

Cartographie des vulnérabilités aux risques d'inondation dans la ville d'Issia (centre-ouest de la Côte d'Ivoire)

Flood risk vulnerability mapping in the city of Issia (west-central Côte d'Ivoire)

TRAORE Kinakpefan Michel

Enseignant chercheur

Département de Géographie

Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa

Equipe de Recherche Espace-Système et Prospective (ERESP)

Côte d'Ivoire

TAMBOURA Awa Timité

Enseignant chercheur

Département de Géographie

Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa

Groupe de Recherche Espace, Territoires, Sociétés, Santé (GRETSSA)

Côte d'Ivoire

Date de soumission : 14/05/2024

Date d'acceptation : 03/06/2024

Pour citer cet article :

TRAORE K. M. & TAMBOURA A. T. (2024) «Cartographie des vulnérabilités aux risques d'inondation dans la ville d'Issia (centre-ouest de la Côte d'Ivoire)», Revue Internationale du Chercheur «Volume 5 : Numéro 2» pp : 855 - 878

Résumé

Les villes secondaires ivoiriennes comme Issia, sont enclines à une expansion urbaine incontrôlée et à une mauvaise occupation de l'espace en lien avec une croissance démographique soutenue. Cette urbanisation mal maîtrisée est facteur de vulnérabilité aux aléas hydroclimatiques comme les inondations susceptibles d'exacerbation dans un contexte d'incertitudes climatiques et de changements globaux. L'étude hiérarchise les niveaux de vulnérabilité aux risques d'inondation dans la ville d'Issia, situé au centre-ouest de la Côte d'Ivoire. L'approche cartographique intègre les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et une procédure d'agrégation multicritère notamment la somme pondérée normalisée par progression géométrique. A l'analyse, outre sa répartition spatiale relativement marginale (5% de l'espace urbain), les inondations restent un risque majeur dans la ville d'Issia. Plus de 2 résidents sur 5 et environ 4 enjeux urbains sur 10 sont enclins à un niveau de vulnérabilité aux risques d'inondation jugé moyen à important selon notre modèle d'analyse. Le facteur essentiel de cette vulnérabilité est la pression foncière en lien avec une croissance démographique soutenue qui se traduit par une anthropisation des espaces non aedificandi comme les dépressions inondables.

Mots clés : Issia ; Risque hydroclimatique ; Vulnérabilité ; SIG ; Analyse multicritère

Abstract

Côte d'Ivoire's secondary cities, such as Issia, are prone to uncontrolled urban expansion and poor land use in line with sustained demographic growth. This uncontrolled urbanisation is a factor of vulnerability to hydroclimatic hazards such as flooding, which are likely to be exacerbated in a context of climate uncertainty and global change. The study prioritises the levels of vulnerability to flood risks in the city of Issia, located in central-western Côte d'Ivoire. The cartographic approach includes Geographic Information Systems (GIS) and a multi-criteria aggregation procedure, in particular the weighted sum standardised by geometric progression. The analysis shows that, apart from its relatively marginal spatial distribution (5% of the urban area), flooding remains a major risk in the city of Issia. More than 2 out of 5 inhabitants and around 4 out of 10 urban issues are exposed to a level of vulnerability to flooding that is classified as medium to high according to our analysis model. The main factor in this vulnerability is the pressure on land due to sustained demographic growth, resulting in the development of non aedificandi areas such as flood depressions.

Keywords: Issia; Hydroclimatic risk; Vulnerability; GIS; Multi-criteria analysis

Introduction

Le fait urbain en Côte d'Ivoire se fait dans un contexte de mal-développement territorial (Traoré, 2016). Ce mal-développement se traduit par une expansion spatiale rapide et une occupation anarchique des espaces non aedificandi du fait des contraintes physiques comme les marais, les pentes fortes, les vallées (Gogbé et al, 2016). L'anthropisation de ces interstices dangereux est facteur de risques hydroclimatiques liés aux phénomènes météorologiques extrêmes comme les précipitations exceptionnelles (Robert, 2012 ; Colman et al, 2019 ; Anache et al, 2018 ; Simonneaux et al, 2015 et Traoré, 2023).

En Côte d'Ivoire, entre 1960 et 2018, les statistiques officielles ont inventorié plus de 220 catastrophes d'origines géologique, hydrométéorologique et sanitaire (Kaman, 2018 ; GCI, 2019, p. 48). De toutes ces catastrophes, l'aléa inondation à l'origine d'environ un tiers des catastrophes, apparaît comme le plus récurrent (RCI, 2015; CIMA Research Foundation, 2020). Le facteur prépondérant de cette occurrence importante des inondations est l'urbanisation incontrôlée qui se traduit par un réseau de canalisations limité et mal entretenu, une anthropisation incontrôlée des bassins d'orage et des plaines d'inondation, l'inexistence ou l'obstruction des ouvrages d'assainissement (CIMA Research Foundation, 2020).

En réalité, dans les pays du Sud, urbanisation et risques hydrométéorologiques semblent synchrones. En effet, les mutations dans l'usage des terres et les modes d'occupation des sols influent plus significativement la recrudescence des risques de catastrophes d'origine naturelle que tout autre changement (Anache et al, 2018 ; Simonneaux et al, 2015). Plus que de constituer une opportunité de bien-être social, l'urbanisation au Sud s'affirme comme un facteur de dégradation des ressources naturelles (Ouédraogo et al, 2024) et de production de vulnérabilités (Traoré & Tamboura, 2023).

Ces événements hydroclimatiques causent, année après année, d'importantes pertes humaines et économiques (Hauhouot, 2008 ; GCI, 2019 ; INS, 2008 ; GEI, 2019 ; Ado & Rey, 2020 ; Houessinon, 2023). La gestion durable des territoires urbains exige une meilleure connaissance de ces vulnérabilités aux événements hydrométéorologiques extrêmes, comme les inondations. Aussi :

Quels sont les niveaux de vulnérabilités au risque d'inondation dans la ville d'Issia ?

Spécifiquement :

Quels sont les facteurs physiques et anthropiques facteurs de vulnérabilité au risque d'inondation dans la ville d'Issia ?

Quels sont les sous-espaces de la ville d'Issia les plus enclins au risque d'inondation ?

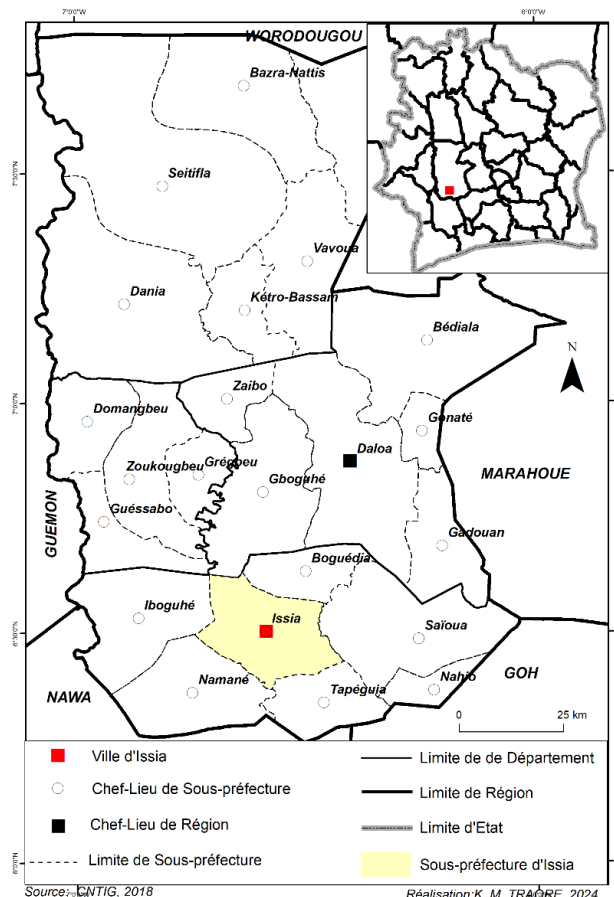
L'objectif de l'étude est de hiérarchiser la vulnérabilité au risque d'inondation dans la ville d'Issia.

L'approche cartographique se veut holistique et intègre les différents facteurs grâce aux techniques de la télédétection, des Systèmes d'Information Géographique et l'analyse multicritère. Dans les sections suivantes l'espace d'étude est localisée et caractérisée. Les résultats sont présentés avant d'être discutés.

1. Localisation et caractéristiques de l'espace d'étude

La ville d'Issia est située au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire avec pour coordonnées 06°29'15" de Latitude Nord et au 006°35'01" de Longitude Ouest (figure N°1). Localisée au Sud de la Région du Haut-Sassandra (figure N°1), elle constitue le Chef-lieu du Département et de la Sous-Préfecture éponymes.

Figure N°1 : Localisation de la ville d'Issia



La ville s'établit géologiquement sur le socle épi-éburnéen du domaine Baoulé (Protérozoïque inférieur ou birriméen) (figure N°2). Ce socle est formé de Cranitoïdes subalcalins à deux micas, Schistes et grauweekes et Grès, arkoses (figure N°2). Globalement, le substratum géologique du site de la ville d'Issia est dominé par les Granites et les Schistes. De ces

formations géologiques extrêmement anciennes (Tagnini, 1971), il ne subsiste qu'un relief de plateau interrompu par endroit par des unités de reliefs isolées appelées "inselbergs" (figure N°3). Les altitudes varient entre 200 et 430 mètres pour une moyenne autour de 250 mètres. Les dénivellations y sont relativement importantes avec près de la moitié des pentes (49%) supérieures à 7%. Plus du tiers du site (36%) s'établit, toutefois, sur des pentes très faibles (inférieures à 2%) et faibles (entre 2% et 5%). Ces faibles dénivellations ont une propension importante à l'accumulation des eaux et corrélativement aux inondations lors des précipitations (Traoré, 2023, p. 7)

Figure N°2 : Géologie d'Issia et sa région

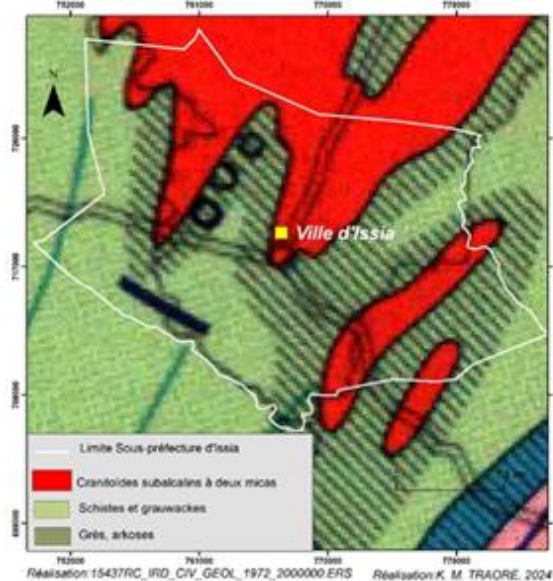
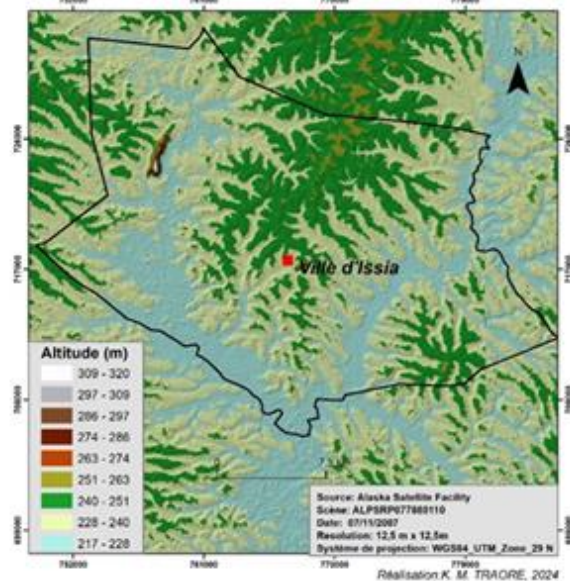


Figure N°2 : Morphologie d'Issia et sa région



La ville se situe globalement dans le bassin versant du Fleuve Sassandra et plus précisément, sur la ligne de partage des eaux de la Lobo et de la Goré qui sont des affluents du Sassandra (figure N°4). Tout le réseau hydrographique qui draine de façon permanente ou intermittente les vallées de ce plateau est organisé autour de ces principaux cours d'eau (figure N°4). L'analyse des paramètres du climat comme les précipitations et les températures indique que la ville d'Issia et sa région sont régies par un climat de type subéquatorial appelé localement « Climat attiéen » (Rahm, 1954) qui couvre la partie Sud de la Côte d'Ivoire. L'analyse du diagramme climatique (figure N°5) de ces trois dernières décennies, montre que ce régime climatique est caractérisé par quatre saisons : (i) une grande saison sèche du novembre à février ; (ii) une grande saison des pluies mars à juin ; (iii) une petite saison sèche de juillet à Août et (iv) une petite saison des pluies de septembre à octobre. Il tombe en moyenne 1500

mm de pluie par an. Il pleut entre 120 et 150 jours par an et aucun mois ne reste sans précipitations.

Outre les précipitations, ce régime climatique se caractérise par des températures élevées toute l'année.

Figure N°4 : hydrographique d'Issia et sa région

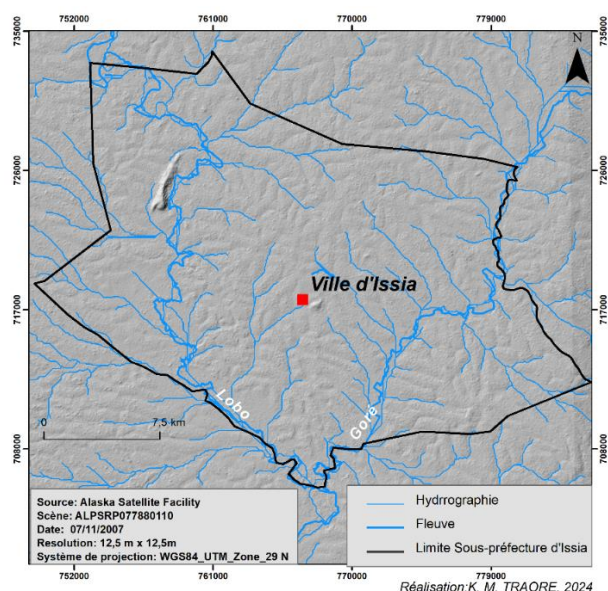
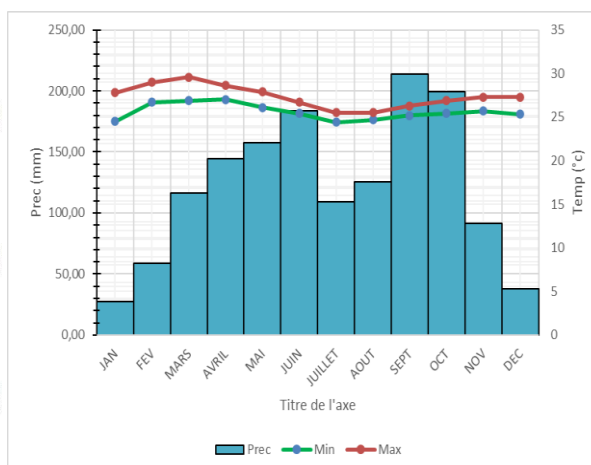


Figure N°5 : Diagramme climatique d'Issia



Il s'agit d'un climat tropical chaud avec des températures qui oscillent entre un minimum de 24,5°C et un maximum de 29, 6°C (figure N°5) avec une moyenne annuelle de 26,4°C. L'analyse du régime thermique entre 1990 et 2022 a montré que les mois de juillet et d'Août sont les plus frais tandis que le mois de mars est le plus chaud. Comme l'ensemble des climats tropicaux, l'amplitude thermique reste globalement faible et inférieure à 3,5°C. Cette variation des températures entre le minima et le maxima tombe à un moins de 1°C au mois d'août. Ce climat subtropical a favorisé autrefois une végétation de forêt tropicale dense sur des sols ferrallitiques désaturés.

L'agglomération urbaine d'Issia connaît une expansion spatiale remarquable alimentée par une dynamique démographique importante. En fait, cet ancien poste militaire formé des villages originels que sont Frazidia et Mousségogoua, comptait moins d'une centaine d'âmes au début du siècle dernier en 1905 (Bamba & Gamsonre, 2022, p. 146). Favorisée par l'essor de l'économie de plantation, l'agglomération va connaître une croissance démographique alimentée par les vagues successives de migrants et par la suite par le solde naturel. Dès 1975 la démographie a atteint 10 863 habitants, ensuite 28 821 en 1988, puis 53 997 en 1998, pour 85 727 en 2014 et 126 252 en 2021 (INS, 2021). Subséquemment, l'emprise spatiale de la

ville a connu une expansion régulière passant sur la période de moins de 100 ha à 4145 ha (INS, 2021).

2. Données et méthodes

2.1. Données de l'étude

Cette étude utilise des données de sources et de formats divers (tableau N°1). Il s'agit essentiellement de données physiques et de données socio-démographiques.

Tableau N°1 : Données de l'étude

N°	Données	Format	Sources	Dates	Résolution/Echelle
1	Géologiques	TIFF	B. Tagnini - SODEMI	1972	1/2 000 000
1	Climatologiques	NC	crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg	2011-2021	0.5° x 0.5°
2	Pédologiques	Shapefile	FAO (DSMW)	Jan. 2003	0.5° x 0.5°
3	Topographiques	GEOTIFF	ALOS PALSAR –R.T.C. (https://search.asf.alaska.edu/#/)	18/07/2007 04/08/2007	12,5 m
4	Occupation du sol	TIFF	Sentinel 2 https://scihub.copernicus.eu/	18/12/2023	10 m
5	Démographiques	Texte	Institut National de la Statistique (INS)	2021	1/2 000 000

Les données physiques sont relatives à la géologie, au climat, à la pédologie et à la morphologie du site de la ville d'Issia. Ces paramètres naturels, dans leur agencement peuvent être facteurs de risques d'inondation. Les données socio-démographiques sont relatives à l'occupation du sol en matière de bâti et de répartition spatiale des enjeux urbains constitués des infrastructures de base et des équipements socio-collectifs qui permettent le fonctionnement et le développement de la ville en tant que système. Ces données renvoient également à la densité de la population. Les facteurs socio-démographiques de par leur organisation et leur répartition spatiale sont susceptibles d'exacerber les vulnérabilités inhérentes aux risques hydroclimatiques comme les inondations. Ces variables ont été déterminées à partir d'une image du capteur Sentinel 2 et de données de l'Institut National de la Statistique (tableau N°1).

2.2. Méthodes

La cartographie des espaces vulnérables au risque d'inondation par stagnation ou ruissellement des eaux dans la ville d'Issia en cas d'apport hydrique en excès s'est faite par croisement (union et superposition) de la carte l'inondabilité et celles des récepteurs de risques.

2.2.1. Cartographie de la susceptibilité d'occurrence des inondations dans la ville d'Issia

Dans les espaces urbanisés, antérieurement aux changements d'utilisation des terres et aux modes d'occupations des sols, le facteur prépondérant des inondations est la morphologie du site. De toute évidence, les dépressions ont une inclination naturelle aux inondations bien plus importante que les éminences (Traoré, 2023). Cette inclination naturelle a été évaluée et cartographiée à partir d'un indice topographique d'humidité notamment le SAGA Wetness Index (SAGAWI) proposé par Böhner & Selige (2006). Le SAGAWI est constitué d'informations dérivées d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Contrairement à d'autres indice topographique d'humidité, celui-ci (i) prend davantage en considération les pixels voisins par la prise en considération des fines différences de valeurs d'élévation entre les pixels grâce à l'utilisation d'une modification itérative de l'ACS ; (ii) permet d'obtenir une modélisation nettement plus performante et donc une séparation beaucoup plus claire entre zones humides et zones sèche et (iii) présente visuellement un résultat beaucoup plus lissé et dont les zones sont plus uniformes qui facilite grandement l'interprétation de l'indice par l'utilisateur (Drolet, 2020).

Afin de générer le SAGAWI, le MNT a été, dans un premier temps, corrigé par *brèchage* puis par *remplissage* à travers les commandes « *Breach Depressions* » et « *Fill Sinks XXL* » dans l'interface de SAGA (*System for Automated Geoscientific Analyses*) GIS. Ces opérations de prétraitement sont indispensables afin de corriger les irrégularités, les effets de la rugosité et du bruit du relief pour que l'eau puisse poursuivre son écoulement cohérent tout au long de la pente (Bournival, et al 2017; Drolet, 2020). A partir de ce MNT *brèché* puis *rempli*, le SAGAWI a été généré grâce à l'outil « *SAGA Wetness Index* » dans SAGAGIS. A partir des valeurs obtenues, un indice d'inondabilité allant de 1 (Très improbable) à 5 (Certaine) (tableau N°2).

Tableau N°2 : Indices inondabilité

Inondabilité	Score
Très improbable	1
Improbable	2
Peu probable	3
Probable	4
Certaine	5

2.2.2. Cartographie des récepteurs de risque dans la ville d'Issia

Un récepteur de risque ou enjeu est une donnée géographique qui est soit une personne, un bien ou une activité qui pourrait subir un préjudice à la suite de la manifestation d'un aléa (Montoroi, 2012). La cartographie des récepteurs de risque s'est faite à travers les variables « occupation du sol », « densité de la population » et « présence ou non des enjeux urbains ». L'occupation du sol a été cartographiée à partir d'une image Sentinel 2. Le traitement a consisté en une discrétisation de l'image en dix classes selon une classification non supervisée à partir de l'outil *Iso Cluster Unsupervised Classification* de *ArcToolbox* dans l'interface de *ArcMap 10.8*. Les résultats de cette classification non supervisée ont été confrontés aux observations in situ grâce aux points de référence préalablement déterminés. A l'issue de ces enquêtes de terrain, un indice d'occupation du sol a été attribué à chaque classe de la classification non supervisée. Les classes ayant les mêmes caractéristiques ont également été associées et une cartographie de l'occupation du sol a été réalisée.

La cartographie des enjeux urbains s'est faite au moyen de levées GPS (Global Position System) de type Garmin. Les différents waypoints acquis ont été intégrés dans la base de données et une carte des enjeux urbains a été réalisée.

Les données socio-démographiques sont de l'Institut National de la Statistique. Elles ont permis de réaliser une carte de la densité des populations.

Afin d'intégrer ces variables dans un SIG, le territoire de la ville a été découpé en des mailles carrées de 25 mètres de côté constituant ainsi une matrice de 68 525 objets géographiques. A l'échelle de chaque maille, une matrice a été construite et un score oscillant entre 1 et 3 a été attribué conformément au tableau N°3.

Tableau N°3 : Pondération des récepteurs de risque

Proportion	Score
Faible	1
Moyenne	2
Importante	3

L'intégration des scores pondérés des facteurs d'inondabilité et des récepteurs de risques est basée sur la somme pondérée à l'effet de déterminer à l'échelle de chaque maille un indice de vulnérabilité. Toutefois, cette méthode d'agrégation basée sur la somme pondérée des facteurs d'inondabilité peut être à l'origine d'une perte d'informations sur les conflits à résoudre ou d'une compensation des mauvais critères par des critères plus performants (Traoré, 2016, p. 91). Pour pallier ces insuffisances, il a fallu procéder à une normalisation de la pondération

par progression géométrique ($n * n$) des degrés synthétiques initiaux (n) (tableau N°4). Cette procédure de normalisation maintient les écarts et permet de conserver un zéro véritable (Traoré, 2016).

Tableau 4 : Progression géométrique des degrés initiaux

Degrés initiaux (n)	Pondération ($n * n$)
1	1
2	4
3	9
4	16
5	25
6	36

Source : Adapté de F. DEMORAES, 2004

A partir de ces scores normalisés, une carte de vulnérabilité aux risques d'inondation dans la ville d'Issia a été générée. Ces traitements ont été précédés, suivis et validés par les recherches empiriques.

3. Résultats

La vulnérabilité des systèmes urbains aux aléas hydroclimatiques comme les inondations est fonction d'un certain nombre de facteurs à la fois physiques qu'anthropiques. Les facteurs physiques sont inhérents à la morphologie du site, support du fait urbain. Les facteurs anthropiques émanent des changements d'usage des terres et des modes d'occupation des espaces urbanisés.

3.1. Les facteurs de la vulnérabilité aux risques d'inondation dans la ville d'Issia

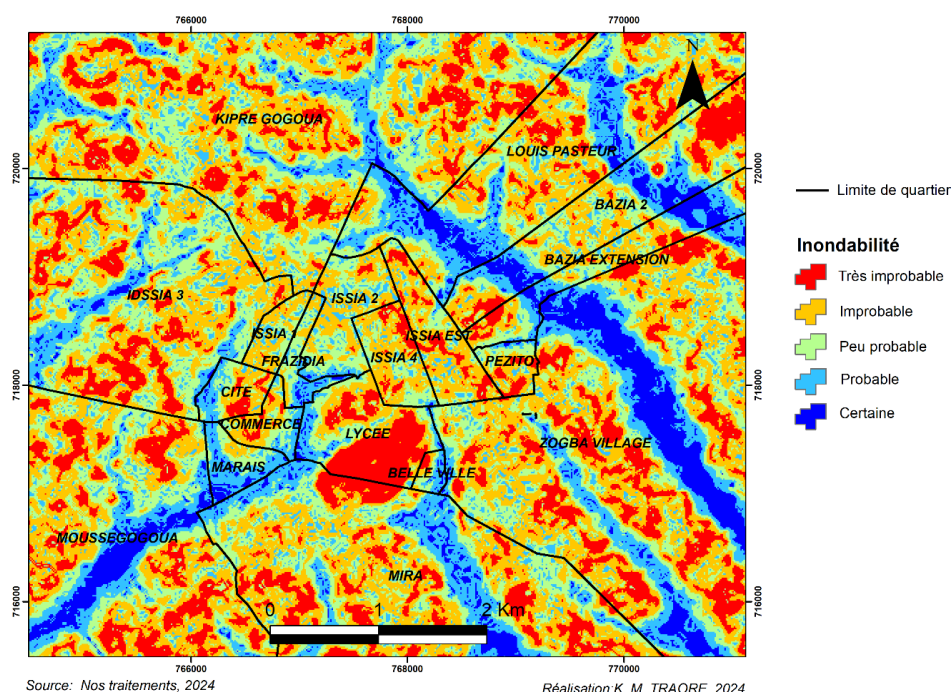
3.1.1 Une susceptibilité d'occurrence de l'aléa inondation avérée

Les facteurs physiques de l'inondabilité dans la ville d'Issia ont été évalués à travers la détermination du SAGAWI. Les valeurs du SAGAWI obtenues à partir du traitement du MNT varient de 5,6 (pour une inondabilité jugée « très improbable ») à 22,5 (pour une inondabilité jugée « certaine ») par notre modèle d'analyse (figure N°6). En sus, l'écart type de 2,7 traduit une relative dispersion des valeurs de cette distribution autour de leur moyenne qui est de 15,8. Toutefois, la valeur de la médiane de 12,3, très proche de la moyenne, indique une importante symétrie de la série statistique dont l'allure se présente sous la forme de parabole.

L'analyse spatiale (figure N°6) indique que l'inondabilité importante concerne les espaces de dépressions formés de marais. Ces espaces sont plus susceptibles d'accumuler les eaux de surface en excès lors des fortes précipitations. Sous la forme de vallées allongées peu

encaissées, ces dépressions parcourent tous les quartiers de l'espace urbain d'Issia (figure N°6).

Figure N°6 : Carte de l'inondabilité de la ville de la ville d'Issia



La discrétisation des valeurs du SAGAWI faite selon la méthode des seuils naturels (*Jenks*) (Traoré, 2023, p. 9) montre que près d'un quart du territoire (23,4%) soit 983 ha est d'une inondabilité importante variant entre « Probable » et « Certaine » (tableau N°5).

Tableau N°5 : Répartition spatiale de l'inondabilité

SAGAWI	Inondabilité	Score	Surface (ha)	Fréquence (%)
5,6 - 10,5	Très improbable	1	709,8	16,9
10,6 - 12,5	Improbable	2	1472,6	35,2
12,6 - 14,7	Peu probable	3	1016,2	24,3
14,8 - 17,7	Probable	4	722,2	17,2
17,8 - 22,5	Certaine	5	260,8	6,2

Source : Nos traitements, 2024

L'emprise spatiale de l'inondabilité d'un niveau négligeable (« Très improbable » et « Improbable ») reste toute de même importante. Elle concerne plus de la moitié de l'espace urbain soit 52% sur 2 182,4 ha.

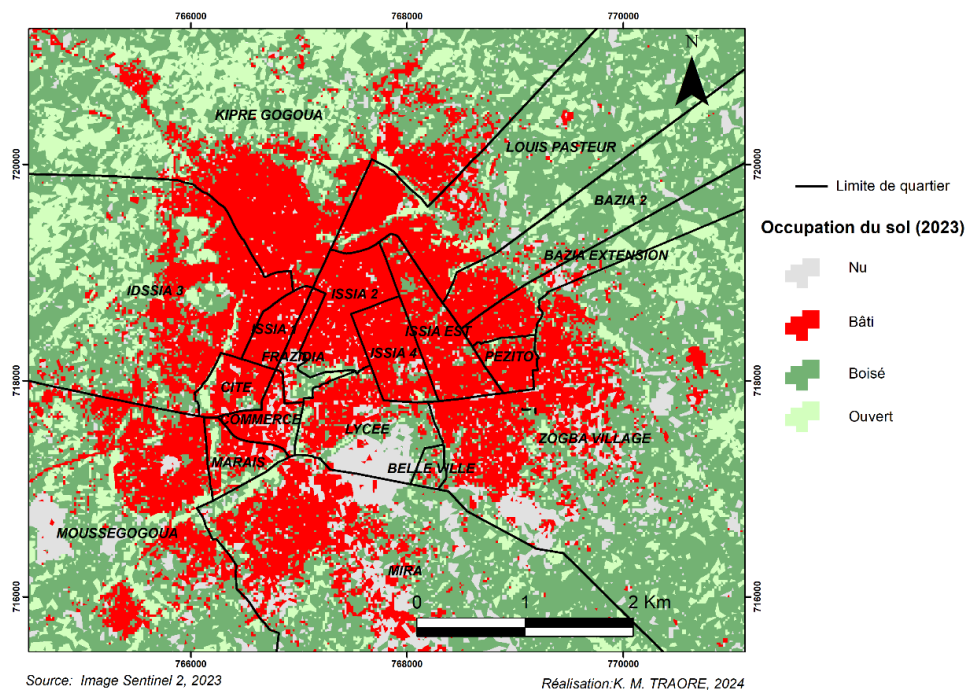
Au regard de ces résultats, un score oscillant entre « 1 » et « 5 » a été attribué selon la susceptibilité d'occurrence de l'aléa inondation (tableau N°6). Cette inondabilité pourrait

varier selon l'importance et la répartition des facteurs anthropiques comme l'occupation du sol et les récepteurs de risque.

3.1.2. Un sol fortement artificialisé

Les résultats de la classification non supervisée consolidés à partir des enquêtes de terrain ont permis d'identifier quatre indices d'occupation du sol : « Nu », « Bâti », « Boisé » et « Ouvert » (figure N°7).

Figure N°7 : Carte d'occupation du sol de la ville d'Issia en 2023

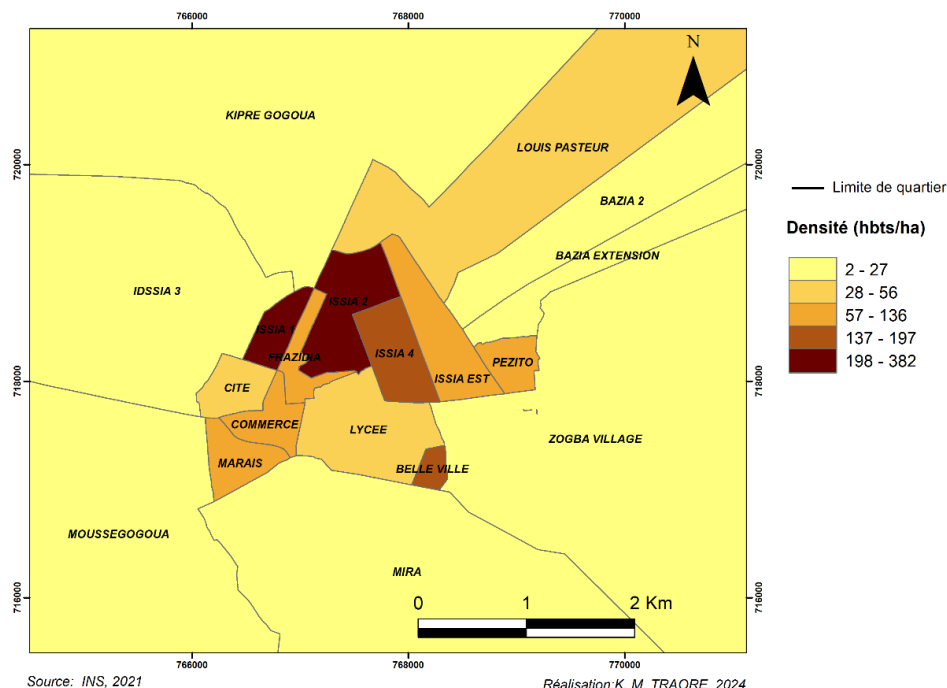


L'indice « Nu » correspond aux sols dénudés. L'indice « Bâti » renvoie à l'emprise de l'habitats et des récepteurs de risques. L'indice « Boisé » détermine les vergers et les reliques de forêts. L'indice « Ouvert » regroupe des espaces de végétations dégradées constituée de champ, de graminées et de marais. Ont été considérés comme artificialisés, les sols qui ne sont ni agricoles ni naturels. Ce sont les sols nus et bâtis qui représentent plus du tiers (35%) de l'espace urbain soit 1 460 ha. Cette artificialisation des sols en lien avec la dynamique urbaine est susceptible d'influencer l'inondabilité des territoires contrairement aux sols non artificialisés. Les sols non encore artificialisés sont des indices « Boisé » et « ouvert ». Ils couvrent environ 2 722 ha soit 65% de l'emprise urbaine. Pour l'agrégation des données d'occupation du sol, le score « 1 » a été attribué à l'indice « Boisé », le score « 2 » à l'indice « Ouvert » et le score « 3 » aux indices « Bâti ». Nous sommes partis du postulat selon lequel plus le sol est bâti, davantage il est vulnérable aux inondations.

3.1.3. Des densités de la population plus importantes dans la couronne centrale urbaine

La ville d'Issia s'établit sur environ 4 145 ha pour une population estimée à 125 252 habitants en 2021. La densité moyenne y est de 97,5 hbts/ha. Toutefois, les quartiers de la couronne centrale comme Issia 1, Issia 3 et Issia 4 sont les plus densément peuplés avec plus de 130 hbts/ha (figure N°8). Les quartiers de la couronne intermédiaire ont des densités autour de la moyenne. Les plus faibles densités concernent les quartiers de la couronne périphérique (figure N°8). Ces zones d'expansion urbaine ont des densités en deçà de 60 hbts/ha.

Figure N°8 : Carte des densités de population de la ville de la ville d'Issia



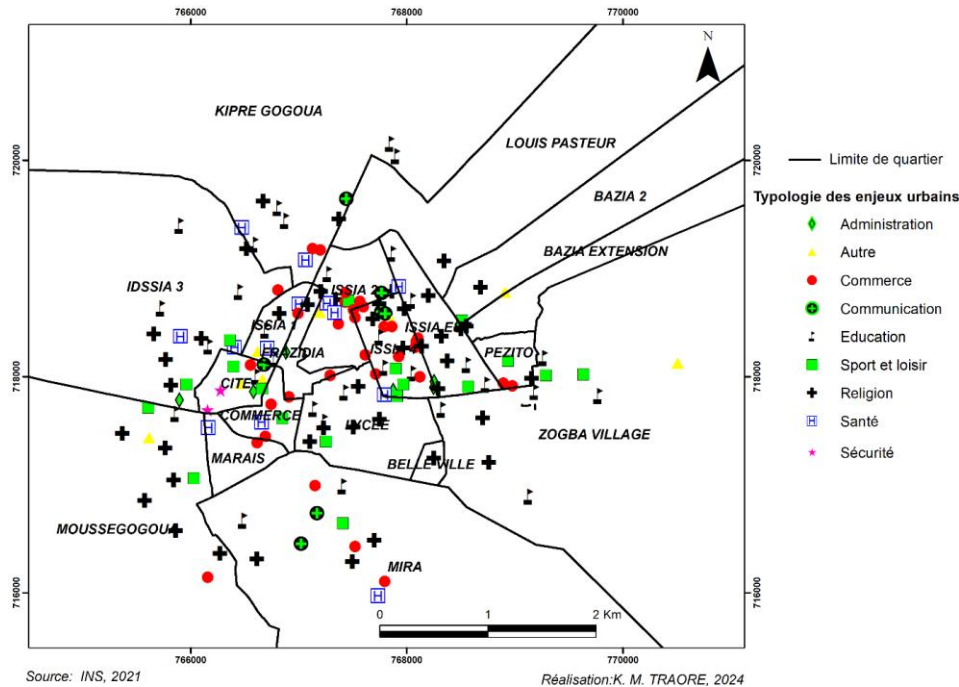
L'intégration de ces niveaux de densité dans la base de données s'est faite par l'attribution d'un score de « 1 » pour les faibles densités, « 2 » pour les densités moyennes et « 3 » pour les fortes densités. Le principe de base qui a guidé cette agrégation est que la densité des enjeux humains exacerbe la vulnérabilité des systèmes sociaux.

3.1.4. Une centralité des enjeux urbains

Issia compte environ 160 enjeux urbains de fonctionnement et de développement de la ville compte un système dynamique. Ces enjeux urbains se regroupent en neuf catégories allant de l'administratif au sécuritaire en passant par les établissements commerciaux, éducatifs, sanitaires, religieux, sportifs et autres (figure N°9). La répartition spatiale de ces enjeux tend à se centraliser à l'image des densités de populations. L'intégration de ces données dans l'analyse de la vulnérabilité au risque d'inondation s'est faite à l'échelle de chaque maille.

Une matrice a été construite à travers des variables binaires indiquant la présence (valeur 1) ou l'absence (valeur 0) des différents types d'enjeux urbains.

Figure N°9 : Carte de répartition des enjeux urbains



3.2. Une vulnérabilité spatialement contextualisée

L'agrégation des facteurs physiques et anthropiques a permis de générer la série statistique de la vulnérabilité aux risques d'inondation dans la ville d'Issia. Les valeurs de cette série oscillent entre un minimum ($X_{\min}$) de 3 et un maximum ($X_{\max}$) de 38. Cette distribution a une moyenne de 10. La dispersion des valeurs autour de la moyenne est relativement importante avec un écart type de 7. Afin d'identifier d'éventuelles valeurs aberrantes dans cette série statistique, la méthode interquartile a été utilisée selon l'équation suivante :

$$x < Q_1 - 1,5 (Q_3 - Q_1) \quad \text{ou} \quad x > Q_3 + 1,5 (Q_3 - Q_1)$$

En fait, pour qu'une distribution statistique soit considérée comme normale, toutes ses valeurs doivent être supérieures à la première condition ou inférieures à la seconde. Les données qui ne respectent pas ces conditions ne sont donc pas incluses dans le diagramme de quartiles car considérées comme trop éloignées donc aberrantes.

Ainsi, avec $Q_1 = 4$; $Q_2 = 6$ et $Q_3 = 14$

On a $X < 4 - 1,5 (14 - 4)$

donc $X < -11$

ou

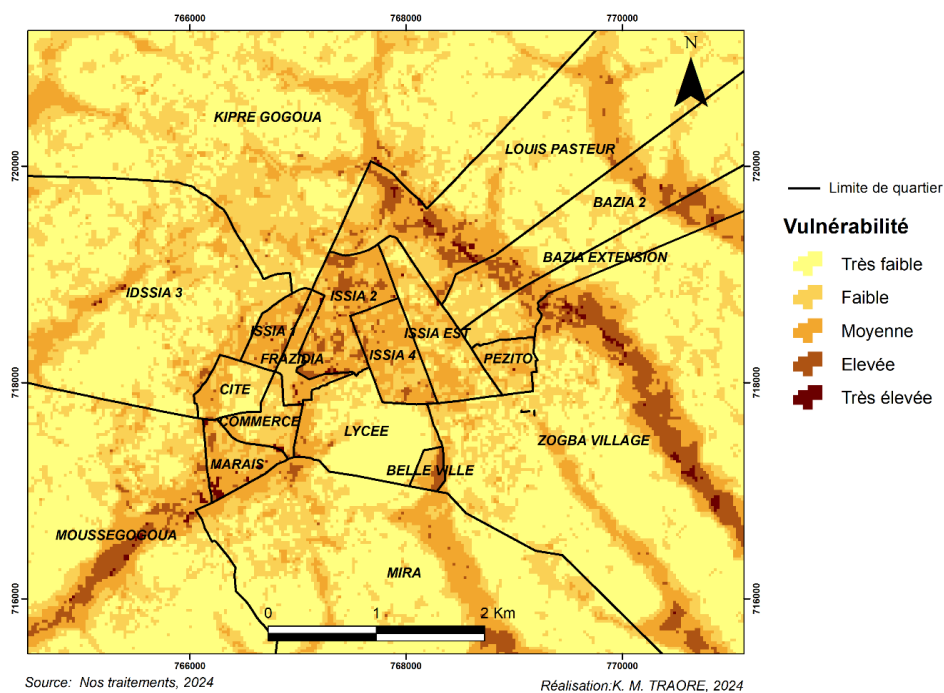
On a $X > 14 + 1,5 (14 - 4)$

donc $X > 39$

Aucune donnée n'étant inférieure à -11 ou supérieure 39, la distribution est considérée comme normale avec une Etendue Interquartile (EI) = $Q_3 - Q_1 = 10$.

Les données de la distribution discréditées par la méthode *Natural Breaks (Jenk)* dans ArcGIS ont permis de générer une carte de la vulnérabilité aux risques d'inondation (figure N°10).

Figure N°10 : Carte des niveaux de vulnérabilités aux risques d'inondation dans la ville d'Issia



La vulnérabilité aux risques d'inondation varie d'un niveau relativement négligeable (très faible et faible) à un degré plutôt important (élevé et très élevée) (figure N°10). La vulnérabilité jugée importante par notre modèle d'agrégation des facteurs concerne naturellement les espaces de dépression allongée et également la couronne centrale de la ville notamment les quartiers Issia 1, Issia 2, Issia 4, Issia Est, Frazidia, Marais, Commerce, Cité et Pezito (figure N°10). La vulnérabilité des quartiers de la couronne périphérique est d'une vulnérabilité relativement moindre (figure N°11).

Les résultats statistiques (tableau N°6) indiquent que les vulnérabilités importantes ne concernent que 185 ha soit moins de 5% du l'espace urbain (tableau N°6). Par contre, les niveaux négligeables couvrent plus de 3 260 ha soit près de trois quarts de la ville et la vulnérabilité moyenne 700 ha soit 17% du territoire urbain (tableau N°6). A l'analyse, l'inondation semble un risque mineur et marginal dans la ville d'Issia. Toutefois, la densité

d'artificialisation du sol par la population et les enjeux urbains fait de cet aléa hydrométéorologique un risque plutôt majeur.

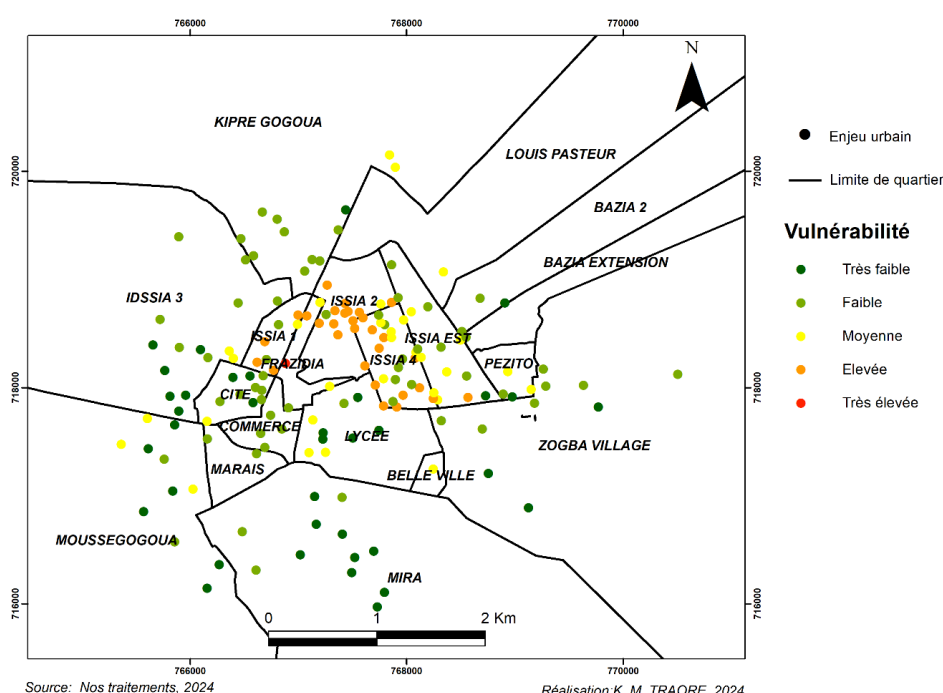
Tableau 6 : Statistiques de la vulnérabilité aux risques d'inondation

N°	Classe	Vulnérabilité	Surface (ha)	Fréquence (%)
1	3 - 7	Très faible	2127,8	51,3
2	8 - 15	Faible	1132,5	27,3
3	16 -	Moyenne	699,9	16,9
4	23 - 28	Elevée	169,4	4,1
5	29 - 38	Très élevée	15,4	0,4

Source : Nos traitements, 2024

En réalité, cet aléa concerne environ 12 000 ménages soit environ 58 000 habitants soit 46% de la population résidente. Le constat est quasi identique en ce qui concerne les enjeux urbains de fonctionnement et de développement de la ville d'Issia. Notre modèle d'analyse montre qu'environ 4 enjeux urbains sur 10 sont enclins à un niveau de vulnérabilité aux risques d'inondation moyen à important (figure N°11).

Figure N°11 : Carte des niveaux de vulnérabilités des enjeux urbains aux risques d'inondation dans la ville d'Issia



4. Discussion

Cette étude hiérarchise les vulnérabilités aux risques d'inondation dans la ville moyenne d'Issia soumise à une expansion spatiale remarquable en lien avec une dynamique démographique soutenue. L'approche est basée sur une cartographie holistique qui intègre à la fois les facteurs physiques inhérents à la morphologie du site et les facteurs anthropiques

intrinsèques aux changements d'utilisation des terres et aux modes d'occupation des sols. Les données en input sont d'une part des variables socio-démographiques issues des recensements de l'Institut National de la Statistique et d'autre part un Modèle Numérique de Terrain.

Afin de corriger les irrégularités du terrain et améliorer les résultats de la modélisation, le MNT a subi des opérations de prétraitement comme le suggère (Jenson & Dominique, 1988 et Drolet, 2020). Ce prétraitement est primordial puisqu'un obstacle, telle une route, peut faire dévier l'écoulement et incidemment causer des erreurs dans le calcul de l'indice topographique d'humidité (Ariza-Villaverde et al., 2013 ; Murphy et al., 2008 ; Varin et al., 2021). Le prétraitement s'est fait par remplissage puis brèchage comme selon les étapes décrites par Traoré (2023, p. 92). La combinaison de ces deux opérations permet des résultats plus intéressants (Lindsay & Creed, 2005 ; Poggio & Soille, 2012 ; Lindsay, 2015 ; Lidberg et al., 2017, Varin et al., 2017, Drolet, 2020).

La méthode d'agrégation des différents facteurs de vulnérabilité s'est faite par le biais de la somme pondérée. C'est une procédure d'agrégation multicritère qui consiste à affecter à chaque facteur un poids selon sa valeur. Cette approche aboutit à un barème de pondération qui construit, à partir d'un ensemble d'observations empiriques, un système relationnel numérique qui conserve impérativement les propriétés de l'observation selon une échelle ordinale (Traoré, 2016).

Toutefois, comme l'indiquaient Martel & Roy (2005), si la somme pondérée constitue la procédure d'agrégation multicritère la plus familière et la plus employée, elle n'est significative que sous certaines conditions. Du fait qu'elle peut entraîner des compensations totales, non contrôlables, entre les critères ou être à l'origine d'une perte d'information sur les conflits à résoudre ou d'une compensation des mauvais critères par des critères plus performants, la somme pondérée n'est significative que sous réserve de transformation des coefficients de pondération de manière appropriée (Chakhar, 2006 ; Kedowide Mevo Guezo, 2011 ; Martel & B. Roy, 2005 ; Traoré, 2016).

Sur cette base et afin d'avoir une somme pondérée cohérente, il a été nécessaire de ne considérer que des critères à maximiser (Gogbé et al, 2018). Comme Demoraes, (2004) à Quito en Equateur, un poids supérieur a donc été attribué aux indices les plus forts par progression géométrique afin d'accentuer les contrastes. Cette pondération a permis de mieux discriminer les mailles et en ressortir les plus vulnérables aux inondations.

A l'instar des conclusions des travaux de Gogbé et al (2016) et de Traoré & Tamboura (2023) à San-Pedro, de Alla Della André (2013) dans l'agglomération abidjanaise, de Traoré et al

(2023) à Arrah, il ressort que le facteur primordial de la vulnérabilité aux risques d'inondation dans la ville d'Issia est le mal-développement urbain qui se traduit par une anthropisation anarchique des espaces dangereux et non aedificandi comme les dépressions et les marais inondables. En réalité, les pays du Sud global comme la Côte d'Ivoire ont connu récemment leur transition urbaine entendue comme le processus par lequel un Etat passe d'un système de peuplement rural à un système de peuplement urbain (Steck, 2006 ; Baud et al, 2018). Cette transition urbaine est si brutale (Guerrien, 2004) que les villes secondaires comme Issia ont tendance à croître plus rapidement en surface qu'en population (Baud et al, 2018). Le mal-développement subséquent à cette expansion urbaine incontrôlée est incontestablement facteur de vulnérabilités aux risques hydroclimatiques. En effet, comme le constatent Bétard & Fort (2014), les risques dans les Suds se sont récemment accrus face à la forte croissance démographique et à l'absence généralisée de planification urbaine et environnementale, augmentant sans cesse la vulnérabilité des sociétés.

Cette vulnérabilité intrinsèque est susceptible de s'exacerber à la rencontre des effets des changements globaux nés de l'anthropocène selon le constat de Traoré (2018) à Bouaflé. Comme le soulignent Houessinon et al (2023) selon leurs constats au Bénin, les effets des inondations sont de plus en plus ressentis ces dernières années du fait de la conjugaison de la pression démographique et de changement climatique. De toute évidence, les déséquilibres planétaires et sociaux actuels entraînent d'ores et déjà une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes : sécheresses, canicules, tornades, pluies fortes et abondantes sources d'inondations (Camirand & Gingras, 2011). Bétard et al (2014) ont constaté par exemple qu'au Brésil les instabilités de terrains sont déclenchés par des épisodes pluviométriques de hautes intensités.

Ainsi, à la suite de Mcbean & Ajibade (2009), nous constatons qu'aujourd'hui, les effets néfastes et irrémédiables des perturbations climatiques, exacerbent les vulnérabilités territoriales, déclenchent la majorité des situations de crises et de catastrophes et impulsent un caractère non durable aux trajectoires actuelles de développement urbain. Ce spectre des changements climatiques actuels exige un effort d'adaptation des territoires à l'augmentation de la fréquence de ces aléas d'origine hydrométéorologique (Bétard & Fort, 2014). Selon le Rapport national sur le climat et le développement du Groupe de la Banque Mondiale (2023), les pays comme la Côte d'Ivoire sont contraints à des efforts d'adaptation supplémentaire aux effets climatiques au risque de s'exposer à des pertes annuelles de PIB de l'ordre de 3% à 4,5% d'ici à 2030 et atteindre 8% à 13% à l'horizon 2050 soit une perte de 15% du revenu

réel par habitant. Les lourds impacts des catastrophes naturelles, en termes de pertes de PIB et de décès, dans les pays à faible revenu comparativement aux pays à revenu élevé émanent à la fois d'une forte vulnérabilité sociale et d'une faible préparation des autorités et des populations face aux phénomènes naturels dangereux (Bétard & Fort, 2014).

Conclusion

Somme toute, la conjugaison de la morphologie du site et de l'urbanisation mal maîtrisée accroît la vulnérabilité du système urbain d'Issia aux risques hydroclimatiques comme les inondations pluviales. Plus de 2 résidents sur 5 et environ 4 enjeux urbains sur 10 sont enclins à un niveau de vulnérabilité aux risques d'inondation jugé moyen à important selon notre modèle d'analyse. Le facteur essentiel de cette vulnérabilité se trouve dans l'expansion urbaine caractérisée par des changements d'usage des terres inappropriés et des modes d'occupations anarchiques des espaces inondables. Cette vulnérabilité intrinsèque aux territoires urbains est susceptible d'exacerbation dans un contexte de perturbations des éléments du climat.

Les systèmes territoriaux des Suds comme Issia sont ainsi enclins à des vulnérabilités inhérentes aux incertitudes à la fois sociales et climatiques qui menacent même leur fonctionnement et leur durabilité. Si l'on suit le constat du Groupe de la Banque Mondiale (2023, p. 9), les coûts engendrés par le changement climatique sur les zones urbaines et les infrastructures économiques devraient être de plus en plus importants. L'adaptation des systèmes urbains à ces chocs climatiques et sociaux par une meilleure connaissance des vulnérabilités contribuerait à la réduction de ces impacts en termes pertes en vies humaines et économiques. Dans ce contexte, plutôt que le risque soit perçu comme une fatalité relevant d'une force supérieure (Bétard & Fort, 2014 ; Traoré et al, 2021), l'enjeu est de parvenir à définir de nouvelles formes d'aménagement et de développement des territoires qui intègrent pleinement le risque pour des systèmes territoriaux moins vulnérables et plus résilients (Rode, 2009).

L'étude intègre un certain nombre de variables physiques et socio-démographiques qui ont permis la cartographie des espaces vulnérables aux risques d'inondation. Toutefois, elle occulte des données comme le niveau de vie des ménages, la typologie des logements, le niveau d'instruction qui auraient pu incontestablement affiner cette cartographie. Outre ces limites, les résultats obtenus restent indéniablement un outil d'aide à une meilleure connaissance et une gestion efficace de ce risque hydroclimatique. A partir de cette ébauche, les perspectives devront permettre l'intégration d'un plus grand nombre de variables.

BIBLIOGRAPHIE

Ado J. P. et Rey J. (2020). *Urbanisation et logement décents face aux risques météorologiques en Afrique : le cas d'Abidjan*, Rapport Centre for Affordable Housing Finance Africa, Abidjan, 12 p

Alla Della A. (2013). *Les risques naturels dans l'agglomération d'Abidjan (Côte d'Ivoire)*. Thèse de doctorat d'Etat ès - sciences humaines, Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, 385 p.

Anache, J. A., Flanagan, D. C., Srivastava, A., & Wendland, E. C. (2018). Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado. *Science of the Total Environment*, 622, 140-151..

Ariza-Villaverde, A. B., Jiménez-Hornero, F. J., & de Ravé, E. G. (2013). Multifractal analysis applied to the study of the accuracy of DEM-based stream derivation. *Geomorphology*, 197, 85-95.

Bamba M. & Gamsonre, Y. (2022). Histoire de la localité d'Issia dans le Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire (XVIIe SIECLE–1905). Collection recherches & regards d'Afrique, 1 (2), 145-159

Baud P., Bourgeat S. et Bras C. (2018). *Dictionnaire de géographie*, Paris, Hartier, 607 p.

Bétard F., Delbart N. & Piel, C. (2014). « Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la région de Nova Friburgo (État de Rio de Janeiro, Brésil). Une étape vers l'évaluation et la gestion du risque ». *Bulletin de l'association de géographes français. Géographies*, 91(91-3), 276-288.

Bétard, F., & Fort, M. (2014). « Les risques liés à la nature et leur gestion dans les Suds ». *Bulletin de l'association de géographes français. Géographies*, 91(91-3), 231-240.

Böhner, J., & Selige, T. (2006). Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. In *SAGA-Analyses and modelling applications*. Goltze., 115, 13-28.

Bournival, P., Varin, M., & Fink, J. (2017). *Validation d'une méthode semi-automatisée de détection des milieux humides à partir du lidar aéroporté*. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. CERFO). Technical report 2017-01., 44 p.

Camirand, J., & Gingras, C. (2011). Les changements climatiques : quels en sont les causes et les impacts. Nature Québec.

Chakhar S. (2006). *Cartographie décisionnelle multicritère : formalisation et implémentation informatique*, Thèse de doctorat, Université Paris Dauphine, 300p.

CIMA Research Foundation (2020). *Projet « Intégrer la gestion des inondations et des sécheresses et de l'alerte précoce pour l'adaptation au changement climatique dans le bassin de la Volta »*, Rapport des consultations nationales en Côte d'Ivoire, 80 p.

Colman, C. B., Oliveira, P. T. S., Almagro, A., Soares-Filho, B. S., & Rodrigues, D. B. (2019). Effects of climate and land-cover changes on soil erosion in Brazilian Pantanal. *Sustainability*, 11(24), 7053.

Demoraes F. (2004). *Mobilité, enjeux et risque dans le District Métropolitain de Quito (Equateur)*, Thèse de doctorat, Université de Savoie, 587 p.

Drolet E. (2020). *Identification des zones de contrainte de drainage aux opérations forestières à l'aide des données lidar*, Mémoire, Université Laval, Québec, 62 p.

FAO/UNESCO (2003). The Digital soil map of the world (DSMW) CD-ROM (Version 3.6, January 2003), Rome, Italy.

GCI (Gouvernement de Côte d'Ivoire) (2019). *Evaluation des pertes, dommages et besoins suite aux inondations de juin 2018 à Abidjan, Programme ACP-UE de Prévention des Risques liés aux Catastrophes Naturelles*, 220 p.

Gogbe T., Kouassi N. G. et Traoré K. M. (2018). *Analyse et évaluation des vulnérabilités du système d'approvisionnement en eau potable de la ville de San-Pedro (Côte d'Ivoire)*, Actes du colloque international en hommage au Professeur Asseypo Antoine HAUHOUOT (Abidjan 22 et 23 Novembre 2016), Géographie et développement, Tome 2 : Urbanisation et Développement, L'Harmattan, Dakar, du 04 décembre 2018, p. 95-109.

Gogbe T., Kouassi N. G. et Traoré K. M. et Kouadio N. E. (2016). « Cartographie des espaces vulnérables aux risques d'inondation dans la ville de San-Pedro », *RGARDSUDS, Revue de Géographie, d'Aménagement Régional et de Développement des Suds*, Institut de Géographie Tropicale, premier numéro 2016, 27p.

Groupe de la Banque Mondiale (2023). *Rapport national sur le climat et le développement : Côte d'Ivoire*, Afrique de l'Ouest et du Centre, 106 p.

Guerrien M. (2004). *L'enfance agitée d'une mégapole. Transition urbaine et fragmentation de l'espace dans la vallée de Mexico*. Thèse de doctorat ; Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS), 389 p.

Harris I., Osborn T. J., Jones P. & Lister David (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci Data* 7, 109

HOUESSINON D. R. B. & al (2023) « Modélisation prospective du risque d'inondation à l'horizon 2060 dans la municipalité d'Abomey-Calavi au Sud-Bénin », *Revue Internationale du chercheur* « Volume 4: Numéro 1 » pp: 210 -230

INS (Institut National De La Statistique) (2008). *Recueil des statistiques de l'environnement en Côte d'Ivoire*. Abidjan, Institut national de la statistique, Département des statistiques et synthèses économiques.

INS (Institut National De La Statistique) (2021). *Recensement Général de la Population et de l'Habitation 98 : Migration – urbanisation*, Volume 4, Tome 2, Abidjan, INS

Jenson, S. K., & Domingue, J. O. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 54(11), 1593-1600.

Kaman, P. (2018). *Guide de sensibilisation sur la réduction des risques de catastrophe en Côte d'Ivoire*. Côte d'Ivoire : Nations Unies/ISDR. Récupéré le 04 avril 2020 de www.environnement.gouv.ci/pollutec/CTS3%20LD/CTS%203.15.pdf

Kedowide Mevo Guezo, C. G. (2011). *SIG et analyse multicritère pour l'aide à la décision en agriculture urbaine dans les pays en développement, cas de Ouagadougou au Burkina Faso*, Thèse de doctorat, Université Paris 8, Vincennes – Saint-Denis, 282p.

Lidberg, W., Nilsson, M., Lundmark, T., & Ågren, A. M. (2017). Evaluating preprocessing methods of digital elevation models for hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 31(26), 4660-4668.

Lindsay, J. B., & Creed, I. F. (2005). Removal of artifact depressions from digital elevation models: towards a minimum impact approach. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(16), 3113-3126.

Lindsay, J. B., & Dhun, K. (2015). Modelling surface drainage patterns in altered landscapes using LiDAR. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(3), 397-411.

Martel, J. M., & Roy, B. (2005). Analyse de la signifiante de diverses procédures d'agrégation multicritère. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 43(3), 221-245.

McBean, G., & Ajibade, I. (2009). Climate change, related hazards and human settlements. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(2), 179-186.

Montoroi, J. P. (2012, March). Rôle des sols sur la génèse des inondations. In *Publications du symposium européen sur les problèmes actuels de la protection contre les inondations de mars..*

Murphy, P. N., Ogilvie, J., Meng, F. R., & Arp, P. (2008). Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(12), 1747-1754.

OUEDRAOGO H & al. (2024) « Influence de la dynamique de l'utilisation des terres sur le fleuve Mouhoun au Burkina Faso », *Revue Internationale du chercheur* « Volume 5 : Numéro 1 » pp: 849-867

Poggio, L., & Soille, P. (2012). Influence of pit removal methods on river network position. *Hydrological Processes*, 26(13), 1984-1990.

Rahm U. H. (1954). *La Côte d'Ivoire, centre de recherches tropicales*. Verlag für Recht und Gesellschaft AG.,

RCI (République de Côte d'Ivoire) (2015). *Rapport d'évaluation des capacités nationales pour la réduction des risques, la préparation et la réponse aux urgences en Côte d'Ivoire*,

Rapport Ministère de l'Environnement, de la Salubrité Urbaine et du Développement Durable (MESUDD), 85 p.

Robert J. (2012). *Pour une géographie de la gestion de crise : de l'accessibilité aux soins d'urgence à la vulnérabilité du territoire à Lima*, Thèse de Géographie, Université de Grenoble, 549 p.

Rode S. (2009), *Au risque du fleuve. La territorialisation de la politique de prévention du risque d'inondation en Loire moyenne*, Thèse de Géographie, Université de Nanterre - Paris X, 481 p.

Simonneaux, V., Cheggour, A., Deschamps, C., Mouillot, F., Cerdan, O., & Le Bissonnais, Y. (2015). Land use and climate change effects on soil erosion in a semi-arid mountainous watershed (High Atlas, Morocco). *Journal of Arid Environments*, 122, 64-75.

Steck, J. F. (2006). Qu'est-ce que la transition urbaine ? croissance urbaine, croissance des villes, croissance des besoins à travers l'exemple africain. *Revue d'économie financière*, 267-283.

Tagini B. (1971). *Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale*. Thèse Université de Lausanne, Société d'Etat pour le Développement Minier de la Cote d'Ivoire, 302 p.

Traoré K. M. & Tamboura A. T. (2023). Dynamique urbaine et productions de vulnérabilités d'une ville littorale de la Côte d'Ivoire, San-Pedro, *RGARDSUDS, Revue de Géographie, d'Aménagement Régional et de Développement des Suds*, Institut de Géographie Tropicale, premier numéro 2016, pp. 47-61.

Traoré K. M. (2016). *Analyse des vulnérabilités de la ville côtière de San-Pedro (sud-ouest de la Côte d'Ivoire)*, Thèse de Doctorat, Géographie, Université Felix Houphouët-Boigny de Cocody, Abidjan, p. 355.

Traoré K. M. (2023). Evaluation à l'aide du SAGA Wetness Index de l'inondabilité dans le District Autonome d'Abidjan, Côte d'Ivoire, *International Journal of Humanities and Social Science Invention (IJHSSI)*, vol. 12, no. 4, 2023, pp. 85-96. Journal DOI- 10.35629/7722

Traoré K. M. (2023). Évaluation du risque d'inondation par intégration du SAGA Wetness Index (SAGAWI) et de l'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP): cas du District Autonome d'Abidjan. *Belgeo. Revue belge de géographie*, no 1, 29 p,

Traoré K. M., Ouattara S. & Kouassi M. A. H.-F. (2023). *Dynamique urbaine et risque pluvial dans la ville d'Arrah au centre-est de la Côte d'Ivoire*, Actes de la deuxième journée d'étude (Abidjan 05 Octobre 2023), Crise de l'eau dans le cadre de vie en Afrique : enjeux, stratégies et solutions durables, PASRES Editions, p. 269-687

Traoré K. M., Yao K. E. et Adou A0 G. (2021). «Re-anthropisation » des espaces vulnérables au risque d'inondation dans la ville de Bouaflé (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire), Actes du colloque international de Géographie, *Géovision, Revue du Laboratoire Africain de Démographie et des Dynamiques Spatiales*, Numéro Hors-série n°2- Tome 3, p. 430-441.



Traoré K. M., Yao K. E. et Adou A0 G. (2019). *Le fait urbain à l'épreuve des effets du réchauffement climatique : exemple de la crue du fleuve Bandaman à Bouaflé (Centre-ouest de la côte d'ivoire)*, Actes du colloque en hommage aux professeurs Bonaventure Maurice MENGHO et Marie-Joseph SAMBA KIMBATA, Baluki, 2019 (3ème année), n°5, Vol. III, juin 2019, pp. 28-45.

Varin M. (2021). *Analyse de l'efficacité de l'indice d'humidité topographique (TWI) à cartographier les milieux humides*, Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de SainteFoy inc. (CERFO). Rapport 2021-13. 28 p.