

Vulnérabilité urbaine face aux inondations en Afrique de l'Ouest: cartographie des enjeux et évaluation des dommages à Abidjan (Côte d'Ivoire) et Saint-Louis (Sénégal)

TOURE Labaly¹, NJEUGEUT MBIAFEU Amandine Carine ², YOUAN TA^{2,3}
Marc, Moussa SOW⁴, Emmanuel Bonnet⁵

¹ (UFR Sciences sociales et environnementales, Département Environnement, Biodiversité et Développement durable, Université du Sine Saloum Elhadj Ibrahima Niass, Kaolack, Senegal) (10 Italic)

²(Centre Universitaire de Recherche Appliquée en Télédétection (CURAT), Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Côte d'Ivoire)

³(Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM), Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire)

⁴(Laboratoire Leidi, Université Gaston Berger de Saint-Louis (UGB). Département de géographie, Saint-Louis, Senegal)

⁵(UMR Prodig, IRD)

RESUME: Les inondations représentent un risque majeur pour les zones urbaines côtières d'Afrique de l'Ouest, entraînant des dommages socio-économiques considérables pour les populations et les infrastructures. Cette étude évalue l'impact des inondations dans les villes de Saint-Louis (Sénégal) et Abidjan (Côte d'Ivoire) en combinant des données de télédétection et une analyse par SIG. La méthodologie repose sur l'exploitation d'une couche binaire permettant d'identifier les zones inondées et non inondées, suivie d'une analyse spatiale croisée pour quantifier les impacts sur les infrastructures, les bâtiments et les terres agricoles. Les résultats montrent que les zones urbaines et les infrastructures sont fortement exposées aux inondations. À Abidjan, entre 5,45 km et 302,9 km de routes ont été affectées selon les dates, avec environ 64 % des surfaces inondées situées dans des zones résidentielles. De plus, les bâtiments impactés couvrent une superficie variante entre 262 036 m² et 2 670 999 m². À Saint-Louis, plus de 5 % des surfaces urbaines ont été touchées à chaque événement, avec des habitations affectées s'étendant sur 764 426 m² à 1 129 906 m², et un réseau routier perturbé sur 39,9 km à 67,1 km. Ces résultats mettent en évidence la vulnérabilité accrue de ces villes face aux inondations, exacerbée par l'urbanisation rapide, l'élévation du niveau de la mer et les infrastructures de drainage insuffisantes. Une planification urbaine intégrée et une amélioration des stratégies d'adaptation aux risques hydrométéorologiques apparaissent essentielles pour réduire les impacts futurs de ces catastrophes.

MOTS-CLÉS-Inondation, Vulnérabilité urbaine, Afrique de l'Ouest, SIG, évaluation des dommages.

ABSTRACT: Flooding represent a major risk to coastal urban areas in West Africa, causing significant socio-economic damage to populations and infrastructure. This study assesses the impact of flooding in the cities of Saint-Louis (Senegal) and Abidjan (Côte d'Ivoire) by combining remote sensing data and GIS analysis. The methodology relies on a binary layer to identify flooded and non-flooded areas, followed by a cross-spatial analysis to quantify impacts on infrastructure, buildings, and agricultural land. The results reveal that urban areas and infrastructure are highly exposed to flooding. In Abidjan, between 5.45 km and 302.9 km of roads were affected depending on the dates, with approximately 64% of flooded areas located in residential zones. Additionally, impacted buildings cover an area ranging from 262,036 m² to 2,670,999 m². In Saint-Louis, over 5% of urban areas were affected during each event, with impacted housing covering 764,426 m² to 1,129,906 m², and disrupted road networks spanning 39.9 km to 67.1 km. These results highlight the growing vulnerability of these cities to flooding, exacerbated by rapid urbanization, sea-level rise, and inadequate drainage infrastructure. Integrated urban planning and improved adaptation strategies for hydrometeorological risks are essential to reduce the future impacts of such disasters.

KEYWORDS -Flooding, Urban vulnerability, West Africa, GIS, damage assessment, Damage assessment

Date of Submission: 11-03-2025

Date of acceptance: 24-03-2025

I. INTRODUCTION

Les inondations sont l'un des phénomènes naturels les plus récurrents et destructeurs dans le monde, exacerbant la vulnérabilité des zones urbaines, en particulier dans les pays en développement [1]. En Afrique de l'Ouest, les villes côtières comme Abidjan (Côte d'Ivoire) et Saint-Louis (Sénégal) sont confrontées à une vulnérabilité croissante face aux inondations, en raison de l'intensification des précipitations, de l'élévation du niveau de la mer et de l'urbanisation non planifiée [2] [3] [4]. Ces deux métropoles sont régulièrement affectées par des inondations aux conséquences socio-économiques et environnementales majeures, liées à leur situation géographique, aux dynamiques hydrologiques locales et aux effets du changement climatique [5].

L'augmentation des inondations dans ces villes soulève une question scientifique et opérationnelle centrale : Quels sont les impacts des inondations sur les infrastructures et les populations en termes de superficie touchée, de bâtiments endommagés et de routes affectées, et comment une approche de cartographie spatiale peut-elle contribuer à une meilleure gestion des risques ? Cette question s'inscrit dans un contexte où les stratégies d'adaptation aux inondations restent limitées en Afrique de l'Ouest, malgré l'urgence de développer des approches méthodologiques robustes pour l'identification des zones inondables, l'estimation des dommages et l'aide à la prise de décision en matière d'aménagement urbain et de résilience climatique [6].

Plusieurs études ont mis en évidence l'intérêt d'une approche spatiale basée sur des séries d'images temporelles pour suivre l'évolution des inondations [7] [8] [9]. Cette étude s'inscrit dans la continuité de ces travaux en proposant une méthodologie intégrée qui combine une couche binaire des zones inondées [7] et une analyse spatiale croisée pour quantifier les dommages sur les infrastructures critiques, les bâtiments et les terres agricoles. Elle vise à cartographier les zones inondées à Abidjan et Saint-Louis, puis à évaluer les impacts des inondations en termes de superficie touchée, de bâtiments endommagés et de routes affectées.

Les résultats de cette recherche permettront d'obtenir une vision détaillée des impacts des inondations dans ces deux métropoles et de proposer des solutions pour une gestion plus efficace du risque hydrologique, contribuant ainsi à renforcer la résilience urbaine face aux inondations en Afrique de l'Ouest [10].

II. MÉTHODOLOGIE

Cette étude s'appuie sur une approche méthodologique intégrant l'exploitation de données géospatiales et l'utilisation d'outils avancés d'analyse spatiale afin d'identifier, caractériser et cartographier les enjeux exposés aux inondations. La méthodologie adoptée repose sur une structuration qui va de la collecte des données, l'extraction des classes d'enjeux et des zones inondées, l'analyse spatiale croisée à l'évaluation des impacts sur les classes d'enjeux.

2.1 Présentation de la zone d'étude

Saint-Louis (Fig. 1 a) est une ville fluviale et côtière située à l'embouchure du fleuve Sénégal, sur une plaine alluviale de basse altitude. Sa configuration géographique unique, associée aux crues du fleuve, aux submersions marines et à l'érosion côtière, en fait une zone particulièrement exposée aux inondations récurrentes [11] [3]. Son développement urbain s'est structuré autour de plusieurs îles et de la Langue de Barbarie, une étroite bande de sable qui joue un rôle crucial dans la protection contre les intrusions marines. Cependant, cette barrière naturelle est fragilisée par l'érosion côtière et les interventions humaines, comme la brèche ouverte en 2003 pour prévenir les inondations fluviales, qui a aggravé les risques de submersion marine (Diaw et al., 2018). La ville est confrontée à un risque d'inondation récurrent, principalement lié aux crues du fleuve, aux précipitations intenses et à la montée du niveau de la mer [12]. Les quartiers les plus touchés, comme Guet Ndar et Sor, subissent des dommages importants aux habitations, aux infrastructures et aux activités économiques, exacerbant la vulnérabilité des populations locales [2].

Abidjan (Fig.1 b), principale agglomération économique de la Côte d'Ivoire, est localisée sur les rives de la lagune Ébrié et en bordure de l'océan Atlantique. Son expansion rapide s'est souvent faite au détriment d'une planification urbaine adéquate, conduisant à l'occupation anarchique de zones à risque [13]. Les inondations y sont principalement causées par des précipitations extrêmes et un réseau de drainage sous-dimensionné, incapable d'évacuer efficacement les eaux de ruissellement [14]. La période la plus critique s'étend de mai à juillet, coïncidant avec la saison des pluies. Lors des épisodes orageux intenses, des quartiers comme Yopougon, Abobo et Marcory subissent d'importantes accumulations d'eau, souvent aggravées par l'imperméabilisation des sols et la saturation des systèmes de drainage [11]. Par ailleurs, les zones basses situées en périphérie de la ville, notamment celles proches des cours d'eau et des zones humides, sont sujettes à des inondations prolongées [15].

Les conséquences des inondations à Abidjan sont multiples : destruction des habitations, coupures d'axes routiers, perte d'activités économiques et risques sanitaires accrus [13]. Les populations les plus vulnérables sont celles vivant dans des constructions précaires, souvent implantées en zones inondables sans infrastructures de protection adaptées [10]. La gestion des eaux de pluie constitue donc un défi majeur pour les

autorités locales, qui tentent de mettre en place des solutions telles que l'amélioration du drainage urbain et la planification d'aménagements résilients [14].

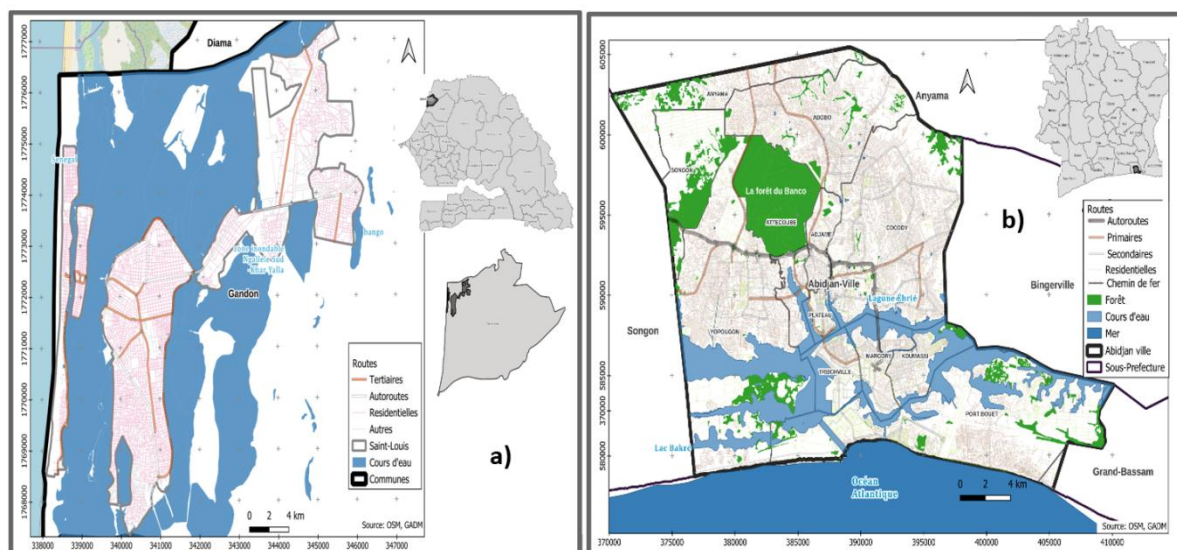


Fig. 1: Situation géographique de la ville de Saint-Louis (a) et Abidjan (b)

2.2 Données et Outils

Cette étude repose sur un ensemble de données variées et complémentaires, provenant de sources ouvertes et de travaux scientifiques récents. Ces données permettent d'analyser de manière précise les impacts des inondations à Saint-Louis et Abidjan, en croisant plusieurs dimensions : occupation du sol, densité de population, infrastructures et zones inondées. Les principales sources utilisées sont les suivantes :

❖ Occupation du sol :

Les données WorldCover de l'Agence spatiale européenne (ESA) fournissent une cartographie détaillée de l'occupation du sol à une résolution de 10 mètres [16]. Ces données permettent d'identifier les surfaces imperméabilisées (zones urbaines, routes) ainsi que les zones naturelles vulnérables (terres agricoles, zones humides), offrant une base essentielle pour comprendre comment l'occupation du sol influence la vulnérabilité aux inondations.

❖ Densité de population :

Les données du Gridded Population of the World (GPW) fournissent des estimations spatialisées de la densité de population à l'échelle locale [17]. Ces données sont utilisées pour évaluer l'exposition des populations aux inondations et identifier les zones où les populations sont les plus à risque.

❖ Réseau routier :

Le réseau routier est cartographié à partir de OpenStreetMap (OSM), une base de données collaborative et open source [18]. Ces informations permettent d'analyser l'impact des inondations sur les infrastructures de transport, en identifiant les routes les plus touchées et les perturbations potentielles pour les déplacements.

❖ Bâtiments :

Les données OpenBuilding recensent les bâtiments avec une précision géographique élevée (Microsoft, 2021). Ces données sont utilisées pour cartographier les espaces bâtis et évaluer l'étendue des dommages causés aux habitations et aux infrastructures lors des épisodes d'inondation.

❖ Zones inondées :

Les travaux de Labaly et al. (2025) fournissent une couche binaire des zones inondées et non inondées, basée sur des images satellitaires et des techniques de *deeplearning*. Ces données servent de référence pour identifier les zones touchées par les inondations à différentes périodes, permettant ainsi une analyse diachronique des tendances et des impacts.

L'étude s'est concentrée sur les périodes indiquées dans le **Tableau 1**, couvrant les différentes zones géographiques. Cette approche permet de comparer les impacts des inondations dans le temps et de mieux comprendre leur évolution spatiale et temporelle.

Tableau 1: Date des évènements historiques des inondations

Dates	Saint Louis		Abidjan
Mai 2024	26/05/2024		28/05/2024
Juin 2024	05/06/2024		2/06/2024
Juillet 2024	10/07/2024	30/07/2024	27/07/2024
Août 2024			06/08/2024

En combinant ces différentes sources, une approche méthodologique robuste est mise en place, croisant analyse spatiale et quantitative. Cette démarche permet non seulement de cartographier les zones à risque, mais aussi de quantifier les impacts des inondations sur les infrastructures, les bâtiments et les populations. Elle est essentielle pour proposer des solutions adaptées et renforcer la résilience des villes face aux inondations.

2.3 Extraction des classes d'enjeux

L'extraction des classes d'enjeux repose sur une méthodologie par filtre attributaire, appliquée aux sources de données géospatiales mentionnées précédemment. Cette approche permet d'isoler les catégories d'occupation du sol et les infrastructures susceptibles d'être affectées par les inondations, en vue de leur analyse spatiale. Voici la démarche suivie pour chaque classe d'enjeux :

❖ Milieu urbain :

À partir de la base WorldCover (ESA)[16], un filtre attributaire a été appliqué pour extraire les zones classées comme surfaces artificialisées (par exemple, les zones résidentielles, commerciales et industrielles). Ces données ont ensuite été converties en couches vectorielles pour faciliter leur intégration dans l'analyse spatiale.

❖ Zones cultivées :

Les terres agricoles ont été identifiées en appliquant un filtre attributaire sur la base WorldCover (ESA)[16], en isolant les classes correspondant aux cultures annuelles et permanentes. Cette extraction a permis de cartographier les zones cultivées vulnérables aux inondations.

❖ Bâtiments :

La classe des bâtiments a été extraite à partir de la base OpenBuilding[19]. Un filtre attributaire a été utilisé pour sélectionner les polygones représentant les infrastructures publiques (écoles, hôpitaux) et privées (résidences, entreprises). Ces données ont été vectorisées pour une analyse spatiale précise.

❖ Réseau routier :

Le réseau routier a été extrait de la base OpenStreetMap (OSM) [18] en appliquant un filtre attributaire sur les éléments correspondant aux routes (par exemple, en utilisant les tags OSM tels que "highway"). Les différentes catégories de routes (nationales, régionales, locales) ont été distinguées pour une analyse détaillée.

Les classes d'enjeux choisies représentent des secteurs critiques pour l'évaluation des risques d'inondation. La population est directement affectée par les inondations en termes de déplacements et de pertes humaines. Le milieu urbain inclut des infrastructures essentielles pour le fonctionnement d'une ville. Les zones cultivées sont un pilier économique dans de nombreuses régions, et les bâtiments sont à la fois des actifs matériels et des lieux de vie pour les populations. L'identification de ces classes permet de quantifier les impacts des inondations sur les secteurs critiques, permettant ainsi une évaluation fine des risques et des dommages potentiels.

Une fois extraites, ces classes d'enjeux ont été croisées avec les cartes des zones inondées pour évaluer leur exposition et leur vulnérabilité. Cette méthodologie permet de quantifier les impacts des inondations sur les secteurs critiques, offrant ainsi une base solide pour l'évaluation des risques et des dommages potentiels.

Les figures 2 et 3 présentent l'emplacement des enjeux dans les différentes zones d'étude, à savoir Abidjan et Saint-Louis. Ces cartes illustrent la répartition de milieu urbain, des bâtiments, des zones cultivées et du réseau routier, qui constituent les classes d'enjeux analysées dans cette étude.

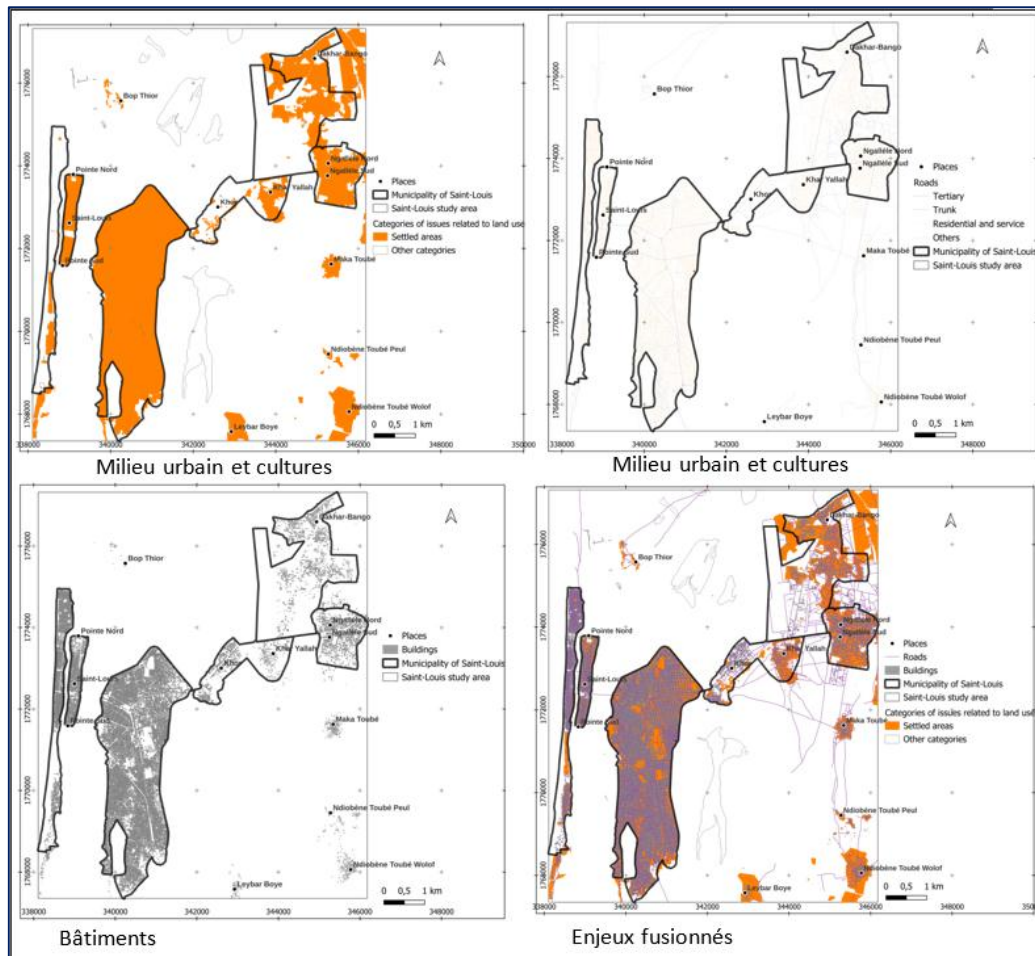


Fig. 2: Emplacement des enjeux dans la ville de Saint Louis

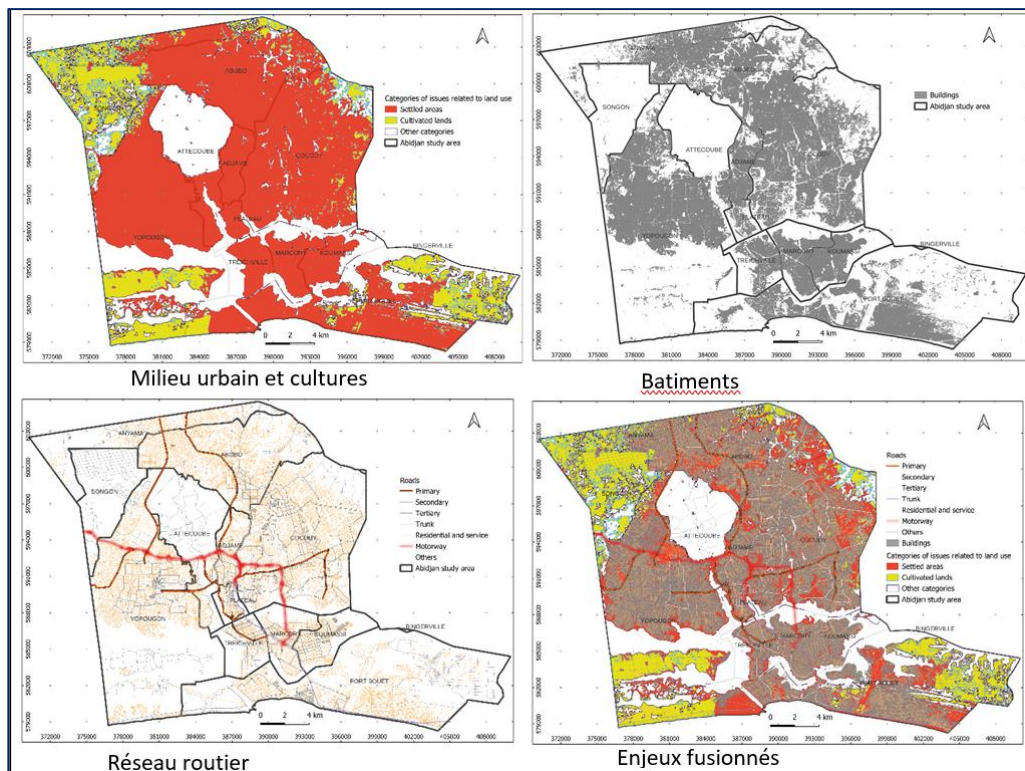


Fig. 3: Emplacement des enjeux dans la ville d'Abidjan

2.4 Méthodologie d'extraction des emplacements des zones inondées

L'extraction des emplacements des zones inondées et non inondées repose sur l'exploitation d'une couche binaire des zones inondées. Cette couche raster, déjà prétraitée, catégorise chaque pixel en deux classes : zones inondées (valeur = 1) et zones non inondées (valeur = 0). L'objectif de cette approche est d'utiliser directement ces informations raster pour quantifier les surfaces impactées et analyser leur répartition spatiale.

La couche binaire a été importée dans Google Earth Engine **sous** son format natif (GeoTIFF) et dans son système de coordonnées respectif (UTM 28N pour Saint-Louis et UTM 30N pour Abidjan). Cette intégration permet une analyse matricielle optimisée.

Pour garantir la compatibilité avec les autres couches de données utilisées dans l'étude, la résolution spatiale a été standardisée à 10 mètres, correspondant à la précision initiale de la couche raster. Un contrôle de qualité a été réalisé pour s'assurer que seules les valeurs **0** (zones non inondées) et **1** (zones inondées) étaient présentes, évitant ainsi les artefacts ou les erreurs de classification. En utilisant les fonctions de zonage raster, la somme des pixels pour chaque classe a été multipliée par la superficie d'un pixel (100 m² pour une résolution de 10 m) afin d'obtenir la superficie totale des zones inondées et non inondées.

Des analyses par fenêtres (focal statistics) ont été appliquées pour évaluer la concentration des zones inondées à différentes échelles spatiales. De plus, l'intersection de la couche raster avec des masques administratifs (communes, quartiers) a permis de quantifier la distribution des inondations par secteur géographique.

2.5 Évaluation des impacts

La méthodologie adoptée pour l'évaluation des dommages se décline en plusieurs étapes, allant de la préparation des classes d'enjeux à l'analyse des impacts des inondations sur ces classes.

2.5.1 Analyse spatiale croisée

Pour une meilleure compréhension des impacts des inondations, les données raster ont été croisées avec plusieurs couches thématiques. Une analyse spatiale par intersection a été réalisée pour superposer les cartes des zones inondées sur les couches des classes d'enjeux (routes, milieu urbain, zones cultivées, bâtiments).

Cette méthode permet d'identifier les portions des classes d'enjeux situées dans les zones inondées pour chaque année étudiée. L'intersection spatiale fournit une estimation précise des surfaces et objets affectés, permettant de quantifier l'impact des inondations en termes de :

- Nombre de personnes touchées,
- Bâtiments endommagés,
- Terres agricoles inondées,
- Milieu urbain impacté.

2.5.2 Calcul des superficies et objets affectés

Les calculs ont permis de quantifier les **superficies affectées** (en hectares pour les zones cultivées et urbaines). Ces calculs ont été réalisés à l'aide des fonctions de traitement de géodonnées disponibles dans les outils SIG, garantissant des résultats reproductibles et standardisés. Cette étape fournit des données quantitatives essentielles pour évaluer les dommages économiques et humains.

2.5.3 Analyse temporelle

L'analyse temporelle a consisté à comparer l'évolution des impacts des inondations sur les différentes classes d'enjeux. Les résultats ont été regroupés et comparés pour identifier des tendances, telles qu'une augmentation progressive des inondations dans certaines zones urbaines ou agricoles.

Les résultats ont été visualisés sous forme de :

- Cartes thématiques représentant les zones affectées pour chaque classe d'enjeux et chaque année,
- Graphiques illustrant les tendances temporelles.

Ces visualisations sont essentielles pour transmettre efficacement les résultats aux parties prenantes et faciliter la prise de décision.

2.5.4 Cartographie finale

Des cartes thématiques synthétiques ont été produites, illustrant les zones affectées pour chaque classe d'enjeux et chaque période. Chaque classe d'enjeux est représentée par une symbologie distincte, facilitant l'identification des impacts dans les différentes catégories (population, milieu urbain, zones cultivées, bâtiments).

Ces cartes servent de support pour :

- La planification des interventions,
- La priorisation des mesures d'atténuation des risques,
- La prise de décisions stratégiques en matière de gestion post-catastrophe.

III. RÉSULTATS

3.1 Cartes des enjeux affectés

Les inondations ont eu un impact significatif sur les infrastructures, les habitations et les secteurs agricoles dans les zones identifiées. En croisant les données de la cartographie des zones inondées avec les couches d'occupation du sol et les infrastructures existantes, il a été possible d'estimer les surfaces et les objets affectés (Figure 4).

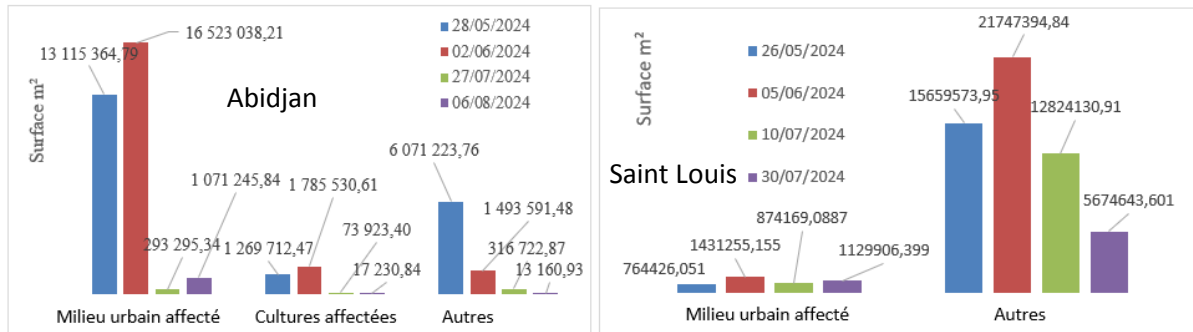


Fig. 4: Impact des inondations à Abidjan et à Saint-Louis

Les figures 5 et 6 illustrent la répartition des enjeux impactés par les inondations aux différentes dates dans les villes d'Abidjan et de Saint-Louis. Ces cartes thématiques permettent de visualiser les zones les plus touchées et de mieux comprendre l'étendue des dommages.

Les résultats montrent l'importance de revoir la gestion des eaux pluviales dans les zones urbaines, notamment par le renforcement des infrastructures de drainage et en développant des solutions fondées sur la nature, comme les bassins de rétention et les espaces verts absorbants.

Les infrastructures routières nécessitent une conception plus résiliente face aux aléas climatiques, avec l'utilisation de matériaux plus adaptés et une meilleure planification du drainage. De plus, des routes alternatives ou des systèmes de transport multimodaux devraient être envisagés pour maintenir la connectivité en cas de coupures majeures dues aux inondations.

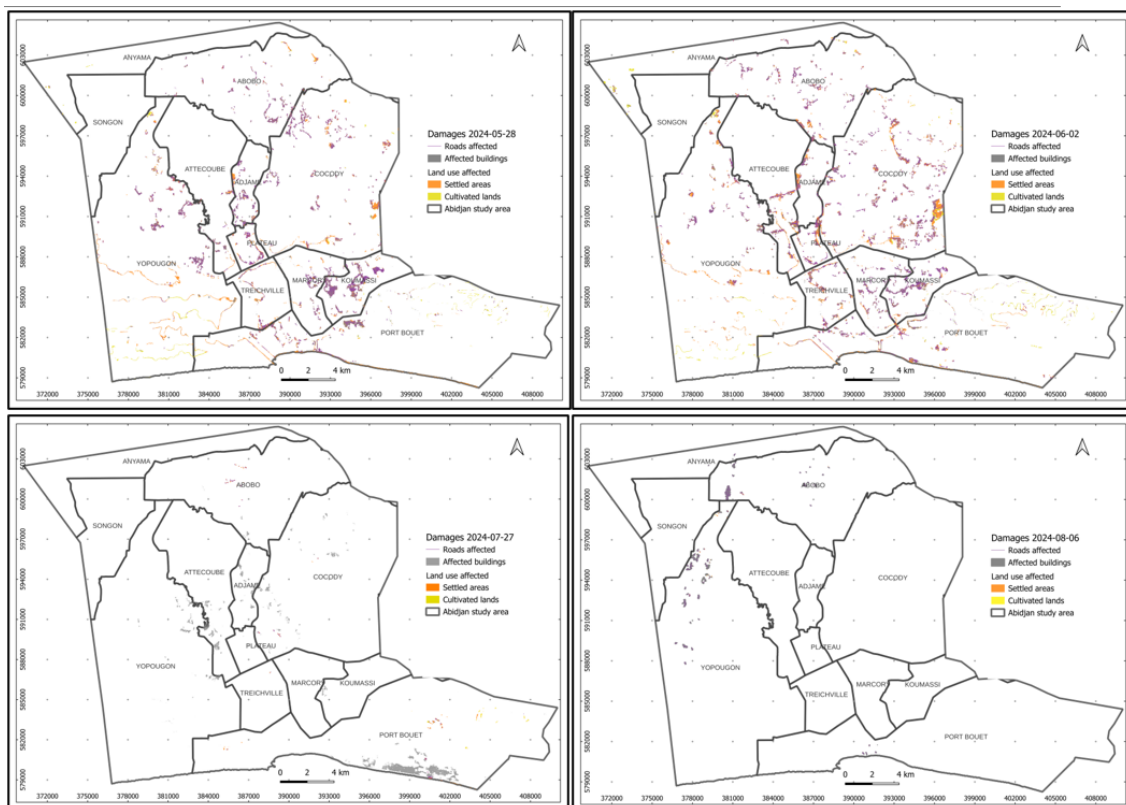


Fig. 5: Cartes des enjeux touchés par les inondations (Abidjan)

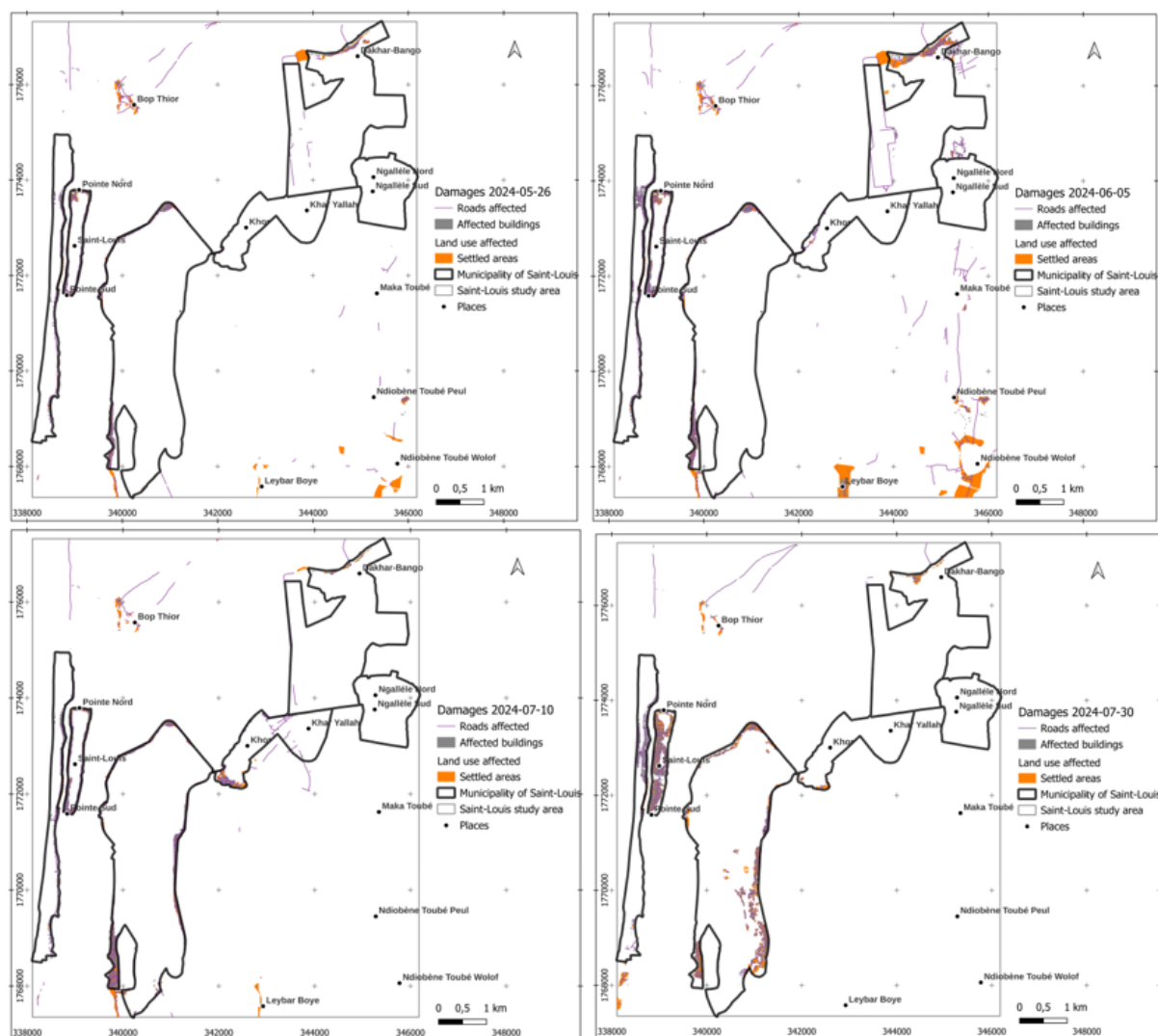


Fig. 6: Cartes des enjeux touchés par les inondations (Saint Louis)

3.1.1 Abidjan

À Abidjan, les résultats montrent que plus de 60 % des surfaces inondées détectées à chaque période d'étude correspondent à des zones d'habitation. Les pourcentages varient selon les dates : 64,1 % le 28 mai, 71,5 % le 2 juin, 42,9 % le 27 juillet et 97,2 % le 6 août 2024 (Tableau 2). Les bâtiments impactés couvrent une superficie variée entre 262 036 m² et 2 670 999 m² selon les dates.

Tableau 2: Enjeux liés à l'occupation du sol impactés par les inondations (Abidjan)

	28/05/2024		02/06/2024		27/07/2024		06/08/2024	
	Sup (m ²)	(%)	Sup (m ²)	(%)	Sup (m ²)	(%)	Sup (m ²)	(%)
Habitats affectés	13 115 364,8	64,1	16 523 038,2	71,5	293 295,3	42,9	1 071 245,8	97,2
Cultures affectées	1 269 712,5	6,2	1 785 530,6	7,7	73 923,4	10,8	17 230,8	1,6
Autres	6 071 223,8	29,7	1 493 591,5	6,5	316 722,9	46,3	13 160,9	1,2
Espace inondé	20 457 151,9	100	23 099 554,5	100	683 941,6	100	1 101 637,6	100
Batiments affectés	2 670 999,21		2 611 748,62		1 608 512,08		262 036,30	

Les infrastructures routières ont également été fortement touchées par les inondations. À Abidjan, environ 222,6 km, 302,9 km, 5,45 km et 20,96 km de routes ont été affectés respectivement le 28 mai, 2 juin, 27 juillet et 6 août 2024 (Tableau 3).

Tableau 3: Réseau routier impacté par les inondations (Abidjan)

Dates	28/05/2024	02/06/2024	27/07/2024	06/08/2024
Routes affectées	222,58 km	302,78 km	5,45 km	20,96 km

3.1.2 Saint-Louis

À Saint-Louis, les résultats révèlent que plus de 5 % des surfaces inondées détectées à chaque période d'étude sont situées dans des zones d'habitation. Les pourcentages varient selon les dates : 4,7 % le 26 mai, 6,2 % le 5 juin, 6,4 % le 10 juillet et 16,6 % le 30 juillet 2024 (Tableau 4). Les bâtiments impactés couvrent une superficie variante entre 149 036 m² et 388 084 m² selon les dates.

Tableau 4: Enjeux liés à l'occupation du sol impactés par les inondations (Saint Louis)

	26/05/2024		05/06/2024		10/07/2024		30/07/2024	
	Sup (m ²)	(%)	Sup (m ²)	(%)	Sup (m ²)	(%)	Sup (m ²)	(%)
Habitats affectés	764426,1	4,7	1431255,2	6,2	874169,1	6,4	1129906	16,6
Autres	15659573,9	95,3	21 668 299,4	93,8	12824130,9	93,6	5674644	83,4
Espace inondé	16424000	100	23 099 554,5	100	13698300	100	6804550	100
Batiments affectés	149036,4908		247088,72		241054,803		388084,052	

Les infrastructures routières ont également été fortement touchées par les inondations. À Saint-Louis, environ 39,9 km, 67,1 km, 55,92 km et 56,36 km de routes ont été impactés respectivement le 26 mai, 5 juin, 10 juillet et 30 juillet 2024 (Tableau 5).

Tableau 5: Réseau routier impacté par les inondations (Saint-Louis)

Dates	26/05/2024	05/06/2024	10/07/2024	30/07/2024
Routes affectées	39,9 km	67,1 km	55,92 km	56,36 km

3.2 Évolution des impacts des inondations : analyse temporelle

L'analyse temporelle des impacts des inondations à Abidjan et Saint-Louis révèle des tendances significatives dans l'évolution des dommages causés aux infrastructures, aux habitations et aux zones agricoles. Cette analyse permet de mieux comprendre l'ampleur des inondations et leur progression au cours des différentes périodes étudiées.

3.2.1 Abidjan

À Abidjan, les résultats montrent une **augmentation progressive des surfaces inondées** touchant les zones résidentielles. En effet, la proportion des zones d'habitation affectées passe de **64,1 %** le 28 mai 2024 à **97,2 %** le 6 août 2024. Cette tendance s'explique par l'intensification des précipitations et la saturation des systèmes de drainage urbain, qui aggravent les inondations dans les quartiers densément peuplés.

Les **bâtiments impactés** présentent également une évolution notable. La superficie des bâtiments endommagés diminue progressivement, passant de **2 670 999 m²** le 28 mai à **262 036 m²** le 6 août. Cette réduction pourrait s'expliquer par une meilleure gestion des eaux pluviales ou par une répartition différente des précipitations au cours de la saison des pluies.

En ce qui concerne le **réseau routier**, les données révèlent une **variabilité importante** dans l'ampleur des dommages. Le 2 juin 2024, **302,9 km** de routes ont été affectés, soit le pic le plus élevé observé. En revanche, le 27 juillet, seulement **5,45 km** de routes ont été touchés, ce qui suggère une forte variabilité spatiale et temporelle des impacts.

3.2.2 Saint-Louis

À Saint-Louis, l'analyse temporelle met en évidence une **augmentation des surfaces inondées** dans les zones d'habitation. La proportion des habitations affectées passe de **4,7 %** le 26 mai à **16,6 %** le 30 juillet 2024. Cette progression est liée à la combinaison des crues du fleuve Sénégal et des submersions marines, qui exacerbent les inondations dans les quartiers côtiers.

Les **bâtiments impactés** montrent également une tendance à la hausse, avec une superficie touchée passant de **149 036 m²** le 26 mai à **388 084 m²** le 30 juillet. Cette augmentation reflète la vulnérabilité croissante des infrastructures face aux inondations récurrentes.

Pour le **réseau routier**, les résultats indiquent une **progression des dommages** au fil des périodes. Le 5 juin 2024, **67,1 km** de routes ont été affectés, marquant le pic le plus élevé. Cependant, les impacts restent significatifs tout au long de la saison des pluies, avec **56,36 km** de routes touchées le 30 juillet.

3.2.3 Tendances générales

L'analyse temporelle révèle des **tendances communes** aux deux villes :

- Une **augmentation des surfaces inondées** dans les zones résidentielles, soulignant la vulnérabilité des populations urbaines face aux inondations.
- Une **variabilité des impacts sur les infrastructures routières**, avec des pics de dommages liés aux épisodes de pluies intenses.
- Une **progression des dommages aux bâtiments** à Saint-Louis, contrairement à une diminution observée à Abidjan, ce qui pourrait refléter des différences dans les stratégies de gestion des eaux pluviales ou dans l'intensité des précipitations.

Ces résultats mettent en lumière la nécessité de renforcer les infrastructures de drainage et d'adopter des mesures d'adaptation pour réduire les impacts futurs des inondations. La planification urbaine doit prendre en compte ces tendances pour améliorer la résilience des villes face aux aléas climatiques.

IV. DISCUSSION

Les résultats de cette étude mettent en lumière l'impact significatif des inondations sur les infrastructures, les habitations et les zones agricoles dans les villes de Saint-Louis et Abidjan. Cette discussion vise à replacer ces résultats dans le contexte des recherches antérieures, à en évaluer la pertinence et les limites, et à proposer des pistes d'amélioration pour la gestion des risques d'inondation.

4.1 Choix des classes d'enjeux

Les classes d'enjeux choisies représentent des secteurs critiques pour l'évaluation des risques d'inondation. En effet :

- **La population** est directement affectée par les inondations, que ce soit en termes de déplacements, d'accès aux services ou de pertes humaines.
- **Le milieu urbain** inclut des infrastructures essentielles pour le fonctionnement des villes, dont la perturbation peut avoir des conséquences socio-économiques majeures.
- **Les zones cultivées** constituent un pilier économique dans de nombreuses régions, et leur destruction peut compromettre la sécurité alimentaire et les moyens de subsistance des populations.
- **Les bâtiments** représentent à la fois des actifs matériels et des lieux de vie, dont la vulnérabilité aux inondations doit être évaluée avec précision.

L'identification et l'analyse de ces classes permettent de quantifier les impacts des inondations sur les secteurs critiques, offrant ainsi une base solide pour l'évaluation des risques et des dommages potentiels.

4.2 Comparaison avec les études antérieures

Les résultats obtenus confirment plusieurs tendances observées dans la littérature sur les inondations en Afrique de l'Ouest. À **Saint-Louis**, les inondations sont principalement causées par les crues du fleuve Sénégal, l'élévation du niveau de la mer et l'érosion de la Langue de Barbarie [2] [11]. Nos résultats montrent que **4,7 % à 16,6 %** des surfaces inondées correspondent à des zones d'habitation, un chiffre comparable aux analyses de Sy et al. (2016) [3], qui ont observé une augmentation progressive de la vulnérabilité urbaine face aux inondations.

À **Abidjan**, l'urbanisation rapide et l'imperméabilisation des sols ont fortement contribué à l'intensification des inondations urbaines, un constat également mis en évidence par World Bank (2020) [13]. Nos analyses révèlent que **64 % à 97,2 %** des surfaces inondées concernent des zones résidentielles, ce qui corrobore les travaux antérieurs soulignant la nécessité d'une meilleure gestion des eaux pluviales et d'une planification urbaine plus résiliente [11].

En ce qui concerne les infrastructures routières, les résultats montrent que 222,6 km à 302,9 km de routes ont été affectés à Abidjan, et entre 39,9 km et 67,1 km de routes ont été inondées à Saint-Louis. Ces chiffres sont similaires à ceux obtenus dans des études précédentes utilisant des modèles hydrologiques pour prédire l'impact des inondations sur les infrastructures urbaines [20].

4.3 Analyse spatiale et temporelle

L'analyse spatiale a révélé des différences notables dans la distribution et l'intensité des inondations entre Saint-Louis et Abidjan. À Abidjan, les résultats montrent que 64,1 % à 97,2 % des zones inondées concernent des espaces résidentiels, indiquant une forte exposition des populations aux risques hydrologiques. Cette tendance est conforme aux conclusions de World Bank (2020) [13], qui souligne que l'urbanisation rapide de la capitale économique ivoirienne s'est accompagnée d'une occupation anarchique des zones inondables.

À Saint-Louis, les inondations sont majoritairement concentrées dans les plaines alluviales et les quartiers côtiers, tels que Bop Thior et Dakhar-Bango, où l'érosion côtière et la montée du niveau de la mer

exacerbent les impacts des inondations. Nos résultats sont en accord avec les observations de Kane & Traoré (2017) [11], qui mettent en avant la fragilité de cette ville face aux submersions marines.

L'analyse temporelle a permis d'identifier une **augmentation progressive des impacts** dans les deux villes, notamment en ce qui concerne les zones résidentielles et les infrastructures routières. Cette tendance souligne l'urgence de renforcer les mesures d'adaptation pour faire face aux inondations récurrentes.

Pour les infrastructures routières, les résultats indiquent la nécessité d'adopter des matériaux plus résistants aux inondations et de développer des itinéraires alternatifs pour minimiser l'impact des crues sur la mobilité urbaine. Ces recommandations s'inscrivent dans les stratégies de résilience urbaine prônées par la Banque Mondiale et d'autres institutions engagées dans la lutte contre les effets du changement climatique.

V. CONCLUSION

Cette étude a permis d'établir une cartographie précise des zones inondées à Saint-Louis et Abidjan, mettant en évidence les dynamiques d'extension et de concentration des phénomènes d'inondation. En combinant des données de télédétection, des analyses SIG et une approche spatiale croisée, nous avons pu identifier les zones les plus vulnérables et quantifier les impacts des inondations sur les infrastructures, les habitations et les terres agricoles.

Les résultats montrent que les zones résidentielles sont particulièrement exposées, avec 64 % à 97,2 % des surfaces inondées à Abidjan et 4,7 % à 16,6 % à Saint-Louis correspondant à des zones d'habitation. Les infrastructures routières ont également été fortement impactées, avec des dommages variants entre 222,6 km et 302,9 km de routes à Abidjan et entre 39,9 km et 67,1 km à Saint-Louis. Ces chiffres soulignent l'urgence d'une meilleure gestion des eaux pluviales et d'une planification urbaine plus résiliente.

Cette étude offre des éléments essentiels pour une meilleure planification urbaine et la mise en place de stratégies d'adaptation face aux inondations récurrentes. À Saint-Louis, il est impératif de renforcer les digues et de stabiliser la Langue de Barbarie pour limiter l'impact des submersions marines. À Abidjan, l'accent doit être mis sur l'amélioration des systèmes de drainage et la mise en place de zones tampons naturelles, telles que des bassins de rétention et des espaces verts absorbants.

L'étude sur la Vulnérabilité urbaine face aux inondations en Afrique de l'Ouest : cartographie des enjeux et évaluation des dommages à Abidjan (Côte d'Ivoire) et Saint-Louis (Sénégal), contribue à une meilleure compréhension des impacts des inondations dans les villes côtières d'Afrique de l'Ouest. Les résultats obtenus offrent des éléments essentiels pour la planification urbaine et la mise en place de stratégies d'adaptation face aux inondations récurrentes. Cependant, des efforts doivent être poursuivis pour améliorer la résolution des données, affiner les modèles prédictifs et intégrer davantage de paramètres socio-économiques pour une évaluation plus précise des risques.

La collaboration entre chercheurs, décideurs politiques et citoyens s'avère primordiale pour traduire ces résultats en actions concrètes et ainsi minimiser les impacts socio-économiques des catastrophes naturelles sur ces territoires vulnérables.

REFERENCES

- [1]. Jha, A. K., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). *Cities and Flooding: A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century*. World Bank Publications.
- [2]. Diagne, K. (2007). *Gestion des risques d'inondation en milieu urbain : cas de la ville de Saint-Louis du Sénégal*. Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar.
- [3]. Sy, B., Frischknecht, C., Dao, H., & Consuegra, D. (2016). *Flood risk assessment in West Africa: Challenges and opportunities*. *Natural Hazards*, 83(1), 1-18.
- [4]. IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- [5]. Nicholls, R. J., Wong, P. P., Burkett, V. R., Codignotto, J. O., Hay, J. E., McLean, R. F., ... & Woodroffe, C. D. (2007). *Coastal systems and low-lying areas*. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability* (pp. 315-356). Cambridge University Press.
- [6]. Douglas, I., Alam, K., Maghenda, M., McDonnell, Y., McLean, L., & Campbell, J. (2008). *Unjust waters: Climate change, flooding and the urban poor in Africa*. *Environment and Urbanization*, 20(1), 187-205.
- [7]. Labaly, T., Touré, N., & Diop, A. (2024). *Cartographie des zones inondées par télédétection et SIG : cas de Saint-Louis et Abidjan*. *Revue de Géomatique Appliquée*, 12(3), 45-60.
- [8]. Kettner, A. J., Brakenridge, G. R., & Schumann, G. J.-P. (2018). *The role of remote sensing in flood monitoring and management*. In *Flood Monitoring through Remote Sensing* (pp. 1-22). Springer.
- [9]. Schumann, G. J.-P., Brakenridge, G. R., Kettner, A. J., Kashif, R., & Niebuhr, E. (2018). *Assisting flood disaster response with Earth observation data and products: A critical assessment*. *Remote Sensing*, 10(8), 1230.
- [10]. UN-Habitat (2014). *The State of African Cities 2014: Re-imagining Sustainable Urban Transitions*. United Nations Human Settlements Programme.
- [11]. Kane, C., & Traoré, A. (2017). *Inondations urbaines en Afrique de l'Ouest : vulnérabilité et stratégies d'adaptation*. Éditions Universitaires Africaines.
- [12]. Diaw, A. T., Sané, T., & Ndour, N. (2018). *Impacts de la brèche de la Langue de Barbarie sur la dynamique côtière et les risques d'inondation à Saint-Louis (Sénégal)*. *Revue de Géographie du Laboratoire Leïdi*, 20, 45-60.
- [13]. World Bank (2020). *Urban Flooding in Abidjan: Challenges and Solutions*. World Bank Group.

- [14]. Kouassi, K. L., Kouamé, K. J., & Ahoussi, K. E. (2018). *Gestion des inondations urbaines à Abidjan : défis et perspectives*. Journal of Water Resource and Protection, 10(5), 543-556.
- [15]. Kouamé, K. J., Kouassi, K. L., & Dibi, B. (2019). *Analyse des facteurs d'inondation dans la ville d'Abidjan : cas du quartier de Yopougon*. Revue Ivoirienne de Géographie des Savanes, 4(2), 12-28.
- [16]. ESA (2021). *WorldCover*. Agence spatiale européenne.
- [17]. CIESIN (2018). *Gridded Population of the World (GPW)*. Center for International Earth Science Information Network.
- [18]. Haklay, M., & Weber, P. (2008). *OpenStreetMap: User-Generated Street Maps*. IEEE Pervasive Computing, 7(4), 12-18.
- [19]. Microsoft (2021). *OpenBuilding*. Microsoft.
- [20]. Di Baldassarre, G., Montanari, A., Lins, H., Koutsoyiannis, D., Brandimarte, L., & Blöschl, G. (2010). *Flood fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation*. GeophysicalResearchLetters, 37(22), L22402.