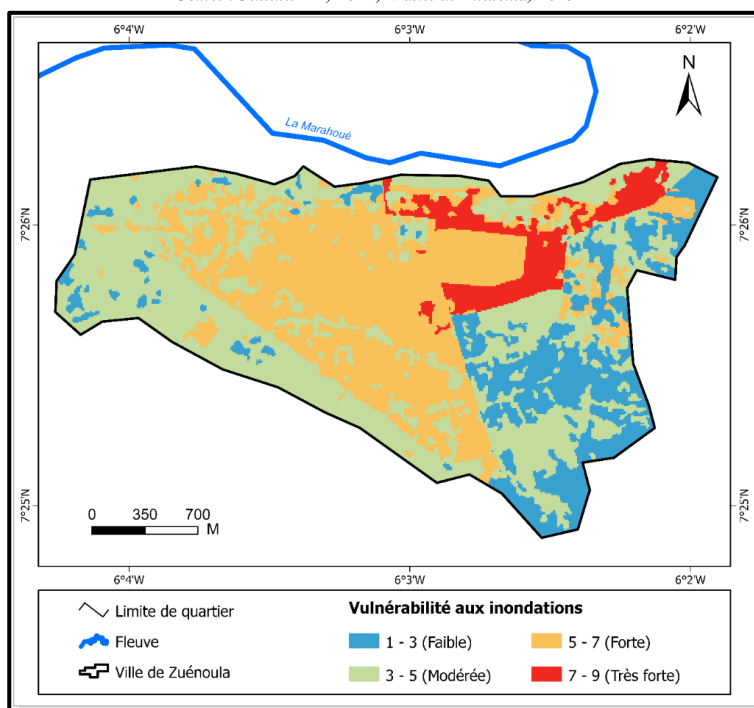
En revanche, les zones à forte et très forte vulnérabilité concernent une partie importante de la ville, soit environ 41% de la zone étudiée. Ce niveau de vulnérabilité se localise dans les quartiers Dioulabougou, Ancien marché, Commerce, Ancienne gare, Sokoura, Liberté, ainsi qu'une partie des quartiers Aviation et Château d'eau. Ces quartiers se distinguent par une forte densité de population et une intense activité socioéconomique, notamment dans les domaines primaires (agriculture, cultures de bas-fond) et tertiaires (commerce, services). De plus, ces quartiers possèdent des caractéristiques urbaines plus développées, avec des infrastructures plus denses et une

concentration importante de biens exposés. Un autre facteur aggravant est la pente généralement faible (inférieure à 6 %) des terrains dans ces zones, ce qui limite l'écoulement naturel des eaux de pluie et accroît les risques d'inondation, surtout en cas de fortes précipitations. Cette combinaison de facteurs (densité humaine, occupation du sol, topographie) explique le niveau élevé de vulnérabilité observé dans ces quartiers. Le tableau IX montre la proportion du niveau de vulnérabilité aux inondations.

Tableau IX : Répartition du niveau de la vulnérabilité aux inondations

	Classes	Pourcentages
Vulnérabilité aux inondations	Faible	17%
	Modérée	42%
	Fort	34%
	Très fort	7%

Source : Sentinel 2A, 2024, Mairie de Zuénoula, 2025



Source : Nos traitements, 2025

Figure 10 : Vulnérabilité aux inondations

2.3. Risque d'inondation dans la ville de Zuénoula

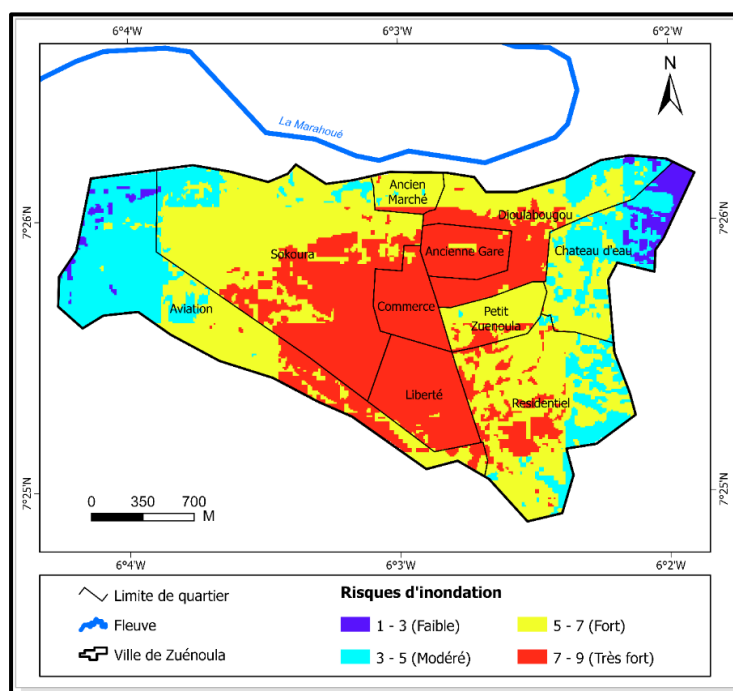
La carte de risque d'inondation par débordement (figure 11) met en évidence quatre niveaux de risque, allant du faible au très fort. Les zones à risque faible à modéré ne couvrent que 22 % de la ville de Zuénoula. Ces zones se localisent principalement dans les quartiers Château d'eau et une partie du quartier Aviation. Elles se caractérisent par une pluviométrie relativement

faible, une topographie en pente marquée, et une faible vulnérabilité socioéconomique, ce qui limite leur exposition aux inondations par débordement. En revanche, les zones à risque fort et très fort couvrent une grande partie de la ville, avec des proportions estimées à 34 % et 44 % respectivement, totalisant environ 78 % de la surface urbaine. Ces zones concernent principalement les quartiers Aviation, Dioulabougou, Commerce, Petit Zuénoula, Ancien marché, Ancienne gare et Liberté. Ces zones présentent plusieurs facteurs aggravants : une pluviométrie élevée, une pente du terrain généralement faible, une forte densité de drainage (présence de rivières ou cours d'eau), ainsi qu'une vulnérabilité socioéconomique élevée, en raison de la forte concentration d'activités et de populations. Le tableau X montre la répartition des différents niveaux de risque d'inondation.

Tableau X : Répartition du niveau de risque d'inondation

	Classes	Pourcentage
Risque d'inondation	Faible	2%
	Modérée	20%
	Fort	44%
	Très fort	34%

Source : Nos traitements, 2025



Source : Nos traitements, 2025

Figure 11 : Niveau de risque d'inondation à Zuénoula

Certains quartiers comme Dioulabougou, Aviation, Ancien marché, Sokoura et Ancienne gare sont particulièrement vulnérable du risque d'inondation, car ils ont déjà été touchés par des débordements du fleuve Bandama (Marahoué) au cours des dernières décennies. L'événements les plus marquants reste celui de septembre 2018, qui a provoqué d'importants dégâts socioéconomiques dans ces zones, laissant des traces visibles de l'impact des inondations, aussi bien sur les infrastructures que sur les populations

En effet, en Septembre 2018, des pluies diluviennes se sont abattu sur la ville de Zuénoula entraînant la crue du fleuve Bandama situé à proximité de la ville, provoquant des inondations historiques. Le niveau d'eau atteignant au moins 2 mètres submergeant certains quartiers de la ville (Photo 1 et 2).



Prise de vue : Croix Rouge, Septembre 2018 (Lat. 7°25'N ; Long 6°2'W)

Photo 1 : Inondations observé en septembre 2018 (Dioulabougou)



Prise de vue : Croix Rouge, septembre 2018 (Lat. 7°25'N ; Long 6°2'W)

Photo 2 : Inondation observé en septembre 2018 (Aviation)

3. Discussion

Cette étude sur la dynamique hydrologique et les inondations dans la ville de Zuénoula s'appuie sur une approche intégrée combinant les facteurs d'aléa et de vulnérabilité. La densité de population, les types d'occupation du sol et les données climatiques, ont été analysés dans un Système d'Information Géographique (SIG) à l'aide de la méthode multicritère de Saaty. Cette méthode d'aide à la décision, largement utilisée dans la littérature (V. H. N'guessan Bi, 2014, p.228, H. K. Boyossoro et *al.*, 2023 p.122, K. M. Kouamé, 2023, p.34), a notamment servi pour l'analyse des risques d'inondation dans les villes de Sinfra, Abidjan et Soubré. Les résultats indiquent qu'environ 76 % de la ville de Zuénoula est exposée à un risque élevé d'inondation. Ce risque se concentre principalement dans les quartiers de Dioulabougou, Aviation, Sokoura, Ancien Marché, Ancienne Gare, Liberté, Commerce et Petit Zuénoula. Les facteurs d'aléa considérés à savoir les précipitations, la pente, la densité de drainage et les types de sol sont en accord avec ceux utilisés par J. H. Danumah et *al.* (2016, p. 178) et B. H. Kouadio (2023, p 125) dans leurs études sur Abidjan et la région semi-montagneuse de Man. Les données de pente et de drainage ont été extraites à partir du modèle numérique de terrain (MNT). L'utilisation de données Lidar, plus précises et à haute résolution, permettrait une cartographie plus fine de l'aléa. Les données de précipitations utilisées proviennent de la base des données issues de la National Aeronautic and Space Administration (NASA). Ces données continues sur une grille régulière, offrent une meilleure spatialisation des précipitations, essentielle pour le suivi et la gestion des inondations. L'interpolation des précipitations a été réalisée avec la méthode IDW (Inverse Distance Weighting). Bien que rapide et exacte (M. Arnaud et *al.*, 2000, p 221), cette méthode présente l'inconvénient de produire des interpolations autour des points d'observation.

En ce qui concerne les sols, les données utilisées datent de 1971, en raison de l'indisponibilité de cartes actualisées, ce qui constitue une limite en termes de précision. Pour ce qui est de la vulnérabilité, deux critères ont été pris en compte : l'occupation du sol et la densité de population. Ces indicateurs ont été utilisés par L. Konaté (2007, p.33) et K. D. Kouassi (2019, p.113) pour cartographier respectivement le niveau de vulnérabilité à l'inondation de Cocody et à Abobo. Pour cartographier l'occupation du sol, la méthode du maximum de vraisemblance a été utilisée. Elle est reconnue pour sa fiabilité et est l'une des plus couramment appliquées (F. Bonn et *al.*, 1992, p. 485). Toutefois, selon V. H. N'Guessan Bi (2013, p. 23-41), l'usage des modèles de Markov offre un avantage supplémentaire, en tenant compte des relations de voisinage entre les pixels dans la classification.

Conclusion

L'étude des risques d'inondations dans la ville de Zuénoula met en lumière l'urgence de comprendre et de gérer ce phénomène naturel récurrent. L'analyse

multicritère des données des images de Modèle Numérique de Terrain, les image satellitaire sentinel 2A et les données sociodémographiques a permis de cartographier les zones à risque d'inondation. Les résultats montrent que dans la ville de Zuénoula, les zones à risque d'inondation et les zones inondées se trouve en périphérie du fleuve et les zones situées dans les zones basses (basfond) lors des fortes pluies intenses en amont du fleuve Bandama provoqué par le débordement. La cartographie des zones inondées et des zones à risque révèle que les quartiers proches des cours d'eau, tels que Dioulabougou, Sokoura, Ancien marché, Aviation, Ancienne gare, Liberté sont susceptibles d'être submergés.

Références bibliographiques

- ARNAUD Michel, EMERY Xavier, 2000, *Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatistiques*, Hermès, 221p.
- AVENARD Jean Michel, 1971, Aspect de la géomorphologie in « le milieu naturel de la Côte d'Ivoire », ORSTOM, 401p.
- BONN Ferdinand et Rochon Guy, 1992, Précis de télédétection volume 1 : Principes et méthodes. Sainte- Foy: Presse de l'université du Québec/AUPELF, 485 p.
- CIMA Research Foundation, 2018, *Profil de Risque de Catastrophe en Côte d'Ivoire*, 24p
- DANUMAH Jean Henry, ODAI Samuel Nii, SALEY Mohamed Bachir, SZARZYNSKI Jan, THIEL Michael, KWAKU Agyemang, KOUAMÉ Kouadio Félix et AKPA Yao Lucien, 2016, *Flood risk assessment and mapping in Abidjan district using multi-criteria analysis (AHP) model and geoinformation techniques*, (Côte d'ivoire), *Geoenvironmental Disasters* 3 : 10, DOI 10.1186 /s40677-016-0044-y.
- FAYE Adama, LEJEUNE Quentin, SYLLA Mouhamadou Bamba, NEYA Oblé, THEOKRITOFF Emily, D'HAEN Sarah, 2019, *Points clés pour l'Afrique de l'Ouest du rapport spécial du GIEC sur le changement climatique et les terres*. 21p
- KANGHA Armand et ANDRE Alla Della 2015, Détermination des zones à risque d'inondation à partir du modèle numérique de terrain (MNT) et du système d'information géographique (SIG) : Cas du bassin-versant de Bonoumin-Palmeraie (commune de Cocody, Côte d'Ivoire.) *Geo-Eco Trop.*, p. 298.
- KONAN Kouakou Charles, 2023, *Étude du changement de l'occupation du sol dans le bassin versant du Bandama et son impact sur les écoulements de surface*, Thèse de doctorat, Université Alassane Ouattara, 365p.
- Konaté Lassina, 2007, *Apport de la télédétection, d'un Système d'Informations Géographiques (SIG) et d'une modélisation hydrologique à l'étude de la vulnérabilité à l'inondation : cas de la commune de Cocody (Sud de la Côte d'Ivoire)*. DEA Sciences de la terre option hydrogéologie, Université de Cocody, 75p.
- KOUADIO Boyossoro Hélène, Oularé Sékouba, Boka Kouakou Charles, Miessan Adja Germain and Biemi Jean, 2023, « Cartographie des zones à risque

d'inondation par débordement des cours d'eau dans la région semi-montagneuse de man : approche par télédétection et analyse multicritère », *Int. J. Adv. Res.* 11(08), pp. 116-134.

KOUAME Koffi Moïse, 2013, *Etude et prévention des risques d'inondation en milieu urbain par Télédétection et Système d'information géographique (SIG) : cas de la commune de Cocody-Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire)*, DEA d'hydrogéologie, Université de Cocody, 71p.

Kouassi Kan Désiré, 2019, *Apport de la télédétection et des systèmes d'information géographique à la prévention et à la prévision du risque d'inondation dans la commune d'abobo (abidjan, côte d'ivoire)*, Thèse de doctorat, université Félix Houphouët Boigny, 161p.

MELEDJE N'diaye Hermann, KOUASSI Kouakou. Lazare, N'GOH Yao Alexis, SAVANE Issiaka, 2015, Caractérisation des occurrences de sécheresse dans le bassin hydrologique de la Bia transfrontalier entre la Côte d'Ivoire et le Ghana : contribution des chaînes de Markov. *Cah Agric* vol. 24 no 3, pp186-197

N'GUESSAN Bi Vami. Hermann., SALEY Mohamed Bachir., WADE Souleve; DJAGOUA Éric Valère, KOUAKOU Fidèle Constant et KOUADIO Affian, 2014, Cartographie du risque d'inondation par une approche couplée de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques (SIG) dans le département de Sinfra (centre-ouest de la cote d'ivoire), *European Scientific journal*, vol.10, No.2 ISSN :1857-7881(Print) e – ISSN 1857-7431, pp 170-191.

RAMADE François, 2006, *Des catastrophes naturelles ?* Dunod, UniverSciences, Paris, 2006, 258 p.

RENTSCHLER Jun, SALHAB Melda, 2020, *People in Harm's Way Flood Exposure and Poverty in 189 Countries*, 26p.

SAATY Thomas, 1980, *The Analytic Hierachy Process : Planning, Priority, Setting, Ressources Allocaton.* *Mcgraw-Hill*, New York, p 19.