

Simulation numérique des inondations côtières d'Assinie à l'aide du modèle EBTM-SIG

Jacques André TIEMELE*, Affouka Franck Désiré TANOH et Hervé Brice Abaka MOBIO

Université Félix HOUPHOUET-BOIGNY de Cocody, Laboratoire de Télédétection et des Systèmes d'Information Géographique (LATSIG), Abidjan, 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

(Reçu le 31 Mars 2025 ; Accepté le 07 Mai 2025)

* Correspondance, courriel : jatiemele@yahoo.fr

Résumé

Cette étude a pour but d'apporter des réponses précises aux inondations côtières actuelles et futures de la zone d'Assinie à partir du modèle eBTM. Pour ce faire, des données satellitaires morphologiques associées aux données météo-marines de la zone d'Assinie ont été utilisées entre 2016 et 2023. Le traitement numérique des données a été effectué par ré-échantillonnage et par la méthode d'interpolation bilinéaire pour le calcul des modèles numériques. Elles ont servi de données d'entrée dans le modèle eBTM, de sorte à réaliser des scénarii sous la forme de couches raster d'inondation. Les résultats ont permis de montrer qu'à l'heure actuelle, 127,9 ha sont exposés aux inondations, affectant 1 137 personnes et 1 806 bâtiments. D'ici la fin du siècle, il faudrait s'attendre à des augmentations de 25 %, 53 % et 90 % des zones inondées actuelles. La répartition spatiale de l'exposition montre qu'Assinie Mafia 2 est la zone la plus vulnérable, suivie d'Assinie Mafia 1 et d'Assinie France. Ces informations sont cruciales pour une gestion des risques actuels et futurs d'inondation dans la région d'Assinie et ce, afin d'orienter les prises de décision.

Mots-clés : *eBTM, scénarii, modèles numériques, exposition, Assinie.*

Abstract

Numerical simulation of Assinie coastal floods using EBTM-SIG model

The purpose of this study is to provide specific answers to the current and future coastal floods in the Assinie area from the eBTM model. To do this, morphological satellite data associated with weather data in the Assinie area were used from 2016 to 2023. Digital data processing was carried out by re-sampling and by the Bilinear Interpolation Method for the calculation of digital models. They served as input data into the eBTM model, so as to achieve scenarios in the flood raster layer forms. The results made it possible to show that currently, 127.9 ha are exposed to floods, affecting 1,137 people and 1,806 buildings. By the end of the century, increases of 25 %, 53 % and 90 % of current flood zones should be expected. The spatial distribution shows that Assinie Mafia 2 is the most vulnerable area, followed by Assinie Mafia 1 and Assinie France. This information is crucial for current and future risk management of flooding in the Assinie region, in order to guide decision making.

Keywords : *eBTM, Scenarios, exposition, Assinie.*

1. Introduction

Les inondations côtières, souvent provoquées par des tempêtes et des élévations soudaines du niveau de la mer, submergent temporairement ou de manière permanente les zones côtières. Ces événements se produisent de façon brusque, rendant difficiles les alertes et l'évacuation des populations. Cela engendre des conséquences considérables sur les infrastructures, les écosystèmes et les habitants [1]. En Afrique de l'Ouest, des pays comme la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Nigeria et le Sénégal sont particulièrement exposés à ces risques, à cause de la combinaison de facteurs naturels (élévation du niveau de la mer, tempêtes) et anthropiques (urbanisation non contrôlée). Par exemple, en Côte d'Ivoire, les événements de précipitations extrêmes se multiplient, aggravant les risques d'inondation dans des villes comme Abidjan. Dans ce cadre, il est impératif de mettre en place des outils de gestion efficaces pour atténuer les effets de ces inondations. La montée du niveau de la mer due au changement climatique d'origine anthropique pourrait avoir des conséquences graves dans les décennies à venir. Selon le Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat [2], la population mondiale exposée aux inondations côtières pourrait passer de 270 millions en 2010 à 350 millions en 2050 [3]. Cette augmentation, couplée à une élévation potentielle du niveau de la mer de 80 cm d'ici 2100, intensifiera les impacts sur les littoraux, avec des coûts économiques énormes estimés à environ 5,3 % du PIB annuel pour les pays d'Afrique de l'Ouest [4]. Dans ce contexte, Assinie, située sur la côte orientale de la Côte d'Ivoire, est une zone particulièrement vulnérable aux inondations côtières. Selon une étude de la Banque mondiale en 2020 [5], la tendance à long terme de l'élévation du niveau de la mer à Assinie pourrait entraîner des inondations plus fréquentes et plus sévères dans les décennies à venir, mettant en danger les infrastructures locales et la sécurité des populations. Cette élévation progressive, qui pourrait atteindre jusqu'à 2 m d'ici 2140 selon certains scénarios, constitue une menace croissante pour cette région côtière. Les vagues et les marées, qui représentent plus de 90 % des variations du niveau de la mer, sont les principaux facteurs responsables de ces inondations [6]. Toutefois, bien que ces phénomènes soient bien documentés dans d'autres zones côtières comme Abidjan, les études spécifiques de modélisation numérique sur Assinie restent rares [7]. Ces insuffisances soulignent la nécessité de mener des recherches approfondies pour mieux comprendre les risques auxquels fait face Assinie afin de proposer des mesures d'adaptation adéquates. Pour ce faire, des outils de simulation numérique tels que le modèle eBTM ont été développés pour prédire les inondations côtières et renforcer la résilience des communautés. C'est un outil accessible, combinant les données géospatiales et de systèmes d'information géographique, ce modèle permettant de visualiser et de simuler efficacement les zones à risque d'inondation [8].

2. Matériel et méthodes

2-1. Localisation de la zone d'étude

La zone d'Assinie, officiellement nommée Assinie-Mafia, est comprise entre les latitudes $5,13^{\circ}$ - $6,43^{\circ}$ N et les longitudes $2,83^{\circ}$ - $3,47^{\circ}$ Ouest. Elle se trouve à environ 94 km au sud-est d'Abidjan, la capitale économique de la Côte d'Ivoire. Cette localité côtière, qui fait partie du département d'Adiaké dans la région du Sud-Comoé, présente une géographie unique : c'est une presqu'île d'une superficie de 77,45 km², bordée au sud par l'océan Atlantique et au nord par un complexe lagunaire, à proximité de la frontière avec le Ghana. Plusieurs études ont exploré cette région, notamment la cartographie des zones côtières vulnérables à l'érosion hydrique et la gestion des zones humides en Côte d'Ivoire [9, 10]. Le complexe lagunaire au Nord d'Assinie-Mafia est constitué de trois lagunes principales : Aby, Tendo, et Ehi. Ce vaste plan d'eau, d'une superficie totale de 424 km², est principalement alimenté par deux rivières côtières, la Bia et le Tanoé. Ces rivières communiquent avec l'océan Atlantique par une passe unique située au niveau du village d'Assinie-Mafia. Ce système hydrologique complexe joue un rôle crucial dans la dynamique écologique et économique de la région, notamment en soutenant la biodiversité locale et les activités de pêche. La *Figure 1* présente la localisation de la zone d'étude.

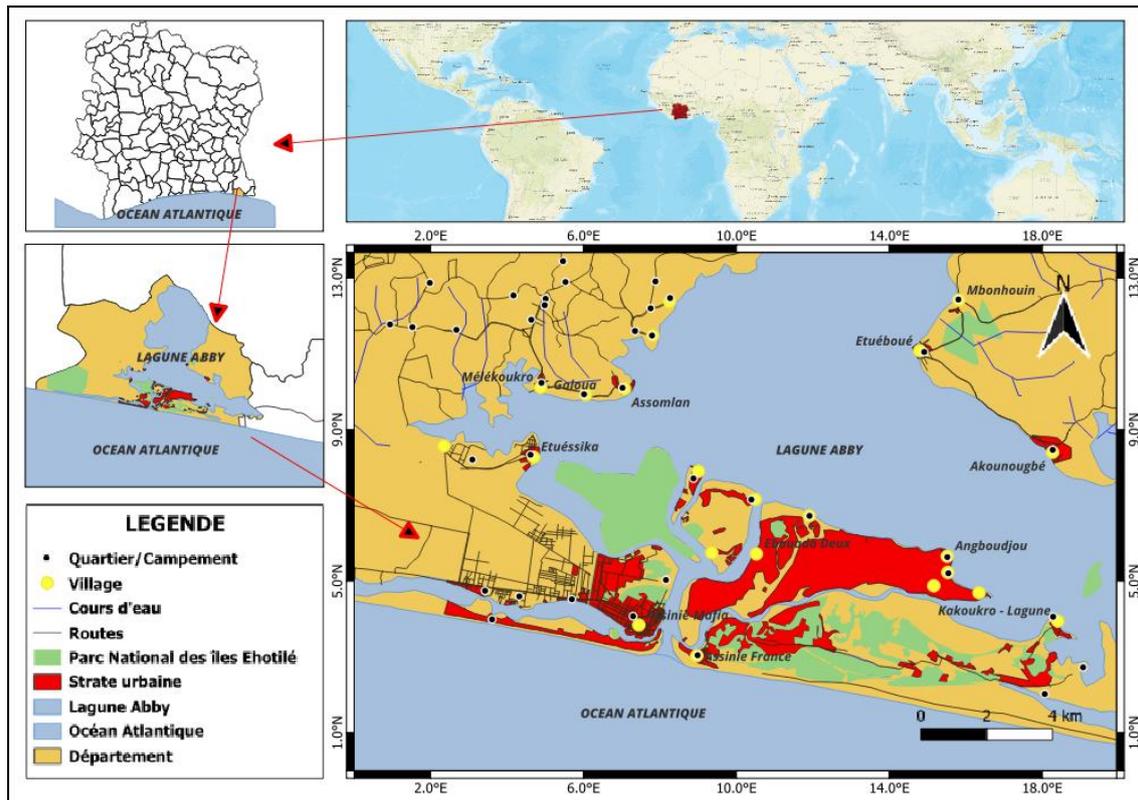


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

2-2. Données satellitaires

Pour mener à bien cette étude, des images satellitaires Sentinel-1 (radar) et Sentinel-2 du programme Copernicus acquises sur le site <https://browser.dataspace.copernicus.eu/> au cours des périodes saisonnières (sèche, transition, petite pluie et grande pluie) de 2016 à 2023 ont été utilisées. Les images Sentinel-1 (radar) ont servi de données d'enquête pour calculer le modèle numérique de plage (MNP) et le coefficient de rugosité (raster de rugosité ou indice de rugosité).

2-3. Occupation du sol et données de population

Afin d'élaborer les cartes d'exposition, des données d'occupation du sol de la zone d'Assinie de la période 2020 ont été obtenues sur le site du geoportail <https://cotedivoire-africa.hub.arcgis.com/app> du BNETD/CIGN. Quant aux données de populations et d'empreinte au sol des bâtiments, elles ont été obtenues respectivement sur les sites <https://apps.worldpop.org/peanutButter/> et <https://sites.research.google/open-buildings/>.

2-4. Données météo-marines

En raison du manque de données locales, les estimations de l'élévation mondiale du niveau de la mer issues du rapport AR6 intitulé Changements climatiques 2021 [11] ont été utilisées. Ce rapport fournit des projections détaillées de l'élévation du niveau de la mer sous divers scénarios climatiques [12]. Concernant l'élaboration des scénarii des niveaux de crues, des données de hauteurs de vagues et de hauteurs de marées ont été acquises sur les sites respectifs <https://browser.dataspace.copernicus.eu/> et <https://maree.shom.fr/> au cours de la période de 2016 à 2023. Différents logiciels ont été utilisés dans cette étude, à savoir les logiciels ESA SNAP pour le traitement des images satellitaires et le logiciel ArcGIS Pro 10.5, compatible avec le modèle eBTM à travers la boîte d'outil « ArccoastTool ».

2-5. Méthodologie adoptée

2-5-1. Traitement numérique des données

Afin d'effectuer les simulations d'inondations à l'aide de l'eBTM, quatre ensembles de données d'entrée ont été analysés, notamment le modèle numérique de plage (MNP), la source d'eau, la rugosité de la surface et le niveau des eaux de crue, au cours de la période 2016-2023. Le modèle numérique de plage, d'une résolution spatiale de 10 m, a été obtenu par ré-échantillonnage et par la méthode d'interpolation bilinéaire après divers prétraitements numériques que sont la calibration, la conversion en décibel, la précision d'orbite et le filtrage. Quant à l'identification de la source d'eau, elle a été faite par une analyse des différentes lignes de côte à l'aide de l'outil "Distance to Hub Line" de QGIS. A cet effet, les courbes de niveau présentant les valeurs les plus basses pour chacun des MNP numérisés ont permis ainsi de déterminer la ligne de côte la plus significative. Relativement au calcul de la rugosité de surface, il a été effectué via les modules « Focal Statistique » de ArcGIS Pro puis « Raster Calculator ». Enfin, concernant l'estimation tendancielle de la variation du niveau de la mer à Assinie, elle a été obtenue à partir des données météo-marines d'Assinie (hauteurs de marée et de vagues, etc.) et des Scénarii Socio-économiques Partagés (SSP) du Sixième Rapport d'Évaluation (AR6) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

2-5-2. Configuration et validation du modèle

Le modèle a été configuré avec l'hypothèse que les ensembles de données d'entrée tels que la topographie, la rugosité de la surface et la source d'eau resteront constants à l'avenir, seul le niveau des eaux de crue changeant au fil du temps. Le résultat de chaque simulation a été produit sous la forme d'une couche raster d'inondation connectée à la côte, indiquant les profondeurs d'eau par rapport au MNP d'entrée pour chaque pixel. L'année 2023 a servi à la validation du modèle. En effet, de fortes tempêtes sont survenues sur les côtes d'Assinie du 10 au 12 Août 2023 (www.sodexam.com), ayant occasionné d'importants dégâts matériels. Une corrélation a donc été faite entre les données simulées des hauteurs d'eau et les données réelles mesurées des niveaux d'eau relevées par la SODEXAM, afin d'estimer le niveau de précision du modèle. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) a été estimée afin de mieux apprécier la qualité du modèle.

3. Résultats

3-1. Variation hydromorphologique de la côte d'Assinie

Le Modèle Numérique de Plage d'Assinie a permis d'enregistrer des pertes de 22 cm d'altitudes entre 2016 et 2018, suivies d'un gain de 18,6 cm en 2020. Il s'en est suivi une perte significative de 32 cm jusqu'en 2022 pour augmenter ensuite de 11 cm jusqu'en 2023. Quant à la ligne de côte, des reculs respectifs de 5,81 m et 2,82 m sont observés entre 2016-2017 et 2017-2018, suivis d'une augmentation de 10,53 m jusqu'en 2020. La ligne de côte baisse à nouveau de 6,46 m en 2021 avant de croître de 7,6 m en 2022 pour atteindre 2,85 m en 2023. Relativement à la rugosité de surface de la côte d'Assinie, les indices présentent une stabilité constante de 0,1 pour les surfaces lisses, 0,5 pour les surfaces modérées et 0,89 pour les surfaces rugueuses. La **Figure 2** présente la variation du Modèle Numérique de Plage, de la ligne de côte et de la rugosité de surface de la côte d'Assinie.

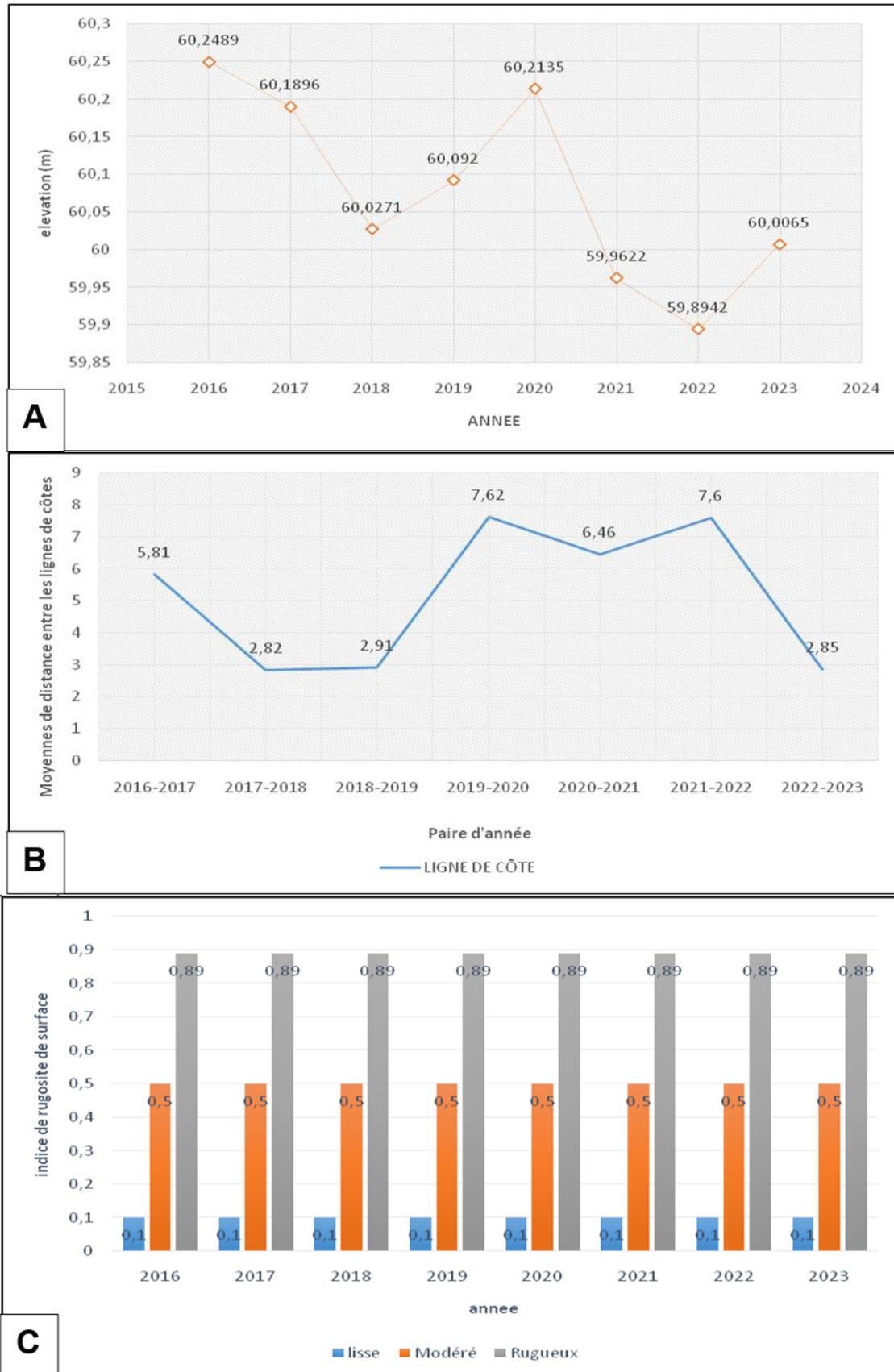


Figure 2 : Variation du Modèle Numérique de Plage (A), de la ligne de côte (B) et de la rugosité de surface (C) de la côte d'Assinie

3-2. Variation des paramètres météo-marins de la côte d'Assinie

Les hauteurs de marée oscillent entre 0,711 m et 0,736 m de 2016 à 2023, avec un pic observable de 0,8 m survenu en 2017. Quant aux hauteurs de vagues, elles diminuent de 2,4 cm entre 2016 et 2021 avant de croître fortement jusqu'en 2023 pour atteindre 1,43 m (*Figure 3*).

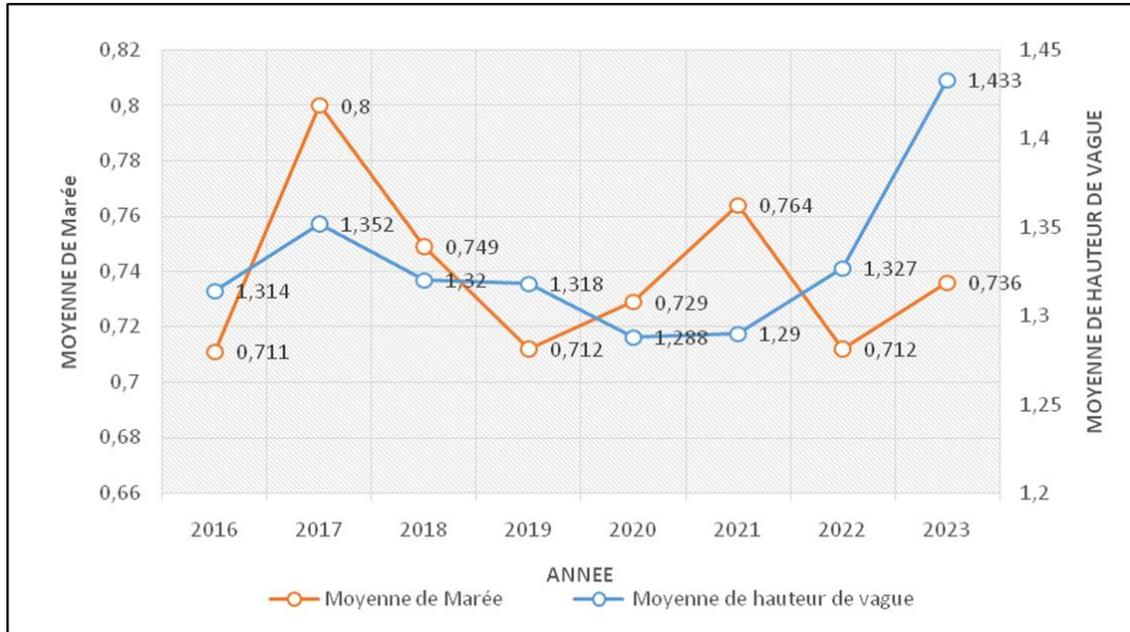


Figure 3 : Variation combinée de la moyenne de Marée et de celle de la hauteur de vague (2016-2023)

3-3. Scénarii d'inondations côtières à Assinie

Les résultats de la simulation numérique montrent qu'en 2023, les surfaces inondées atteignent 127,9 ha. Basées sur un niveau de retour ESL de 100 ans, ces scénarii prévoient une augmentation progressive des inondations au cours des prochaines décennies. D'ici sept ans, il est anticipé que 11 à 25 % des terres seront périodiquement inondées lors d'événements extrêmes liés au niveau de la mer. À l'horizon 2050, l'étendue des inondations côtières pourrait croître de 24 à 54 % par rapport à la situation actuelle. Vers la fin du siècle, sous le scénario SSP2-4.5, les inondations pourraient augmenter jusqu'à 53 %. En particulier, sous le scénario SSP5-8.5, une expansion significative des inondations côtières d'ici 2100, voire le double des inondations actuelles, pourrait se produire, surpassant largement les conditions actuelles (*Figure 4*).

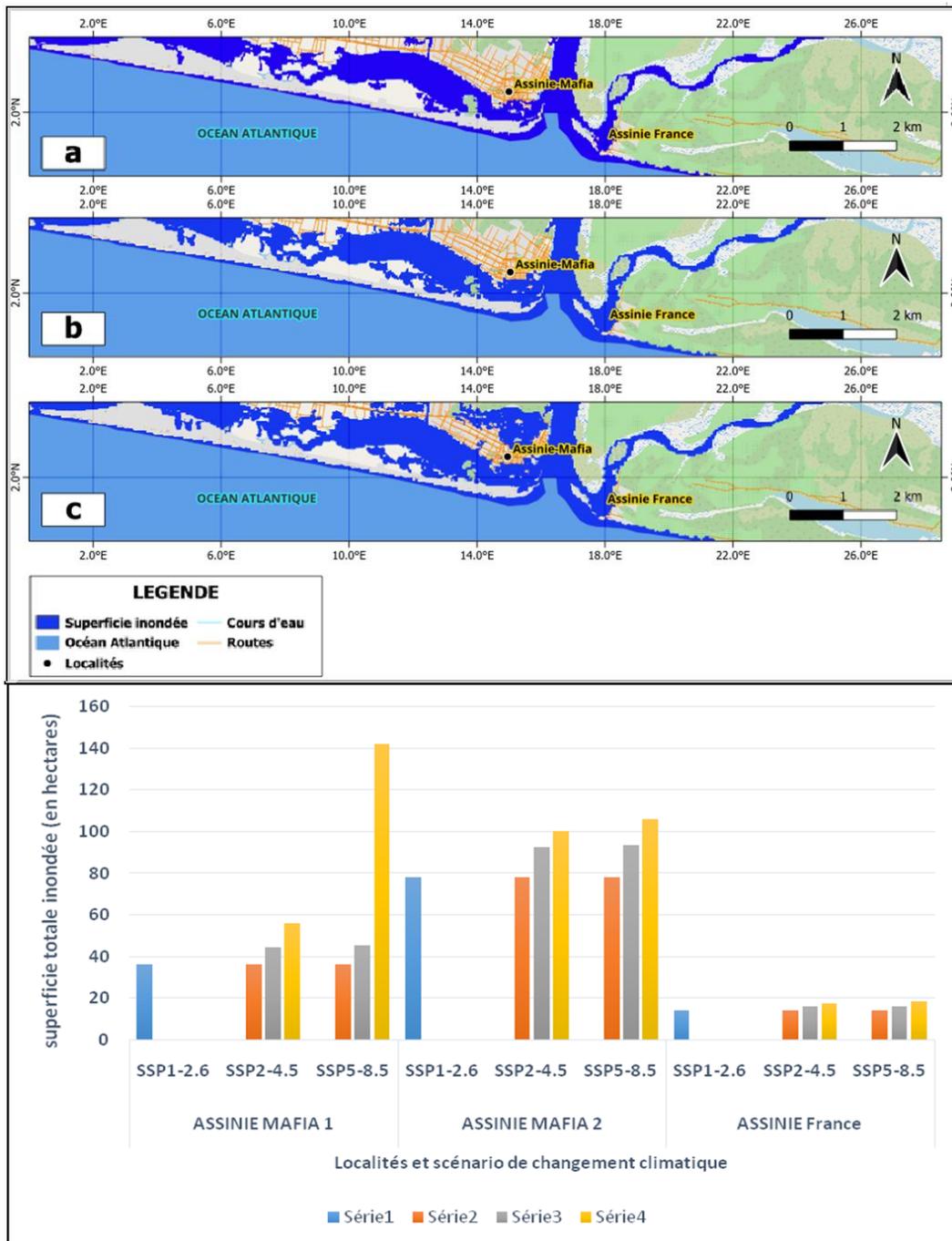


Figure 4 : *Etendue totale des inondations pour les situations présentes et futures dans différentes conditions de changement climatique de la zone d'Assinie. (a)-le SSP1-2.6 (scénario bas : 2023) ; (b)-le SSP2-4.5 (scénario intermédiaire) ; (c)-le SSP5-8.5 (scénario élevé)*

3-4. Exposition des localités aux inondations côtières à Assinie

3-4-1. Nombre d'habitants exposés

A l'analyse des résultats, Assinie France se distingue systématiquement par une exposition moindre aux inondations côtières, quel que soit le scénario ou l'année considérée. Le nombre actuel de personnes exposées étend de 452, devrait augmenter d'environ 30 à 38 % d'ici 2030, avec des projections pour 2100 suggérant une exposition 13 fois supérieure à celle de l'année de référence. Assinie Mafia 1 présente un

niveau d'exposition modérée aux inondations côtières. Le nombre actuel de personnes exposées, s'élevant à 490, indique des trajectoires d'évolution divergentes au fil du temps. D'ici 2030, on anticipe une augmentation de l'exposition de près de 38 % par rapport à la situation de référence (2023), suivie d'une nouvelle hausse de 104 % à l'horizon 2050. À la fin du siècle, sous le scénario SSP5-8.5, la population exposée pourrait atteindre un niveau considérablement plus élevé, soit près de 26 fois le chiffre de 2023. À l'inverse, Assinie Mafia 2 apparaît comme la localité la plus vulnérable, où l'exposition devrait croître d'environ 18 % d'ici 2030, pour atteindre environ 140 à 144 % d'ici 2050, et pourrait potentiellement être multipliée par 18 d'ici la fin du siècle. En somme, cette analyse met en évidence qu'Assinie Mafia 2 est la localité la plus exposée aux risques d'inondation côtière, suivie d'Assinie Mafia 1 et d'Assinie France.

3-4-2. Nombre de bâtiments exposés

À Assinie France, l'exposition des bâtiments augmente de 515 à 518 d'ici 2030, puis augmente de 539 à 541 d'ici 2050, pour culminer entre 567 et 585 à la fin du siècle. À Assinie Mafia 1, le nombre initial de bâtiments exposés, estimé à 747 en 2023, connaît une légère augmentation d'ici 2030 et 2050, avant d'atteindre le nombre de 2244 d'ici 2100 dans le cadre du scénario SSP5-8.5. À Assinie Mafia 2, avec 376 bâtiments exposés initialement, l'on pourrait se retrouver à environ 418 bâtiments d'ici 2100. La **Figure 5** présente le niveau d'exposition des populations et des bâtiments de la zone côtière d'Assinie selon les scénarii actuels et futurs.

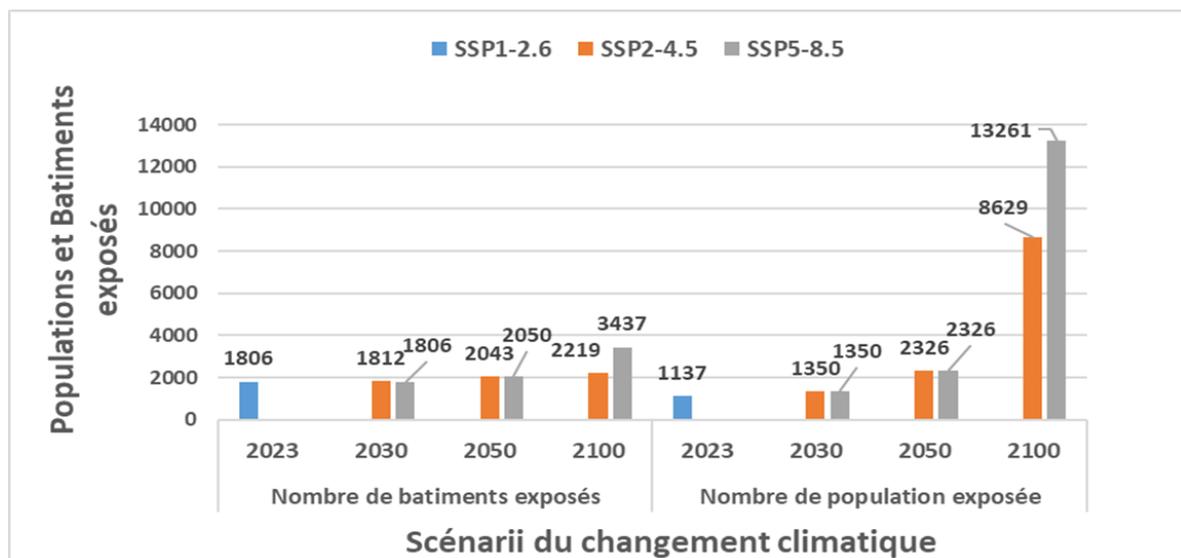


Figure 5 : Nombre de population et de bâtiments exposés de la zone d'Assinie selon différents scénarios de changement climatique pour les périodes actuelles et futures

4. Discussion

La présente étude, menée à l'aide d'une approche basée sur ArcGIS, évalue de manière rigoureuse l'exposition actuelle et future de la zone d'Assinie aux risques d'inondation côtière. Une telle évaluation est cruciale pour la gestion et l'atténuation des risques associés aux inondations côtières, comme le soulignent [13]. Pour ce faire, l'étude a utilisé le modèle de baignoire amélioré (eBTM), une méthode simple mais efficace de cartographie des inondations, qui a produit des résultats significatifs. L'intégration d'un modèle numérique de plage (MNP) de 30 mètres de résolution, généré à partir des données des satellites Sentinel-1, a permis d'affiner l'eBTM avec une très fine précision*, ces MNP étant parmi les plus fiables disponibles

pour la région. Toutefois, il est important de noter que l'utilisation de DEM en open source, avec des résolutions variant entre 30 et 90 m, peut limiter la précision de l'estimation de l'étendue des inondations côtières en raison de diverses erreurs [14]. Les scénarios de niveau de la mer extrême (ESL) dépendants du temps, intégrés dans cette analyse, illustrent l'importance des impacts potentiels du changement climatique sur les inondations côtières à différentes échelles temporelles. Les simulations ont permis non seulement d'identifier les zones potentiellement inondables sous différents scénarios de changement climatique, mais aussi d'estimer le nombre de personnes, de bâtiments susceptibles d'être affectés dans chacun de ces scénarios. Les résultats montrent que la zone d'Assinie est actuellement exposée aux inondations côtières, avec des projections indiquant une augmentation significative de l'étendue des inondations, pouvant potentiellement doubler d'ici 2100 sous le scénario de changement climatique SSP5-8.5. Cette augmentation est principalement attribuable aux caractéristiques topographiques de la région et à l'absence de protection côtière. Les cartes d'inondation générées pour les conditions actuelles et futures du niveau de la mer révèlent une étendue relativement limitée des inondations, confinée à une bande de 2 km le long du littoral. Bien que cette zone inondée ne représente que 12 à 15 % de l'ensemble de la zone d'étude, elle revêt une importance particulière en raison de ses implications pour les communautés côtières et l'utilisation des terres. En croisant ces projections d'inondation avec des données sur la population, les bâtiments et l'utilisation des sols, l'étude offre une compréhension approfondie de l'exposition potentielle aux risques d'inondation côtière dans la zone d'Assinie. L'analyse de l'exposition des populations et des bâtiments aux inondations côtières révèle que la zone d'Assinie est déjà exposée à un nombre considérable de personnes et de structures, avec des risques qui devraient augmenter d'ici 2030, et de manière substantielle d'ici 2100. Cette exposition croissante est en grande partie due à la densité de population et à la concentration des bâtiments le long du littoral, rendant la région particulièrement vulnérable à ces aléas.

De plus, l'analyse de l'affectation des sols montre que les zones résidentielles représentent environ 48 % de l'utilisation des terres exposées, corroborant ainsi les résultats d'études plus larges menées par [7, 15, 16]. Enfin, la répartition spatiale de cette exposition aux inondations montre qu'Assinie Mafia 2 est la localité la plus vulnérable, suivie d'Assinie Mafia 1 et d'Assinie France. Cependant, une augmentation significative des inondations à Assinie Mafia 1 d'ici 2100, dans le cadre du scénario SSP5-8.5, pourrait modifier cet ordre, exposant davantage cette localité aux risques d'inondation. Compte tenu du potentiel d'incertitude inhérent aux estimations présentées dans cette étude, il est impératif de discuter de ces incertitudes afin de reconnaître les limites du travail et d'identifier les domaines de recherche future et les axes d'amélioration possibles. Dans le cadre de cette recherche, les incertitudes peuvent être attribuées à plusieurs sources. L'une d'entre elles est l'absence de variation temporelle dans certains ensembles de données d'entrée, tels que la topographie, la rugosité, les sources d'eau et la répartition de l'utilisation des terres. Bien que ces hypothèses puissent être acceptables à court terme, elles peuvent engendrer des incertitudes significatives dans les estimations à long terme de l'exposition aux inondations côtières. Néanmoins, ces hypothèses ont contribué à simplifier l'analyse de l'environnement côtier de la zone d'Assinie, où des données précises étaient indisponibles. Une autre source d'incertitude provient du processus de validation du modèle. La validation des simulations d'inondations côtières nécessite des données sur les caractéristiques des inondations, recueillies de manière précise et opportune, peu de temps après l'événement [17, 18]. Malheureusement, dans de nombreuses régions côtières, ces données sont rarement disponibles, car les inondations sont peu fréquentes et les informations y afférentes sont souvent insuffisamment documentées, comme l'a souligné [19]. Dans cette étude, les résultats du modèle ont été validés à partir des données d'étendue des inondations côtières observées par les images satellitaires Sentinel-1. Toutefois, la fiabilité de ces données de validation est limitée en raison du décalage temporel entre l'événement d'inondation et la collecte des données. Par conséquent, il est recommandé que les

autorités compétentes explorent de nouvelles méthodes de collecte de données, telles que la science citoyenne (implication du public dans la recherche scientifique), notamment lors d'événements extrêmes. Il est également conseillé d'organiser régulièrement des campagnes de collecte de données avant et après les inondations côtières et de créer une base de données permettant de recueillir des informations temporelles et spatiales sur les événements historiques. La mise en œuvre de ces approches pourrait améliorer la validation des modèles et réduire les incertitudes dans les études sur les inondations côtières le long des côtes ivoiriennes [18 - 20]. L'utilisation d'un modèle numérique de plage (MNP) de 30 m comme donnée d'entrée du modèle constitue une autre source d'incertitude. En effet, la faible résolution de ce type de MNP peut induire des erreurs diverses. Ainsi, il est recommandé d'utiliser des MNP à plus haute résolution, entre 10 et 1 m. De manière générale, l'exposition aux inondations dans les zones urbaines peut être associée à des caractéristiques spécifiques des inondations, telles que la fréquence, la durée, la profondeur, l'étendue et la vitesse de l'eau [21]. Cependant, les caractéristiques à prendre en compte dans l'évaluation de l'exposition peuvent varier en fonction des objectifs de recherche, des méthodes utilisées et de la qualité des données disponibles. Par exemple, [22, 23] considèrent la profondeur de l'inondation comme le principal facteur d'exposition en milieu urbain. À l'inverse, [24] suggère que l'étendue de l'inondation pourrait à elle seule suffire pour identifier les éléments exposés, notamment dans un contexte d'aménagement du territoire. Dans la présente étude, seule l'étendue de l'inondation a été prise en compte dans l'analyse de l'exposition, bien que la profondeur et l'étendue aient été fournies par le modèle eBTM. Cette approche est cohérente avec plusieurs études récentes en gestion des crues [25 - 28]. L'omission de la profondeur des crues dans cette étude repose sur deux raisons principales : le manque de fiabilité des résultats concernant la profondeur des crues, non validés, et la résolution du MNP utilisé, susceptible d'affecter la précision des estimations de profondeur. En raison de ces limitations, l'analyse s'est concentrée sur d'autres paramètres inondatoires, dérivés de manière fiable à partir des données disponibles.

L'intégration des profondeurs d'inondation nécessiterait des données précises et récentes sur l'élévation des terres côtières [29], car des données obsolètes pourraient introduire une incertitude dans l'analyse. Cependant, il est crucial de reconnaître que l'inclusion des profondeurs d'eau aurait pu contribuer à évaluer la gravité de l'exposition. Il convient également de noter que ce travail représente une deuxième tentative d'approcher la question de l'exposition aux inondations côtières le long du littoral ivoirien. Par conséquent, à mesure que des données plus précises et complètes deviennent disponibles, il sera possible d'apporter des améliorations supplémentaires. Pour aller dans ce sens, [29] suggèrent que l'acquisition de données LiDAR, accompagnée de campagnes régulières sur le terrain, serait nécessaire pour améliorer les résultats cartographiques et explorer d'autres aspects de l'exposition aux inondations côtières dans la zone d'Assinie. Les MNT à haute résolution, dérivés du LiDAR, ont en effet démontré une capacité supérieure à cartographier les zones côtières sujettes aux inondations, par rapport à d'autres types de MNT [8, 30]. Les MNT peuvent être subdivisés en modèles numériques de terrain (DTM), également appelés MNT "terre nue", et en modèles numériques de surface (DSM), qui capturent les hauteurs des objets à la surface de la Terre, tels que les bâtiments, les murs et la végétation [31, 32]. Cette étude utilise les données DTM. Cependant, [33] recommandent l'utilisation de DSM, basés sur le principe que les structures solides telles que les bâtiments et les murs peuvent influencer les modèles d'écoulement de l'eau dans les paysages urbains, offrant ainsi une protection aux autres structures. Les DSM permettent également d'identifier les voies d'écoulement lors d'inondations. Dans ce contexte, le modèle eBTM fonctionne mieux avec les DSM qu'avec les DTM, car ces derniers représentent un environnement dégagé pour le mouvement de l'eau. Il apparaît donc clairement que l'utilisation de DSM à haute résolution, dérivés du LiDAR et disponibles pour notre site d'étude, pourrait améliorer considérablement les résultats de cette recherche. Ces données pourraient également contribuer à prédire les futurs changements topographiques [34], essentiels pour mieux estimer l'exposition future aux inondations côtières.

5. Conclusion

Les simulations numériques ont permis d'identifier les zones potentiellement inondables, estimer le nombre de personnes et de bâtiments à risque, et de mieux anticiper les besoins en adaptation. Le modèle eBTM s'est avéré performant pour la modélisation des vagues et des risques d'inondation, malgré certaines limites liées aux résolutions des données de terrain et aux incertitudes dans les projections de l'exposition. Les fluctuations de ces données (élévation du terrain, lignes de côte), entre 2018 et 2022 attestent de la vulnérabilité de la région face aux risques côtiers, exacerbée par l'élévation du niveau de la mer et l'absence de protections adéquates. Ces observations, conjuguées aux projections futures des inondations côtières, soulignent l'importance d'une gestion proactive pour anticiper et atténuer les risques associés, notamment par l'amélioration continue des modèles numériques de terrain et la collecte de données précises. L'utilisation de modèles numériques de surface (DSM), tenant compte des infrastructures humaines, contribuerait à affiner les prévisions d'inondation dans un contexte d'urbanisation croissante. Une intégration accrue de données participatives, telles que la science citoyenne, pourrait également compléter ces analyses en améliorant la validation des modèles et en apportant des informations actualisées lors des événements extrêmes.

Références

- [1] - E. D'ARCY, J. A. TAWN & D. E. SIFNIOTI, Accounting for Climate Change in Extreme Sea Level Estimation, *Water (Switzerland)*, 14 (19) (2022) 1 - 21. <https://doi.org/10.3390/w14192956>
- [2] - Climate Change, Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, (2014) 151
- [3] - B. JONGMAN, P. J. WARD et J. C.J. H. AERTS, Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes, *Glob Environ Chang Human Policy Dimens*, 22 (4) (2012) 823 - 835
- [4] - L. CROITORU, J. M. JUAN et S. MARIA, Le coût de la dégradation des zones côtières en Afrique de l'Ouest : Bénin, Côte d'Ivoire, Sénégal et Togo, Banque mondiale, (2019)
- [5] - WORLD BANK, The effects of climate change on coastal erosion in West Africa : Les effets du changement climatique sur l'érosion du littoral ouest-Africain, World Bank, (2020). Consulté 7 septembre 2024, à l'adresse <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents/reports/documentdetail/241611467990948068/Les-effets-du-changement-climatique-sur-l-erosion-du-littoral-ouest-Africain>
- [6] - A. R. TANO, S. DJAKOURE, S. YAO, Y. KOUADIO et A. AMAN, Characterization of Coastal Flooding Events along Cote d'Ivoire (West Africa), Coastal Education and Research Foundation, *Journal of Coastal Research*, Vol. 39, N° 3 (2023) 494 - 501 p.
- [7] - M. KOUAKOU, J. A. TIEMELE, É. DJAGOUE et K. GNANDI, Assessing potential coastal flood exposure along the Port-Bouët Bay in Côte d'Ivoire using the enhanced bathtub model, IOP Publishing, *Environmental Research Communications*, Vol. 5, N° 10 (2023) 105001 p.
- [8] - B. POULTER and P. N. HALPIN, Raster modelling of coastal flooding from sea-level rise, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 22, N° 2 (2008) 167 - 182 p. <https://doi.org/10.1080/13658810701371858>
- [9] - G. É. AKE, B. H. KOUADIO, M. G. ADJA, J.-B. ETTIEN, K. R. EFFEBI et J. BIEMI, Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), Martin, Claude Physio-Géo, *Géographie physique et environnement*, Vol. 6, (2012) 1 - 42 p.

- [10] - Z. NAJOUÏ, S. RIAZANOFF et N. ABURAJAB, Côte d'Ivoire Post-Conflict Environmental Assessment (Chapter 4 : Forests), *in* : United Nations Environment Programme, (2015) Consulté à l'adresse https://scholar.ppu.edu/bitstream/handle/123456789/8366/UNEP_CDI_PCEA_EN.pdf?sequence=2
- [11] - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC-6), Ocean, Cryosphere and Sea Level Change, Chapter, 9 (2021) Consulté 14 septembre 2024, à l'adresse <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-9/>
- [12] - S. F. SHERPA, M. SHIRZAEI et C. OJHA, Disruptive Role of Vertical Land Motion in Future Assessments of Climate Change-Driven Sea-Level Rise and Coastal Flooding Hazards in the Chesapeake Bay, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 128, N° 4 (2023). e2022JB025993. <https://doi.org/10.1029/2022JB025993>
- [13] - G. M. SARICA, T. ZHU, W. JIAN, E. Y.-M. LO et T.-C. PAN, Spatio-temporal dynamics of flood exposure in Shenzhen from present to future, *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, Vol. 48, N° 5 (2021) 1011 - 1024 p. <https://doi.org/10.1177/2399808321991540>
- [14] - S. P. WECHSLER, Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review, *Copernicus GmbH Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 11, N° 4 (2007) 1481 - 1500 p.
- [15] - S. MUIS, M. VERLAAN, R. J. NICHOLLS, S. BROWN, J. HINKEL, D. LINCKE, A. T. VAFEIDIS, P. SCUSSOLINI, H. C. WINSEMIUS and P. J. WARD, A comparison of two global datasets of extreme sea levels and resulting flood exposure, *Earth's Future*, Vol. 5, N° 4 (2017) 379 - 392 p., <https://doi.org/10.1002/2016EF000430>
- [16] - R. J. NICHOLLS, S. HANSON, C. HERWEIJER, N. PATMORE, S. HALLEGATTE, J. CORFEE-MORLOT, J. CHATEAU et R. MUIR-WOOD, Ranking of the world's cities most exposed to coastal flooding today and in the future, Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, (2007)
- [17] - D. MOLINARI, K. M. DE BRUIJN, J. T. CASTILLO-RODRIGUEZ, G. T. ARONICA and L. M. BOUWER, Validation of flood risk models: Current practice and possible improvements, *Elsevier International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 33, (2019) 441 - 448 p.
- [18] - OPW2019 Flood Data Collector's Handbook, A Practical Guide to Flood Data Collection, (The Stationery Office), (2019) Consulté 14 septembre 2024, <https://www.gov.ie/pdf/?file=https://assets.gov.ie/68892/129b6b7472694038a0b54b1bcaee4dbe.pdf#page=null>
- [19] - P. D. BATES, Remote sensing and flood inundation modeling, *Hydrological Processes*, Vol. 18, N° 13 (2004) 2593 - 2597 p. <https://doi.org/10.1002/hyp.5649>
- [20] - A. O. TAVARES, J. L. BARROS, P. FREIRE, P. P. SANTOS, L. PERDIZ et A. B. FORTUNATO, A coastal flooding database from 1980 to 2018 for the continental Portuguese coastal zone, *Elsevier Applied geography*, Vol. 135 (2021) 102534 p.
- [21] - H. D. DE MOEL, J. VAN ALPHEN et J. C. AERTS, Flood maps in Europe—methods, availability and use, Copernicus Publications Göttingen, *Germany Natural hazards and earth system sciences*, Vol. 9, N° 2 (2009) 289 - 301 p.
- [22] - B. MERZ, A. H. THIEKEN et M. GOCHT, Flood Risk Mapping At The Local Scale : Concepts and Challenges, *in* : S. Begum, M. J. F. Stive, & J. W. Hall (Éd.), *Flood Risk Management in Europe, Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Springer Netherlands, Dordrecht, (2007) 231 - 251 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4200-3_13
- [23] - X. ZHU, Q. DAI, D. HAN, L. ZHUO, S. ZHU et S. ZHANG, Modeling the high-resolution dynamic exposure to flooding in a city region, Copernicus Publications Göttingen, *Germany Hydrology and earth system sciences*, Vol. 23, N° 8 (2019) 3353 - 3372 p.
- [24] - DCLG, Planning Policy Statement 25: Development and Flood Risk, Department for Communities and Local Government London, (2010)

- [25] - K. DANDAPAT et G. K. PANDA, A geographic information system-based approach of flood hazards modelling, Paschim Medinipur district, West Bengal, India, Jamba : *Journal of Disaster Risk Studies*, 10 (1) (2018) 1 - 7 p. <https://doi.org/10.4102/jamba.v10i1.518>
- [26] - V. HADIPOUR, F. VAFAIE et K. DEILAMI, Coastal flooding risk assessment using a GIS-based spatial multi-criteria decision analysis approach, *MDPI Water*, Vol. 12, N° 9 (2020) 2379 p.
- [27] - K. JAFARZADEGAN, D. F. MUÑOZ, H. MOFTAKHARI, J. L. GUTENSON, G. SAVANT et H. MORADKHANI, Real-time coastal flood hazard assessment using DEM-based hydrogeomorphic classifiers, *Copernicus GmbH Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 22, N° 4 (2022) 1419 - 1435 p.
- [28] - S. A. STEPHENS, R. G. BELL et J. LAWRENCE, Applying principles of uncertainty within coastal hazard assessments to better support coastal adaptation, *MDPI Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 5, N° 3 (2017) 40 p.
- [29] - P. J. WARD, M. A. MARFAI, F. YULIANTO, D. R. HIZBARON et J. C. J. H. AERTS, Coastal inundation and damage exposure estimation: a case study for Jakarta, *Natural Hazards*, Vol. 56, N° 3 (2011) 899 - 916 p. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9599-1>
- [30] - D. B. GESCH, Analysis of lidar elevation data for improved identification and delineation of lands vulnerable to sea-level rise, Coastal Education and Research Foundation, *Journal of Coastal Research*, N° 10053 (2009) 49 - 58 p.
- [31] - P. L. GUTH, A. VAN NIEKERK, C. H. GROHMANN, J.-P. MULLER, L. HAWKER, I. V. FLORINSKY, D. GESCH, H. I. REUTER, V. HERRERA-CRUZ et S. RIAZANOFF, Digital elevation models: Terminology and definitions, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Remote Sensing*, Vol. 13, N° 18 (2021) 3581 p.
- [32] - S. R. ROGERS, I. MANNING et W. LIVINGSTONE, Comparing the spatial accuracy of digital surface models from four unoccupied aerial systems: Photogrammetry versus LiDAR, *MDPI Remote Sensing*, Vol. 12, N° 17 (2020) 2806 p.
- [33] - L. L. WILLIAMS and M. LÜCK-VOGEL, Comparative assessment of the GIS based bathtub model and an enhanced bathtub model for coastal inundation, *Journal of Coastal Conservation*, Vol. 24, N° 2 (2020) 23 p. <https://doi.org/10.1007/s11852-020-00735-x>
- [34] - K. ZHANG, D. WHITMAN, S. LEATHERMAN and W. ROBERTSON, Quantification of beach changes caused by Hurricane Floyd along Florida's Atlantic coast using airborne laser surveys, *Journal of Coastal Research*, Vol. 21, N° 1 (2005) 123 - 134 p.