

Cartographie Automatique des Zones Inondées et Evaluation des Dommages dans le District d'Abidjan depuis Google Earth Engine

Youn Ta Marc

Enseignant-Chercheur, Hydrogéologie, Télédétection, Base de Données et WEBSIG, Centre Universitaire de Recherche Appliquée en Télédétection (CURAT), Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire

Njeugeut Mbiafeu Amandine Carine

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

Kamenan Satti Jean-Robert

Doctorant, Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny (EDP-INPHB), Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

Assoma Tchimou Vincent

Enseignant-Chercheur, Hydrogéologie, Télédétection et SIG, Centre Universitaire de Recherche Appliquée en Télédétection (CURAT), Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Jourda Jean Patrice

Enseignant-Chercheur, Télédétection et SIG en Hydrogéologie, Centre Universitaire de Recherche Appliquée en Télédétection (CURAT), Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

[Doi:10.19044/esj.2023.v19n32p54](https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n32p54)

Submitted: 30 September 2023

Accepted: 09 November 2023

Published: 30 November 2023

Copyright 2023 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Youn Ta M., Njeugeut Mbiafeu A.C., Kamenan Satti J.R., Assoma T.V. & Jourda J.P. (2023). *Cartographie Automatique des Zones Inondées et Evaluation des Dommages dans le District d'Abidjan depuis Google Earth Engine*. European Scientific Journal, ESJ, 19 (32), 54.

<https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n32p54>

Résumé

L'objectif de cette étude est de générer automatiquement des cartes de l'étendue des zones inondées dans le district d'Abidjan et d'évaluer les dommages causés. L'approche méthodologique a consisté à cartographier l'étendue des zones inondées en utilisant une méthode de détection des

changements basée sur les données Sentinel-1 (SAR) avant et après une crue spécifique. Ensuite, les différentes classes d'enjeux (telles que les cultures, les zones habitées, les bâtiments, les routes et la densité de la population) ont été extraites à partir de diverses sources de données gratuites. Puis la superficie des enjeux affectés a été évaluée, en superposant les classes d'enjeux sur les zones inondées. De plus, une interface web a été conçue à l'aide des packages de Google Earth Engine. Cette interface web offre à l'utilisateur la possibilité de visualiser l'étendue des zones inondées et les cartes des enjeux affectés, avec une estimation statistique, pour une date donnée dans l'intervalle allant de 2015 à la date actuelle. La cartographie des zones inondées à la date du 25 juin 2020 a révélé une superficie totale de 25219,23 hectares de zones inondées soit 11,50% de la superficie totale du District d'Abidjan. Une estimation des dégâts causés par cette crue indique que 22 307,53 hectares d'enjeux ont été affectés en moyenne, ce qui représente 88,45 % des zones inondées. Cette répartition se décompose en 13 538,49 hectares (soit 53,68 %) de terres agricoles touchées et 8 769,04 hectares (soit 34,77 %) de zones urbaines touchées, impactant en moyenne 35 065 personnes. Les résultats de cette étude ont permis de constater que la partie centrale de la zone d'étude, au-dessus de la lagune, présente le plus grand potentiel de risque d'inondation en raison de la morphologie du terrain et de la vulnérabilité élevée des zones construites qui occupent la plaine inondable.

Mots-clés: Inondation, Intelligence artificielle, Apprentissage automatique, Google earth engine, Sentinel-1, Alos Polsar, Abidjan, Côte d'Ivoire, dommages

Automatic Mapping of Flooded Areas and Damage Assessment in Abidjan District, using Sentinel-1 radar Satellite Imagery from Google Earth Engine

Youn Ta Marc

Enseignant-Chercheur, Hydrogéologie, Télédétection, Base de Données et WEBSIG, Centre Universitaire de Recherche Appliquée en Télédétection (CURAT), Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire

Njeugeut Mbiafeu Amandine Carine

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

Kamenan Satti Jean-Robert

Doctorant, Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny (EDP-INPHB), Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

Assoma Tchimou Vincent

Enseignant-Chercheur, Hydrogéologie, Télédétection et SIG, Centre Universitaire de Recherche Appliquée en Télédétection (CURAT), Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Jourda Jean Patrice

Enseignant-Chercheur, Télédétection et SIG en Hydrogéologie, Centre Universitaire de Recherche Appliquée en Télédétection (CURAT), Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Abstract

The objective of this study is to automatically generate maps of the extent of flooded areas in the Abidjan district and assess the resulting damages. The methodological approach involved mapping the extent of flooded areas using a change detection method based on Sentinel-1 (SAR) data before and after a specific flood event. Subsequently, various classes of assets, such as crops, residential areas, buildings, roads, and population density, were extracted from various free data sources. The affected asset areas were then evaluated by overlaying the asset classes on the flooded areas. Furthermore, a web interface was designed using Google Earth Engine packages. This web interface allows users to visualize the extent of flooded areas and maps of the affected assets, along with statistical estimates, for a specific date within the interval from 2015 to the current date. Mapping of the flooded areas as of June 25, 2020, revealed a total area of 25219.23 hectares of flooded areas, representing 11.50% of the total area of the Abidjan District. An estimation of the damages caused by this flood indicates that, on average, 22307.53 hectares

of assets were affected, accounting for 88.45% of the flooded areas. This distribution breaks down into 13538.49 hectares (53.68%) of affected agricultural lands and 8769.04 hectares (34.77%) of affected urban areas, impacting an average of 35,065 people. The study results revealed that the central part of the study area, located above the lagoon, presents the highest flood risk potential due to the terrain's morphology and the high vulnerability of built-up areas occupying the floodplain.

Keywords: Flooding, Artificial Intelligence, Machine Learning, Google Earth engine, Sentinel-1, Alos Polarsar, Abidjan, Côte d'Ivoire, Damages

1 Introduction

Les zones urbaines de la Côte d'Ivoire sont régulièrement affectées par de fortes crues, en particulier dans le sud du pays (Adje & Kouadio, 2021; Mahaman Bachir et al., 2005). Abidjan, qui abrite la plus forte concentration humaine et des activités économiques du pays, est particulièrement menacée (ALLA et al., 2019). Ces phénomènes se répètent dans la ville et touchent toutes les classes sociales dans certains quartiers. Une analyse de l'impact des inondations urbaines à Abidjan a révélé de nombreuses pertes matérielles et plusieurs décès, soit 19 en 2022, 17 en 2020, 16 en 2015, 23 en 2014, 28 en 1996, avec une moyenne annuelle de 13 décès depuis 2009 (Fulbert, 2022).

Plusieurs facteurs socioéconomiques, démographiques, technologiques et topographiques de l'environnement urbain contribuent à aggraver le phénomène d'inondation dans le District d'Abidjan. Il s'agit notamment des défaillances dans le système d'assainissement et de drainage (ALLA et al., 2019; T. Ouattara et al., 2021), de l'imperméabilisation des sols (Jourda et al., 2003; Konaté et al., 2016), de la topographie du milieu (Alla et al., 2018; Ambroise et al., 1996), du développement urbain mal contrôlé et rapide (Habal, 2021; Savane et al., 2003), et des variations des événements pluvieux (Hauhouot, 2008; Konaté et al., 2016).

Face aux fréquentes inondations à Abidjan, une carte pertinente et détaillée du risque s'avère indéniablement un outil essentiel pour aider les populations à mieux appréhender le risque d'inondation dans la ville.

L'étude du risque d'inondation en milieu urbain est une problématique complexe qui exige une approche intégrée mobilisant plusieurs sources de données et disciplines. L'éventail de capteurs optiques et radar à haute résolution (avec différentes caractéristiques spectrales, spatiales et temporelles) ainsi que les nouvelles méthodes d'exploitation des données spatiales soulignent l'importance de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) comme outils fondamentaux pour l'inventaire, l'analyse et la cartographie des paramètres liés au risque d'inondation (Eba et al., 2021; Konaté et al., 2016). Cependant, de nouvelles

technologies basées sur le cloud, l'intelligence artificielle et les données de très haute résolution ont émergé, Il est donc judicieux d'explorer ces nouvelles approches pour améliorer la compréhension du phénomène d'inondation dans la zone d'étude.

L'objectif principal de cette étude est d'accroître les connaissances sur les inondations pluviales dans le District d'Abidjan et de proposer des outils de suivi ainsi que d'aide à la prise de décision, en vue d'améliorer la résilience des populations.

Afin de répondre à l'objectif principal qui a été fixé, il a été possible de manière spécifique de:

cartographier avec précision l'étendue des zones inondées en utilisant une méthode de détection des changements basée sur les données Sentinel-1 (SAR) avant et après une crue spécifique depuis GEE;

extraire et estimer la superficie des différentes classes d'enjeux affectées (telles que les cultures, les zones habitées, les bâtiments, les routes et la densité de la population);

concevoir une interface web qui offre la possibilité à l'utilisateur de visualiser l'étendue des zones inondées et les cartes des enjeux de surfaces affectés, avec une estimation statistique, pour une date donnée dans l'intervalle allant de 2013 à la date actuelle.

1 Zone d'Etude

Le District d'Abidjan est situé dans le Sud de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 5°13' - 5°37' Nord et les longitudes 3°43' et 4°25' Ouest. Il est bordé au Sud par l'Océan Atlantique, au Sud-Ouest par le département de Dabou, au Sud-Est par le département de Grand-Bassam, au Nord par le département d'Agboville, à l'Ouest par le département de Grand-Lahou, et à l'Est par le département d'Alépé (Figure 1). Il s'étend sur une superficie d'environ 2137,43 km², et regroupe les communes d'Abobo, d'Adjamé, d'Anyama, d'Attécoubé, de Bingerville, de Cocody, de Koumassi, de Marcory, de Treichville, du Plateau, de Port-Bouët, de Songon et de Yopougon, auxquelles s'ajoute la sous-préfecture de Brofodoumé (INS, 2014).

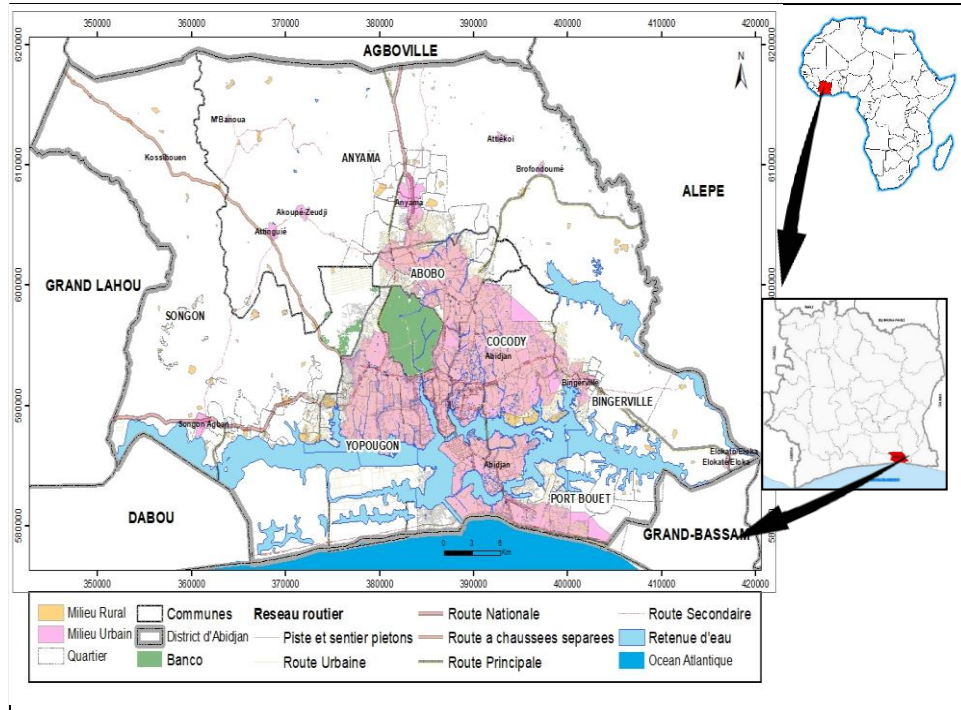


Figure 1. Situation géographique du District d'Abidjan

Cette région connaît une croissance continue marquée par une forte industrialisation et une urbanisation significative. La population était estimée à 65 000 habitants en 1950, 180 000 habitants en 1960, environ 1 million en 1975, environ trois millions d'habitants en 1998, 4 707 404 habitants en 2015 et 6 321 017 habitants selon le recensement global de la population fait par l'Institut National de Statistique en 2021 (INS, 2014). La population d'Abidjan est répartie de manière inégale dans l'espace et concentrée en milieu urbain (Figure 2).

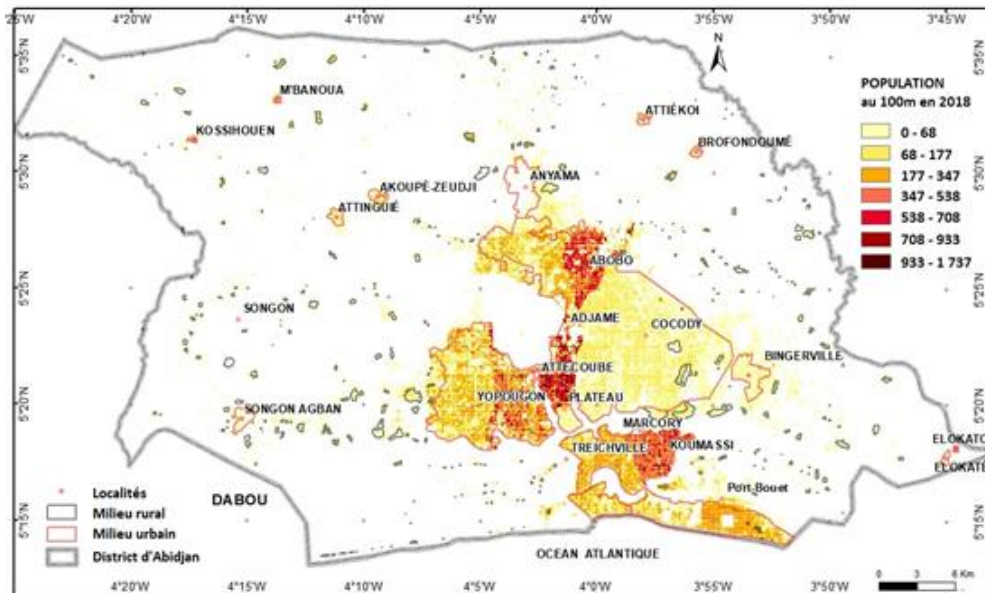


Figure 2. Répartition spatiale de la population du District d'Abidjan au 100 m
(PopulationStat, 2021)

Le District d'Abidjan est traversé par trois principales rivières : la Comoé, la Tanoé et la Agnéby, Ces rivières jouent un rôle important dans le drainage de la région et l'approvisionnement en eau de la ville. Le système de drainage dans la zone d'étude présente une densité moyenne, avec un régime essentiellement irrégulier étroitement lié aux précipitations. Pendant la saison des pluies, les débits sont élevés avec de grandes inondations, tandis qu'en saison sèche, le débit diminue et les étangs se dessèchent, Les fleuves jouent principalement un rôle de drainage des eaux, tandis que certains cours d'eau ont été aménagés en caniveaux (Figure 3).

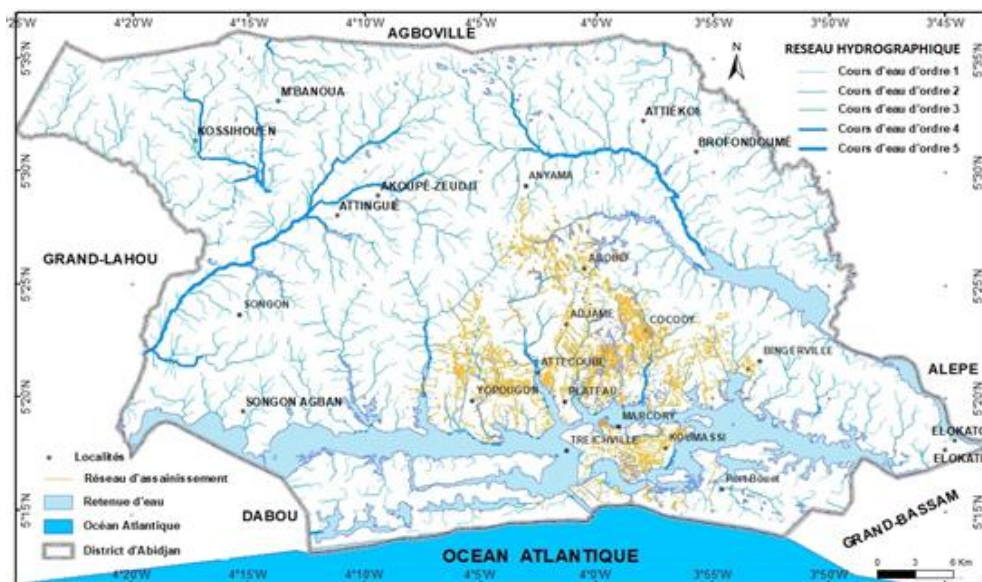


Figure 3. Système de drainage des eaux de la zone d'étude.

Le district d'Abidjan présente une variété de vallées et de formations géologiques, notamment les vallées fluviales formées par l'érosion causée par les rivières et les cours d'eau au fil du temps. On y trouve également des vallées estuariennes, généralement situées aux embouchures des rivières et dans les zones côtières soumises aux marées, ainsi que des vallées alluviales qui résultent du dépôt de sédiments transportés par les cours d'eau. La topographie du district d'Abidjan est profondément influencée par ces différents types de vallées, en plus de la présence des rivières, des lagunes et de l'environnement côtier. Chacune de ces vallées a un impact significatif sur la planification de l'utilisation des terres et sur le risque d'inondation dans la région.

Le modèle du réseau d'assainissement pluvial est constitué d'un ensemble d'ouvrages de drainage à ciel ouvert qui traversent des zones urbanisées et se connectent au milieu naturel par un grand talweg principal. Ce talweg achemine par gravité les eaux de pluie jusqu'à la lagune Ebrié, et sa sortie est équipée d'un groupe de buses pour évacuer les eaux en période de crue.

Cependant, certains de ces caniveaux ont été obstrués par des déchets, des ordures ou le dépôt de sable, tandis que d'autres ont été recouverts par un aménagement. Lors des événements pluvieux, un débordement rapide des ouvrages de drainage est observé. En aval, les batteries de buses sont submergées et ne parviennent plus à évacuer efficacement les eaux, entraînant une montée excessive du flux pluvial. Ceci conduit à des inondations qui submergent les routes et leurs environs, occasionnant ainsi de nombreux dégâts matériels.

2 Materiela et methodes

2.1 Données

Cette étude requiert une vaste base de données comprenant les images satellites, les informations dérivées de l'occupation du sol, et les bases de données libres. Les images satellites utilisées pour l'élaboration de cette étude sont de type RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) Sentinel-1 et de type Modèle Numérique d'Élévation provenant du satellite ALOS PALSAR (Tableau 1).

Tableau 1. Caractéristiques des images satellites

Produit	Disponibilité	Résolution spatiale
RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) Sentinel-1	Acquisition d'images tous les 12 jours depuis le 3 avril 2014 et tous les 6 jours depuis le 25 avril 2016 avec l'association des deux satellites Sentinel-1A et Sentinel-1B,	10m
MNT ALOS PALSAR	24 janvier 2006	12,5m

Les images Sentinel-1 en bande C de la collection COPERNICUS/S1, en polarisation verticale d'émission/horizontale de réception (VH) ont été utilisées pour cartographier l'étendue des zones inondées en période de crue. Le choix de cette image est guidé par la qualité des images et leur disponibilité dans la zone d'étude. Contrairement à d'autres capteurs qui peuvent être affectés par les conditions météorologiques (nuages, pluie, obscurité), Sentinel-1 fonctionne en émettant des ondes radar et en mesurant leur réflexion, ce qui lui permet d'acquérir des images indépendamment des conditions météorologiques. Le système Sentinel-1 est composé de deux satellites (Sentinel-1A et Sentinel-1B) qui fournissent une grande fréquence de répétition des observations, ce qui permet de surveiller les zones inondées de manière régulière et de suivre leur évolution au fil du temps, La résolution spatiale des données Sentinel-1 est généralement suffisamment élevée pour distinguer les détails des zones inondées et des caractéristiques environnantes. Pour une appréciation optimale d'une étude en fonction du temps, il est judicieux d'utiliser des images de la même saison afin d'éviter les différences de réflectance des objets observables sur l'image. Ces raisons ont dicté le choix des images sentinel-1.

Le Modèle Numérique d'Élévation provenant du satellite ALOS PALSAR avec une résolution de 12,5 m rééchantillonné à 10m, et les cartes de la distribution spatio-temporelle des eaux de surface de 1984 à 2020 provenant du « JRC Global Surface Water Mapping », ont été exploitées pour affiner l'extraction des zones inondées.

Les données sur la population issues du GPWv411 (Gridded Population of the World version 4,11), les informations sur l'occupation issu des travaux de (Njeugeut et al., 2023), les données sur les bâtiments provenant de Open Buildings V2, ainsi que les informations sur le réseau routier et les

équipements issus de OSM (OpenStreetMap) ont également été utilisés pour estimer l'impact des zones inondées sur les enjeux dans le District d'Abidjan. Les données de terrain sont essentiellement les informations collectées sur les crues historiques telsque les emplacements des zones inondées et les niveaux d'eau observés lors des crues. Le choix des localités enquêtées s'est fait sur la base de la récurrence du phénomène de crue.

Le Code Editor de Google Earth Engine ainsi que le langage Java ont été exploités pour développer des scripts permettant de cartographier les zones inondées et d'estimer les dommages dans la zone d'étude. Pour automatiser le processus et convertir les scripts en applications via GEE, les packages de deveoppement d'application web offerts par Google earth engine telque ui,Select(), ui,Button() et ui,Panel(), ont été utilisés.

2.2 Méthodes

La méthodologie générale utilisée pour cartographier les zones potentiellement inondées afin d'estimer les dommages survenus en raison de l'inondation, dans GEE s'est faite en cinq étapes essentielles : i) cartographie ou détection des zones inondées ; ii) cartographie des enjeux ; iii) évaluation des dommages causés ; iv) Suivi temporel et v) développement de l'application de suivi des zones inondées (Figure 4).

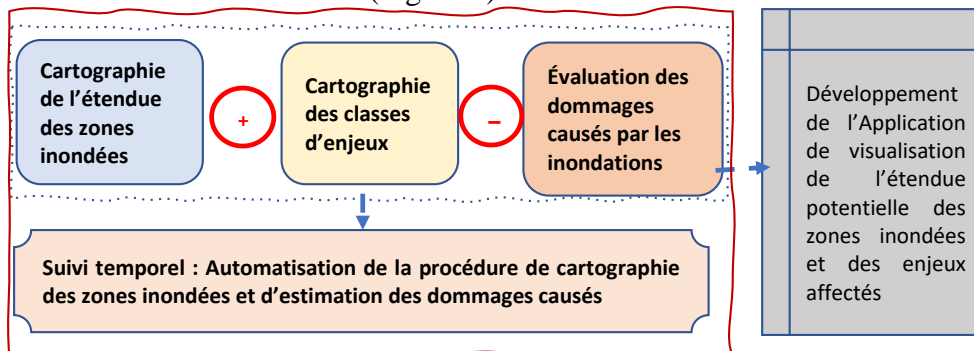


Figure 4. Diagramme simplifié de la Cartographie automatique des zones inondées et évaluation des dommages depuis Google Earth Engine

2.2.1 Cartographie des zones inondées

La cartographie des zones inondées (Figure 5) repose sur le traitement des images SAR (Synthetic Aperture Radar) de Sentinel-1 pour générer la carte de l'étendue des zones inondées. Ce processus comprend un traitement initial à l'aide du filtre de speckle, suivi de la détection des changements. Une approche de détection de changement est mise en œuvre en comparant une image avant et après un événement de crue.

Figure 5. Organigramme de la chaine de traitement pour la cartographie des zones inondées avec Google Earth Engine

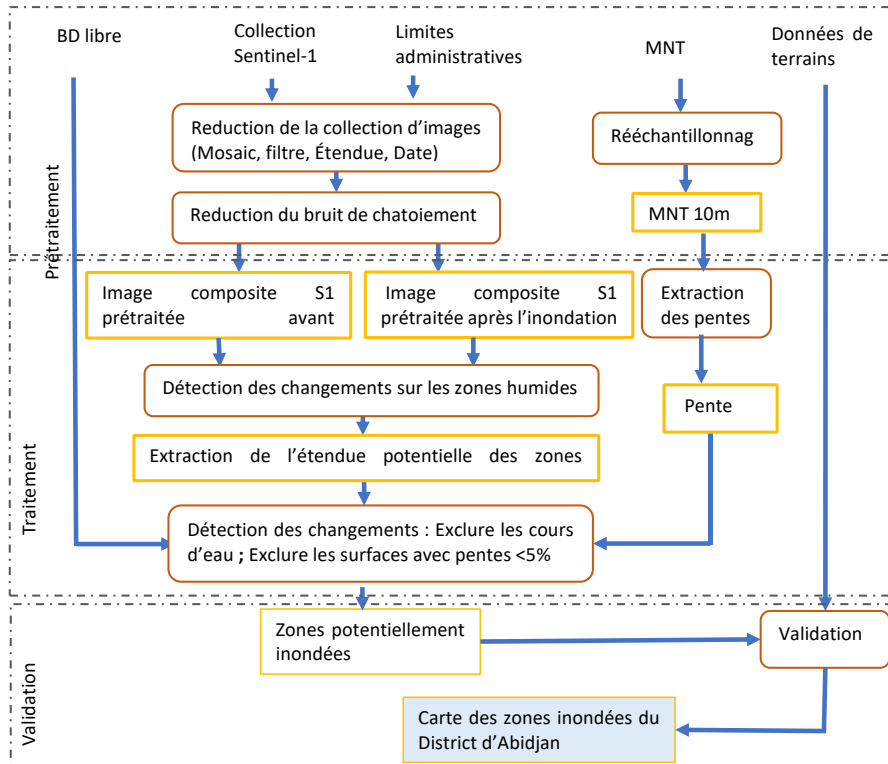


Figure 5 : Organigramme de la chaîne de traitement pour la cartographie des zones inondées avec Google Earth Engine

2.2.1.1 Sélection et prétraitement des images

Les produits GRD (Ground Range Detected) de niveau-1 de Sentinel-1 dans Google Earth Engine (GEE) sont fournis avec plusieurs prétraitements nécessaires pour l'étude (calibrage radiométrique, correction du terrain ou orthorectification). En conséquence, seule la réduction de la collection d'images et l'élimination du bruit de chatoiement sont appliquées à l'ensemble des images Sentinel-1 dans ce processus.

Dans l'environnement de l'éditeur de code GEE, plusieurs contraintes ont été imposées sur les paramètres d'acquisition des images SAR (Radar à Synthèse d'Ouverture) Sentinel-1 afin de réduire la collection d'images disponibles dans l'ImageCollection 'COPERNICUS/S1_GRD' de GEE. Ces contraintes ont permis de sélectionner les images appropriées pour l'étude sur les inondations avec comme paramètres :

- le mode d'acquisition par Interferometric Wide (IW) ;
- la polarisation VH (émission verticale, réception horizontale) particulièrement adaptée à la cartographie des inondations ;
- la direction de l'orbite "ASCENDANT" sélectionné afin d'éviter les faux signaux positifs causés par les différences d'angle de vue ;

- la résolution spatiale de 10 m pour assurer une meilleure superposition des différentes couches d'information.

Des périodes temporelles ont été définies pour permettre la sélection d'un nombre suffisant d'images couvrant la zone d'étude sur un intervalle de temps donné. Pour un évènement de crue donné, deux périodes d'étude sont fixées :

- un mois avant la date de crue, considérée comme la période avant l'inondation ;
- un mois après la date de crue, considérée comme la période après l'inondation,

Pour atténuer l'effet du chatoiement inhérent à l'imagerie radar Sentinel-1 de niveau-1 Ground Range Detected (GRD), le filtre de lissage speckle a été appliqué aux produits GRD des événements avant et après l'inondation. Le filtrage a été réalisé en utilisant la technique du filtre moyen avec un rayon de lissage de 50 mètres, en utilisant un noyau circulaire à cette fin. L'objectif de ce filtre est d'estimer le bruit à partir du signal observé et de le réduire tout en préservant la radiométrie et les informations texturales de l'image. En éliminant les chatoiements grâce à cette technique de filtrage, la qualité des images radar est améliorée, permettant ainsi une meilleure perception des détails et des caractéristiques des zones inondées pour notre étude.

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) Alos PolSAR de 12,5 m de résolution a subi un rééchantillonnage à 10 m avant d'être utilisé dans l'analyse géospatiale de cette étude. Ceci s'est fait dans l'optique d'adapter le MNT à une résolution qui permet de garantir la conformité avec les autres données utilisées et obtenir une représentation plus lisse du terrain.

2.2.1.2 Extraction de l'étendue potentielle des zones inondées

L'extraction des zones inondées s'est faite par une approche simple et directe de détection des changements (Long et al., 2014). Pour un évènement historique connu, des images pré (R) et post (F) inondation ont été sélectionnées. Ensuite, la mosaïque après-inondation est divisée par la mosaïque avant-inondation (Eq. 1). Ce qui permet d'obtenir une couche raster de l'indice de différence (ID) qui montre le degré de changement par pixel dans la scène, y compris les zones inondées.

$$ID = F/R \quad (\text{Éq. 1})$$

Ensuite, le seuillage est appliqué à l'indice de différence (ID) pour détecter les zones inondées. Le seuil dépend des caractéristiques de l'étude. La valeur positive élevée est utilisée pour détecter les augmentations de rétrodiffusion radar, indiquant des zones inondées. Le seuil prédéfini de 1,25

défini et retenu par la méthode essai-erreur, est appliqué, attribuant 1 à toutes les valeurs supérieures à 1,25 et 0 à toutes les valeurs inférieures à 1,25. La couche raster binaire créée par ce processus montre l'étendue de l'inondation potentielle.

Enfin, en additionnant tous les pixels, l'information de surface est dérivée et convertie en hectares.

2.2.1.3 Affinage de la couche d'étendue des inondations

La couche des cours d'eau permanent (a) et la couche des pentes supérieure à 5 degrés (b) ont permis d'affiner l'étendue de l'inondation potentielle du District d'Abidjan (Figure 6).

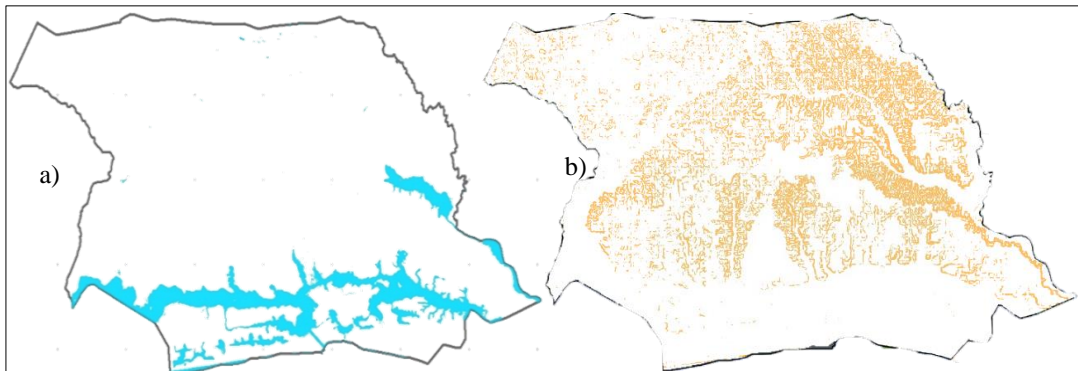


Figure 1. Paramètres d'affinages de l'étendue des zones inondées : cours d'eau (a) et pentes supérieures à 5 (b).

L'ensemble de données JRC Global Surface Water Mapping Layers v1.4, est utilisé pour masquer toutes les zones couvertes par des plans d'eau permanents ou naturels. Cette base de données de 30m de résolution a été mise à jour pour la dernière fois en 2021. Les plans d'eau permanents ou naturels (par exemple, les étangs, les rivières, les lacs, etc.) ont été masqués des zones inondées extraites afin de différencier les zones réellement inondées.

Ensuite, l'étape du masque des pentes inférieures à la valeur seuil a permis de déterminer les zones potentiellement inondables en fonction de la topographie. Cette étape a consisté depuis GEE à fixer la valeur maximale de 5 degrés comme seuil de pente en dessous duquel une zone est considérée comme potentiellement inondable. Le seuil approprié est défini en fonction de l'analyse de la carte de pentes, en identifiant les pentes qui semble correspondre aux cours d'eau de la zone d'étude. Puis les zones ayant une pente inférieure à la valeur seuil (>5%) sont ensuite exclues des zones inondées.

La connectivité des pixels d'inondation est évaluée afin d'éliminer ceux qui sont connectés à dix voisins ou moins soit 0,1 hectare. Cette opération réduit le bruit du produit de l'étendue des inondations.

2.2.1.4 Validation de l'étendue des zones inondées

La collecte de données s'est principalement déroulée dans la commune de Cocody, au niveau de la Palmeraie, de Bonoumin et de la rue ministre, ainsi que dans certaines communes du district d'Abidjan, pendant la saison des pluies, entre juin et juillet 2020. La mission impliquait la visite de sites précédemment inondés, avec une méthodologie basée sur des enquêtes de terrain et des entretiens avec les résidents locaux. Les informations recherchées comprenaient la localisation exacte des zones inondées, des photographies illustratives, les traces de crues et les impacts socio-économiques.

2.2.2 Extraction des classes d'enjeux

L'approche méthodologique utilisée pour l'extraction des classes d'enjeux, a consisté à appliquer des masques pour isoler ces zones sur la base de l'information attributive ou des intercessions de couches (Figure 7).

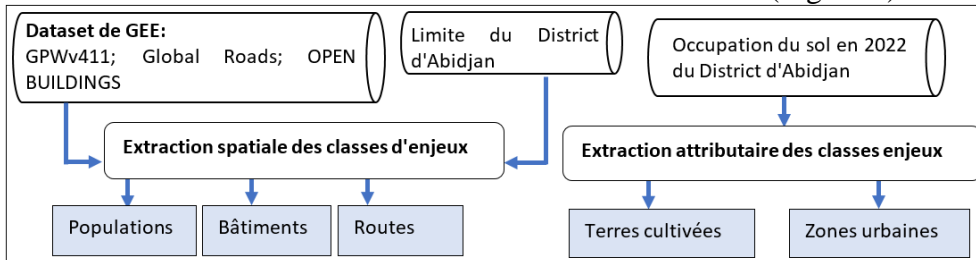


Figure 7. Extraction des classes d'enjeux étudiées, du District d'Abidjan

Plusieurs classes d'enjeux sont retenues pour évaluer les dégâts causés par les inondations :

- la classe culture issue de l'occupation du sol de 2022, qui regroupe toutes les variétés de cultures rencontrées dans la zone d'étude (hévée, palmier, bananier, aménagement agricole...)
- la classe zone habitée extraite de l'occupation du sol de 2022, qui regroupe tout ce qui est habitations, routes et sols nus ;
- la population issue du GPWv411, d'une résolution spatiale de 1 km, rééchantillonnée à 10 m puis utilisée pour estimer le nombre de personnes exposées aux inondations,
- le réseau routier issue du jeu de données Global Roads;
- les bâtiments issues du jeu de données open buildings ;

Une fois la carte des zones inondées et la classification des enjeux obtenues, les dommages causés sont quantifiés.

2.2.3 Évaluation des dommages causés par les inondations

Les dommages causés par les inondations sont caractérisés comme la probabilité qu'une perte se produise (Kefi et al., 2018).

L'approche méthodologique utilisée pour estimer les dommages causés par les inondations, a consisté à : (i) superposer les zones inondées cartographiées sur chaque classe d'enjeux extraite, puis (ii) analyser les enjeux croisés ou zones affectées (Figure 8).

L'analyse des zones affectées a consisté à calculer la superficie totale des enjeux inondés et à identifier les zones les plus touchées. Afin d'évaluer la superficie des classes d'enjeux affectées, la couche des zones inondées a été croisée au raster de chaque classe d'enjeux. Ensuite, une intersection entre les deux couches est calculée et affichée comme une nouvelle couche raster qui correspond aux zones affectées. La superficie des zones exposées est ensuite estimée en additionnant les valeurs des pixels du raster des enjeux qui intercident les zones inondées.

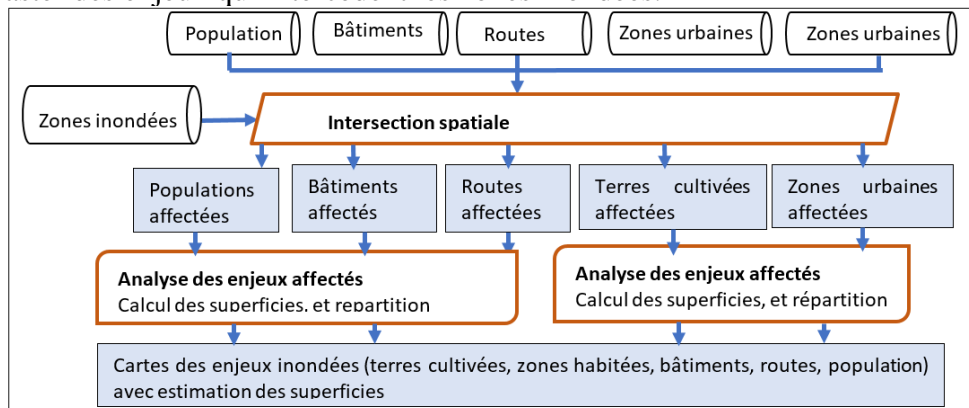


Figure 8. Évaluation des dommages causés par les inondations

Il en résulte, en fonction des classes d'enjeux retenues et croisées :

- l'emplacement des terres cultivées affectées avec une estimation de la superficie ;
- l'emplacement des zones urbaines affectées avec une estimation de la superficie ;
- l'emplacement et le nombre de personnes exposées;
- l'emplacement des bâtiments affectés avec une estimation de la superficie;
- l'emplacement du réseau routier affecté.

2.2.4 Suivi temporel et Automatisation du processus en application web

L'approche méthodologique a consisté à exploiter les outils de visualisation puissants de GEE pour afficher les résultats sous forme de cartes interactives et offrir aux utilisateurs la possibilité de personnaliser leurs paramètres, notamment la date, pour visualiser les résultats à la période choisie.

L'automatisation du processus de cartographie des zones inondées a

consisté à mettre en œuvre dans le script JAVA les étapes suivantes :

- la sélection et le traitement des images appropriées provenant de Sentinel-1 et d'autres sources de données, au sein de GEE via des scripts visant à extraire les zones inondées ;
- puis, l'extraction des classes d'enjeu et leur superposition avec les zones inondées. Cela a permis d'identifier les zones touchées par les inondations ;
- enfin, les calculs relatifs à la superficie des zones touchées, aux enjeux spécifiques tels que les terres cultivées et les zones urbaines, ainsi qu'à la densité de population exposée, ont été automatisés en utilisant les capacités de traitement de GEE.

La méthodologie adoptée pour le développement de l'application s'est articulée autour des étapes suivantes :

- la création de l'Interface Utilisateur grâce aux composants d'interface disponibles dans GEE, tels que `ui.Select()`, `ui.Button()`, et `ui.Panel()`. Cette interface offre aux utilisateurs la possibilité de sélectionner la période, ainsi que les types d'enjeux à visualiser ;
- l'intégration des fonctionnalités de visualisation interactive tel que : afficher ou masquer des couches, zoomer et se déplacer sur la carte ;
- l'affichage des résultats générés automatiquement, sous forme de cartes, de graphiques ou de tableaux, pour une compréhension aisée ;
- l'export des résultats sous forme de fichiers téléchargeables, tels que des images ou des fichiers CSV, pour des analyses plus approfondies ;
- la publication en ligne qui offre un accès aux utilisateurs depuis n'importe quel navigateur, éliminant ainsi la nécessité de télécharger ou d'installer des logiciels ;

L'automatisation du processus d'analyse des inondations grâce à GEE, combinée au développement de cette application dédiée, a permis d'accroître l'efficacité et l'accessibilité des résultats obtenus. Cela offre aux utilisateurs la possibilité de visualiser et d'interpréter rapidement les conséquences des inondations à la date de leur choix.

3 Resultats et discussions

3.1 Résultats

Cette partie présente les résultats des prétraitements et traitements des images radar sentinel-1 et du MNT Alos et leurs analyses pour la cartographie des zones inondées et l'évaluation des dégâts causés au niveau du District d'Abidjan depuis GEE.

3.1.1 Cartographie des zones potentiellement inondées

3.1.1.1 Prétraitement des images

L'analyse comparative entre l'image filtrée et non filtrée en polarisation VH montre que le filtre moyen de rayon 5 m réduit considérablement le chatoiement présent sur les images Sentinel 1 du District d'Abidjan. Ce filtre diminue l'aspect granulaire du chatoiement, permet le lissage des zones homogènes et préserve les contours, les zones hétérogènes et les structures fines surtout dans les zones du bâti (Figure 9).

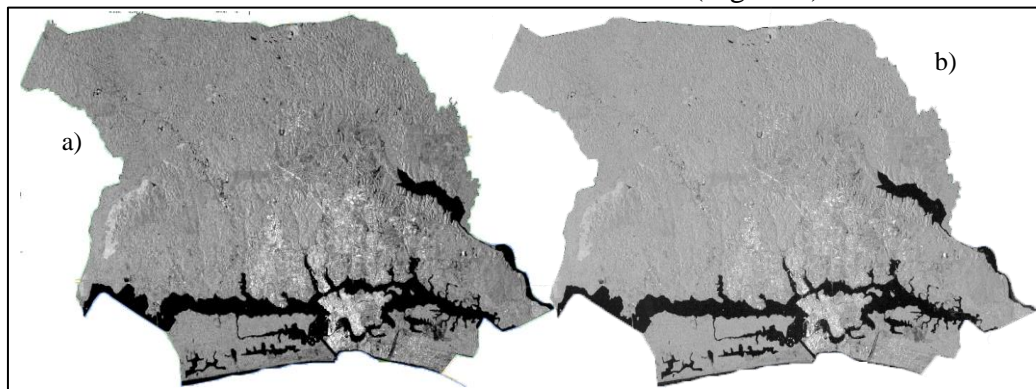


Figure 2. Réduction du chatoiement sur les images Sentinel 1 du District d'Abidjan : image brute (a) et image filtrée (b)

Les images prétraitées et filtrées avant et après le phénomène de crue (Figure 10), plus nettes, offrent ainsi la possibilité de mieux interpréter les données et d'extraire les informations utiles pour la cartographie des zones inondées.

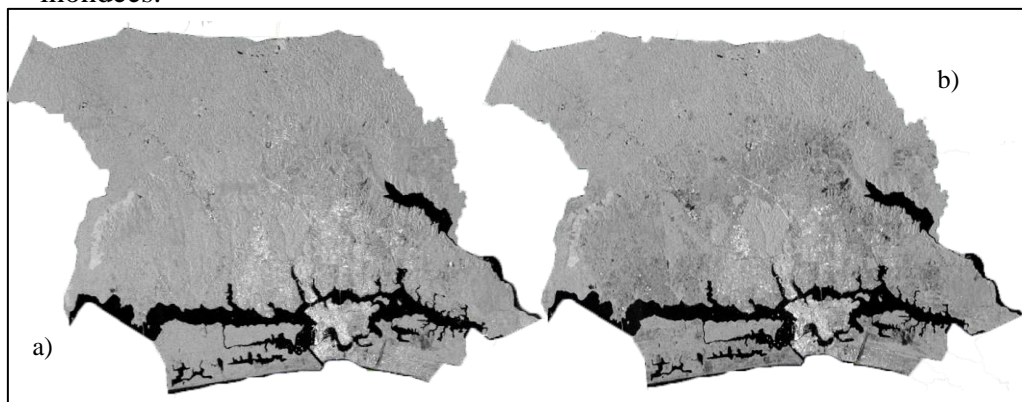


Figure 3. Images prétraitées avant (a) et après (b) la crue du 20 juin 2020 du District d'Abidjan

3.1.1.2 Étendues potentielles des zones inondées

La Figure 11.a présente la couche raster qui représente la différence entre l'image avant la crue et l'image après la crue du 25 juin 2020. Elle illustre

le degré de changement par pixel. Les valeurs élevées (pixels clairs) indiquent un changement important et les valeurs faibles (pixels sombres) indiquent un changement minime.

La couche raster binaire qui en résulte grâce au seuil de 1,25 imposé, illustré par la Figure 11.b, montre l'étendue de l'inondation potentielle (valeurs supérieures à 1,25).

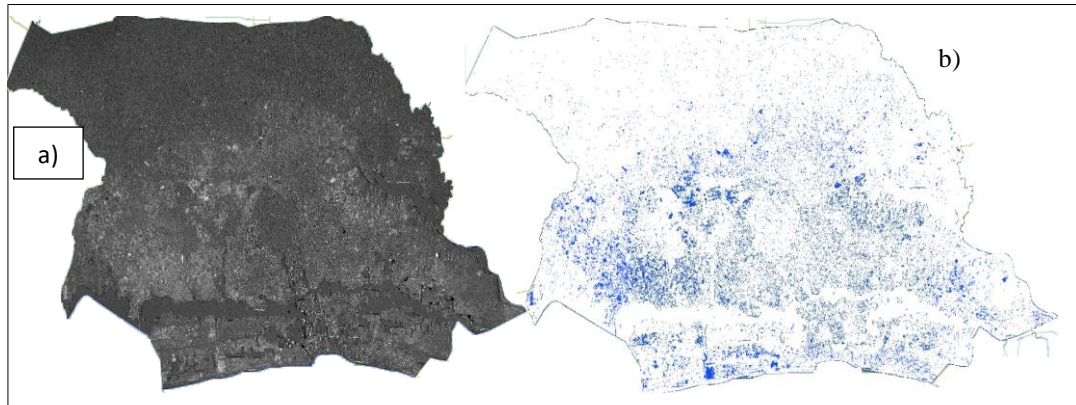


Figure 4. Couche raster binaire de la différence entre l'image avant et après la crue du 25 juin 2020 (a) et l'étendue de l'inondation potentielle (b) du District d'Abidjan

3.1.1.3 Analyse de la carte des zones inondées du District d'Abidjan

La Figure 12 présente la carte de l'étendue des zones inondées du District d'Abidjan relativement à la crue du 25 juin 2020, La superficie totale des zones potentiellement inondées dans l'ensemble du District est estimée à 25219,23 ha soit un pourcentage de 11,50%.

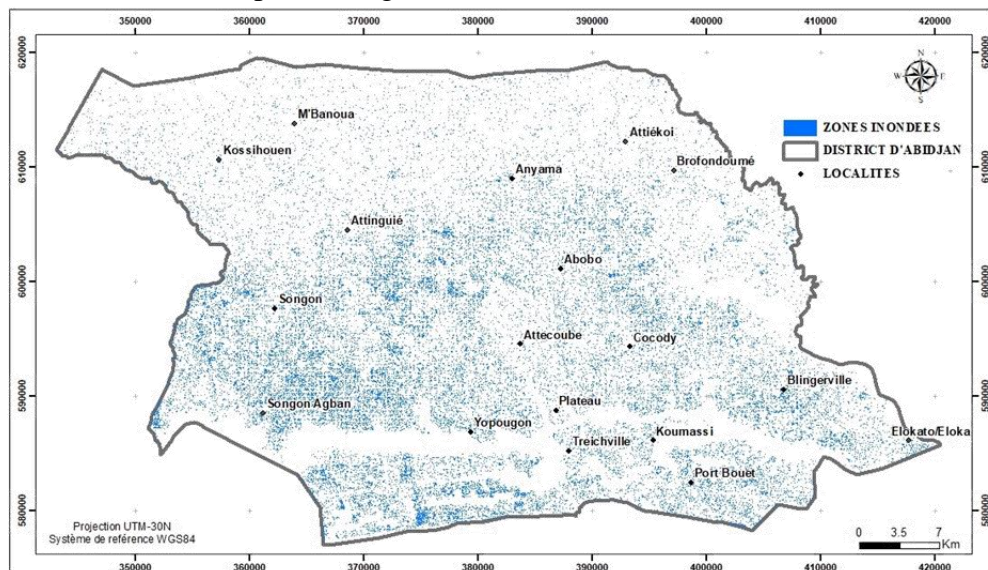


Figure 12. Carte des zones inondées du District d'Abidjan issue du traitement des images Sentinel-1 depuis GEE

Le graphe de la Figure 13 illustre que les zones inondées sont inégalement réparties dans les communes du District d'Abidjan.

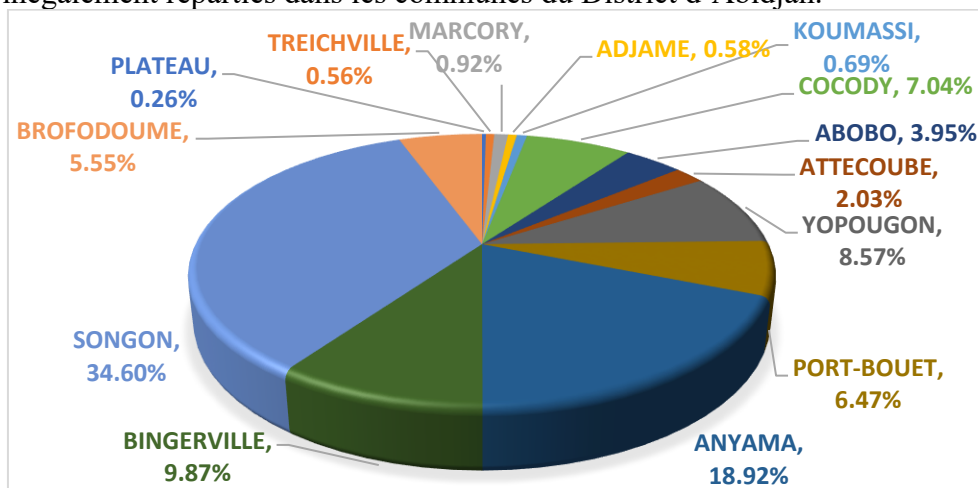


Figure 13. Répartition des zones inondées dans les différentes communes du District d'Abidjan

L'analyse de la répartition spatiale des zones inondées lors de la crue du 25 juin 2020 permet de hiérarchiser les communes du District d'Abidjan en fonction de l'impact des inondations, et du degré d'exposition (Tableau 2).

Tableau 2. Répartition spatiale des zones à risque d'inondation lors de la crue du 25 juin 2020

Sous-Prefecture	Commune	Impact des inondations		Degré d'exposition		
		Superficie des zones inondées (ha)	Proportion des Zones inondées (%)	Superficie des Commune (ha)	Proportion communes inondées (%)	Proportion des communes non inondées (%)
Abidjan	Plateau	65,34	0,26%	635,83	10,28%	89,72%
	Treichville	140,96	0,56%	1648,82	8,55%	91,45%
	Marcory	231,18	0,92%	1889,50	12,23%	87,77%
	Adjame	145,97	0,58%	1200,35	12,16%	87,84%
	Koumassi	173,30	0,69%	1942,03	8,92%	91,08%
	Cocody	1775,90	7,04%	11776,80	15,08%	84,92%
	Abobo	995,05	3,95%	7154,48	13,91%	86,09%
	Attecoube	512,36	2,03%	4514,32	11,35%	88,65%
	Yopougon	2161,77	8,57%	16232,36	13,32%	86,68%
	Port-bouet	1630,98	6,47%	12788,11	12,75%	87,25%
Anyama	Anyama	4770,84	18,92%	50875,69	9,38%	90,62%
Bingerville	Bingerville	2489,80	9,87%	29274,40	8,51%	91,49%
Songon	Songon	8725,33	34,60%	60655,57	14,39%	85,61%
Brofodoume	Brofodoume	1400,44	5,55%	18653,40	7,51%	92,49%
Total		25219,23	100 %	219241,66	11,50%	88,50%

❖ **Impact des inondations par commune**

L'analyse de la proportion des zones inondées par commune dans le District d'Abidjan permet de classer les communes en fonction de l'impact des inondations. Classées comme les communes les plus touchées on a Songon avec 34,60% de la superficie totale des zones inondées ; suivie d'Anyama avec 18,92% ; Bingerville avec 9,87% ; Yopougon avec 8,57% ; Cocody avec 7,04% ; Port-Bouet avec 6,47% ; Brofodoumé avec 5,55%, et Abobo avec 3,95% de la superficie totale des zones inondées. En revanche, les communes les moins touchées sont Marcory avec 0,92%, Koumassi avec 0,69%, Treichville avec 0,56%, Adjamé avec 0,58%, et le Plateau avec 0,26%.

❖ **Degré d'exposition des communes**

L'analyse de la proportion des communes inondées permet de classer les communes du District d'Abidjan en fonction de leur exposition aux inondations. Les communes les plus exposées sont : Cocody, avec 15,08% de sa superficie inondée ; Songon, avec 14,39% de sa superficie inondée ; Abobo, avec 13,91% de sa superficie inondée ; Yopougon, avec 13,32% de sa superficie inondée; Port-Bouet, avec 12,75% de sa superficie inondée ; Marcory, avec 12,23% de sa superficie inondée; Adjame, avec 12,16% de sa superficie inondée ; Attécoubé, avec 11,35% de sa superficie inondée; Le Plateau, avec 10,28% de sa superficie inondée ; Anyama, avec 9,38% de sa superficie inondée; Koumassi, avec 8,92% de sa superficie inondée ; Bingerville, avec 8,51% de sa superficie inondée; et Brofodoumé, avec 7,51% de sa superficie inondée.

L'observation générale des zones inondées du 25 juin 2020, dans l'ensemble des communes du District, révèle que la superficie des zones inondées est estimée à 25219,23 hectares, environ 11,50% de la superficie totale du District d'Abidjan. La commune de Cocody est la commune la plus impactée avec 15,08% de sa superficie totale couverte. Ces résultats illustrent clairement que le District d'Abidjan fait face aux inondations pendant la saison de pluies.

Ces résultats illustrent clairement que le District d'Abidjan fait face aux inondations pendant la saison de pluies.

3.1.2 Extraction des classes d'enjeux

La figure 14 présente les cartes illustrant les classes d'enjeux milieu urbain et terres cultivées dans le District d'Abidjan.

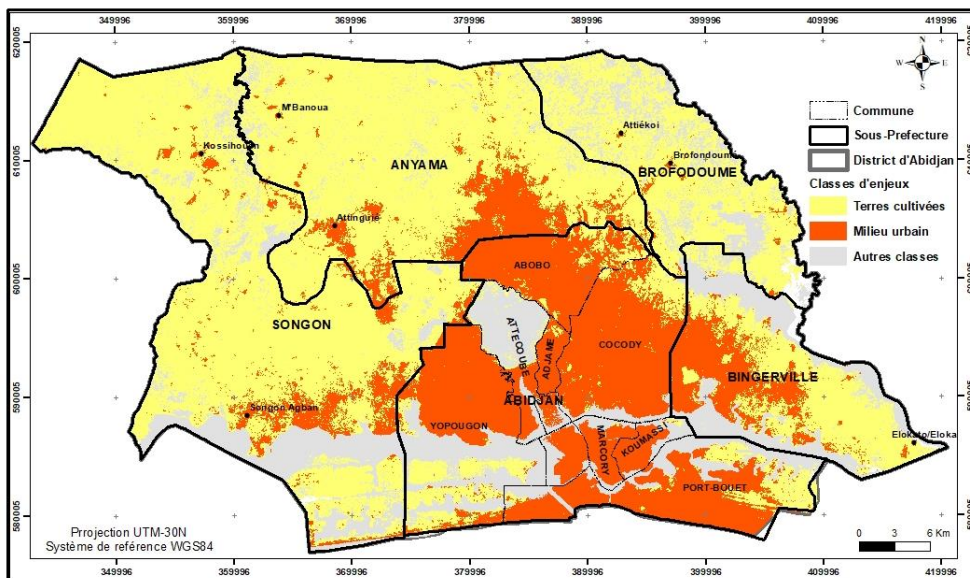


Figure 14. Carte des classes d'enjeu dans le District d'Abidjan repartis en milieu urbain et terres cultures

Les enjeux du District d'Abidjan occupent une superficie de 172186,55 ha soit 80,52% de la superficie totale (Tableau 3). Ces classes d'enjeu se décomposent en Milieu urbain et en terres cultivées, essentiellement composées des classes Aménagement agricoles, plantation de palmier à huile, Hévéa et Bananeraie.

Tableau 3. Répartition des classes d'enjeu liés à l'occupation du sol de 2020 du District d'Abidjan

	Classe d'Occupation du sol	Superficie (ha)	Proportion (%)
ENJEUX	Terres cultivées	119152,47	55,72%
	Milieu urbain	53034,08	24,80%
	Total enjeu	172186,55	80,52%
Autres classes		41667,54	19,48%
TOTAL		213854,09	100,00%

Les terres cultivées couvrent 119,152,47 hectares, ce qui équivaut à 55,72% de la superficie totale du District, tandis que la zone urbaine s'étend sur 53,034,03 hectares, représentant ainsi 24,80% de la superficie totale d'Abidjan. Les autres catégories de terres couvrent moins de 20% du district, totalisant environ 41667,54 hectares, soit 19,48%.

3.1.3 Évaluation des dommages causés par les inondations

3.1.3.1 Enjeux affectés par les inondations

La figure 15 présente la répartition des classes d'enjeu impactées par la crue du 25 juin 2020 dans le District d'Abidjan.

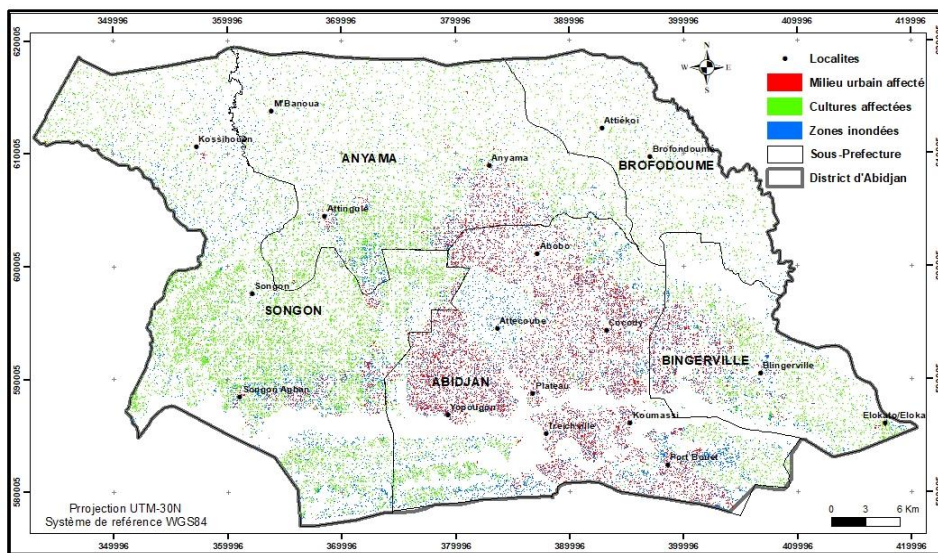


Figure 15. Carte des enjeux affectés par la crue du 25 juin 2020 dans le District d'Abidjan, repartis en classe : milieu urbain affecté et cultures affectées

Sur une superficie totale de 25 219,23 hectares inondée le 25 juin 2020, 22 307,53 hectares (soit 88,45 %) sont occupés par des zones sensibles. Ces zones sensibles se divisent en terres cultivées, qui couvrent 13 538,49 hectares (soit 53,68 %), et en zones urbaines, représentant 8 769,04 hectares (soit 34,77 %). Il est important de noter que 2 911,67 hectares (soit 11,55 %) des terres inondées du district ne sont pas vulnérables aux inondations (Tableau 4).

Tableau 4. Proportion des cultures et milieu urbain affectés dans le District d'Abidjan par la crue du 25 juin 2020 déterminée depuis GEE

Enjeux	Superficie (ha)	Proportion (%)
Culture inondée	13538,49	53,68%
Milieu urbain inondé	8769,04	34,77%
Reste	2911,67	11,55%
Superficie inondée	25219,23	100%

Cependant, le nombre de personnes affectées sur la base de la densité de la population est estimé à 64877 habitants.

3.1.3.2 Analyse statistique des dommages causés par les inondations dans les communes du District d'Abidjan lors de la crue du 25 juin 2020

Pour mieux évaluer l'impact des zones inondées sur les enjeux des communes de la zone d'étude, les superficies calculées ont été comparées et résumées dans le tableau 5.

L'analyse du graphe de la tableau 5, permet de comprendre que les terres cultivées affectées par la crue du 25 juin 2020 sont beaucoup plus

reparties dans les communes de Songon et Anyama. Par contre le milieu urbain de la commune de Cocody est le plus impacté par la crue du 25 juin 2020.

Tableau 5. Répartition des enjeux affectés par la crue du 25 juin 2020, dans les différentes communes du District d'Abidjan

		ENJEUX							
Commune	Zone inondée	Milieu urbain affecté		Cultures affectées		Total enjeux		Reste	
Commune	Superficie (ha)	Superficie (ha)	Proportion (%)	Superficie (ha)	Proportion (%)	Superficie (ha)	Proportion (%)	Superficie (ha)	Proportion (%)
PLATEAU	65,34	55,6	0,22	1,48	0,01	57,08	0,23	8,26	0,03
TREICHVILL	140,96	136,5	0,54	0,02	0,00	136,52	0,54	4,44	0,02
MARCORY	231,18	224,26	0,89	2,53	0,01	226,79	0,90	4,39	0,02
ADJAME	145,97	132,58	0,53	9,36	0,04	141,94	0,56	4,03	0,02
KOUMASSI	173,30	154,59	0,61	6,45	0,03	161,04	0,64	12,26	0,05
COCODY	1775,90	1548,96	6,14	186,57	0,74	1735,53	6,88	40,37	0,16
ABOBO	995,05	854,62	3,39	133,72	0,53	988,34	3,92	6,71	0,03
ATTECOUB	512,36	131,3	0,52	58,33	0,23	189,63	0,75	322,73	1,28
YOPOUGON	2161,77	1314,84	5,21	623,37	2,47	1938,21	7,69	223,56	0,89
PORT-BOUET	1630,98	1182,56	4,69	394,7	1,57	1577,26	6,25	53,72	0,21
ANYAMA	4770,84	991,97	3,93	3289,98	13,05	4281,95	16,98	488,89	1,94
BINGERVIL	2489,80	970,84	3,85	1314,54	5,21	2285,38	9,06	204,42	0,81
SONGON	8725,33	1036,29	4,11	6517,07	25,84	7553,36	29,95	1171,97	4,65
BROFODOUME	1400,44	34,13	0,14	1000,37	3,97	1034,50	4,10	365,94	1,45
TOTAL	25219,2	8769,04	34,77	13538,9	53,68	22307,3	88,45	2911,70	11,55

❖ **Milieu urbain affecté**

La figure 16 illustre la répartition spatiale de l'enjeu milieu urbain impacté par la crue du 25 Juin 2020 dans le District d'Abidjan.

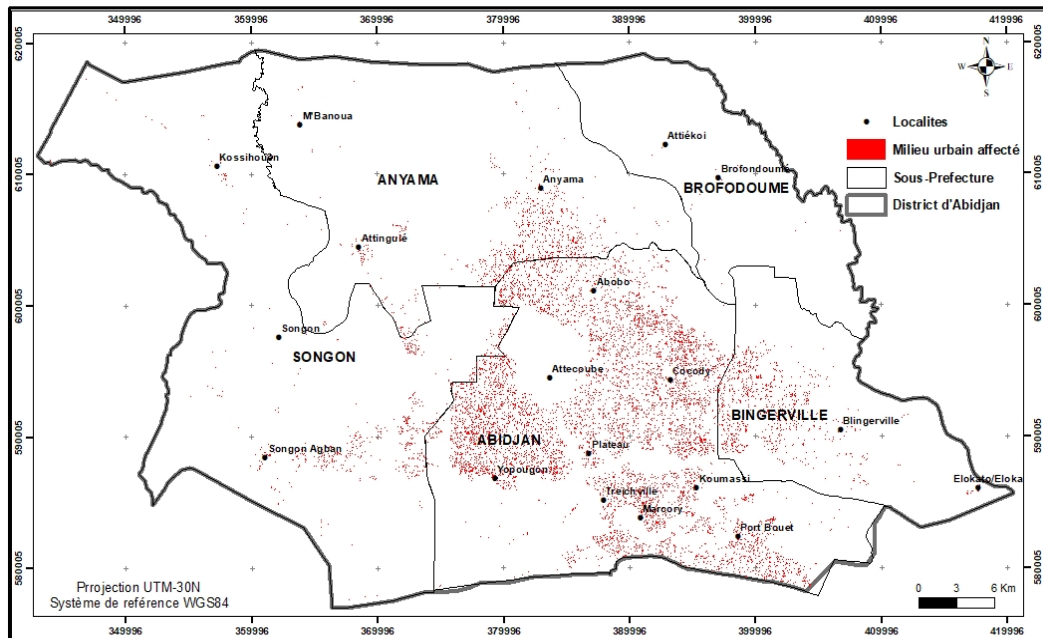


Figure 16. Carte de l'enjeu milieu urbain affecté par les inondations dans le District d'Abidjan issue du traitement des images Sentinel-1 depuis GEE, lors de la crue du 25 juin 2020

L'analyse de la répartition des 8 769,04 hectares de zones urbaines affectées (représentant 34,77% de la superficie inondée), dans les diverses communes du District d'Abidjan, permet de faire le constat suivant : les communes les plus touchées sont Cocody, avec 6,14% ; suivie de Yopougon, avec 5,21% ; Port-Bouët, avec 4,69% ; Songon, avec 4,11% ; Anyama, avec 3,93% ; Bingerville, avec 3,85% ; et Abobo, avec 3,39%. En revanche, les communes moins touchées sont Marcory, Koumassi, Treichville, Adjamé, Attécoube, Brofodoume et Plateau, avec des proportions inférieures à 1%.

❖ Terres cultivées affectées

La Figure 17 illustre la répartition spatiale des terres cultivées exposées aux inondations lors de la crue du 25 juin 2020 dans le District d'Abidjan. En observant la distribution des 13 538,49 hectares de terres cultivées affectées (soit 53,68% de la superficie inondée) dans différentes communes, on constate que Songon, Anyama, Bingerville, Brofodoume, Yopougon, Port-Bouët, Cocody, Abobo et Attécoube regroupent les proportions les plus importantes, représentant respectivement 25,84%, 13,05%, 5,21%, 3,97%, 2,47%, 1,57%, 0,74%, 0,53% et 0,23% de la superficie totale inondée. En revanche, la part de terres cultivées touchées dans les autres communes est inférieure à 0,04%.

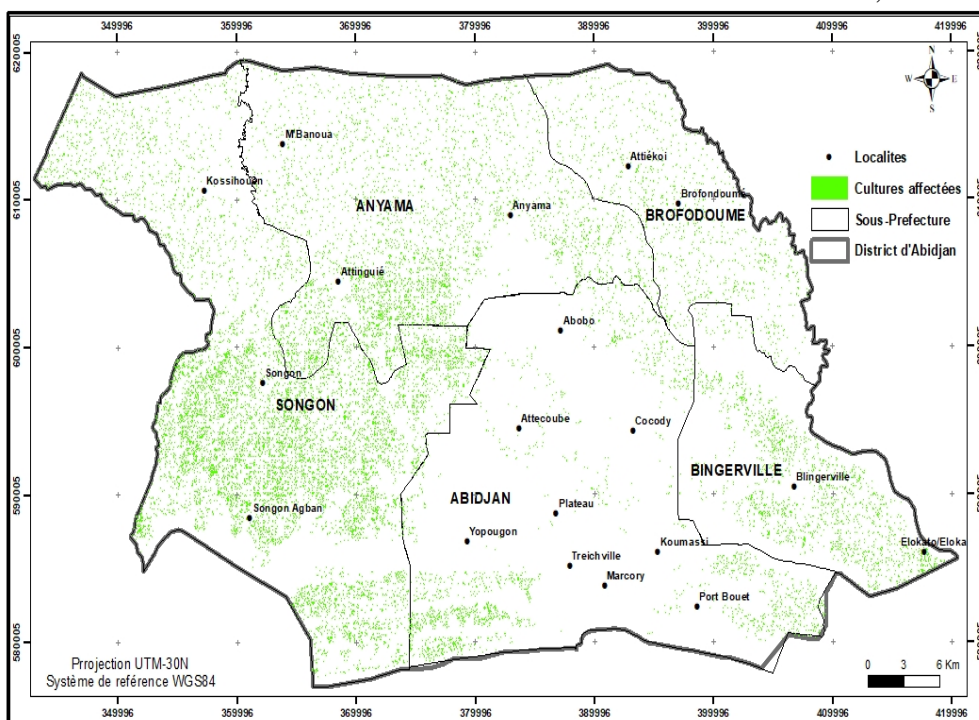


Figure 17. Carte de l'enjeux terres cultivées affecté par les inondations dans le District d'Abidjan issue du traitement des images Sentinel-1 depuis GEE, lors de la crue du 25 juin 2020

❖ Population impactée

La figure 18 illustre la répartition de la population affectée par la crue du 25 juin 2020 dans le District d'Abidjan. Le nombre approximatif de personnes touchées en fonction de la densité de la population est estimé à 35 065 habitants. La Sous-préfecture d'Abidjan abrite le plus grand effectif avec des valeurs comprises entre 47 à 1005 habitants impactés au km².

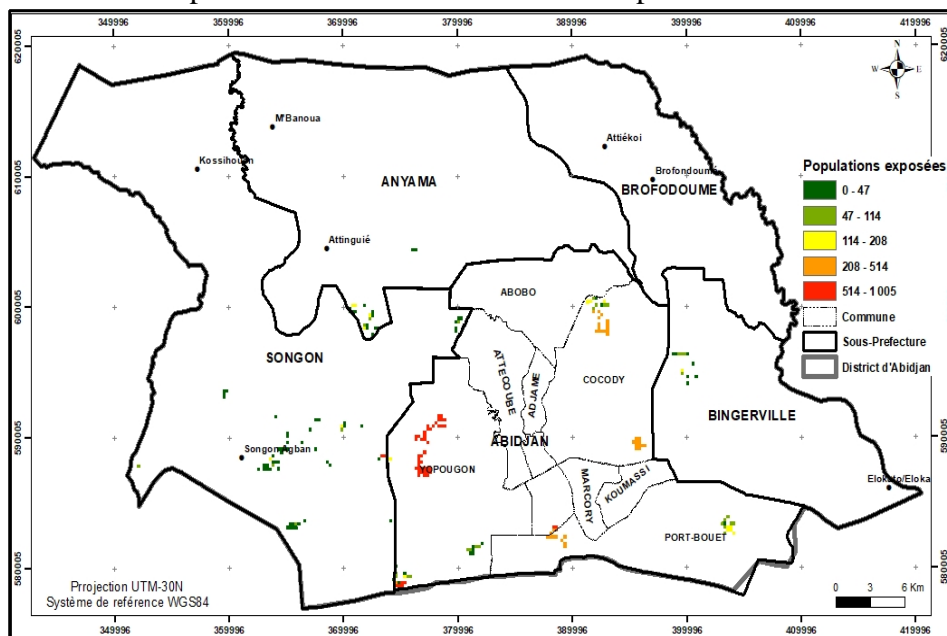


Figure 18. Carte de l'enjeu densité de la population affectée par les inondations dans le District d'Abidjan issue du traitement des images Sentinel-1 depuis GEE lors de la crue du 25 juin 2020

3.1.4 Mission de validation de l'étendue des inondations

La mission de validation a permis de valider les zones inondées cartographiées dans le district d'Abidjan (Figure 19). Les visites effectuées sur différents sites du district d'Abidjan, pendant la saison de pluie, ont révélé que plusieurs communes du District sont impactées par les inondations.

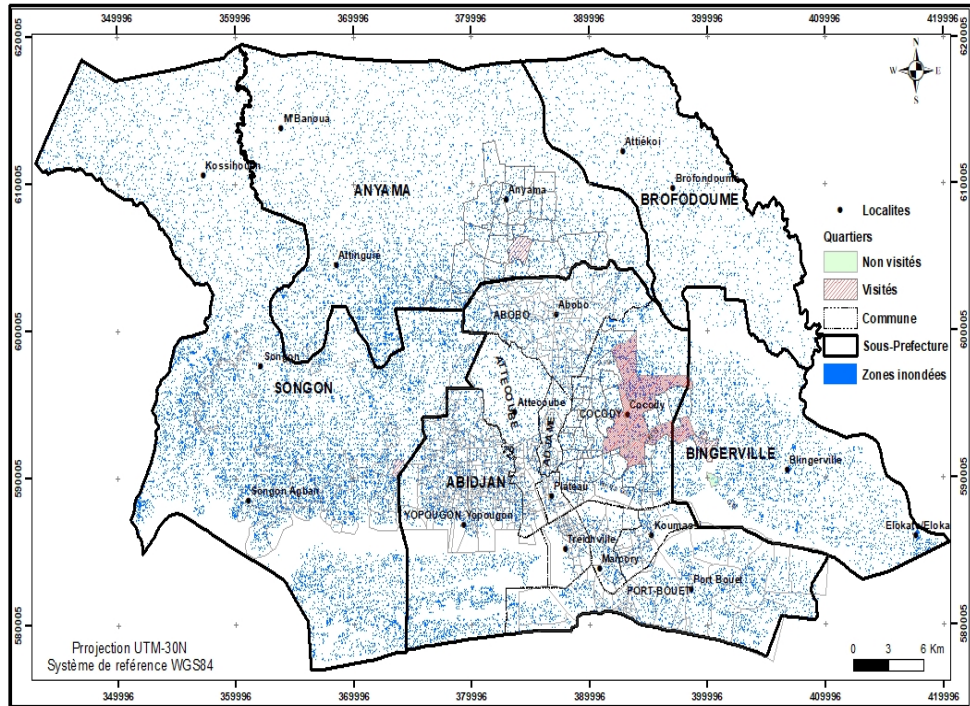


Figure 19. Visite de terrain pour la validation de l'emplacement des zones inondées du District d'Abidjan, lors de la crue du 25 juin 2020.

Plusieurs sites inondés correspondent également aux emplacements cartographiés (Figure 20), notamment :

- Riviera Palmeraie : rue Ministre ; rue Marie Rose Guiraud ; Université Islamique ;
- Riviera 3 : Réconciliation ; COPRACI ; SYNACASS-CI 1 ; SIDECI ; SCI CIAD PRIMO ; le Triangle ; boulevard François Mitterrand entre le rond-point de la Riviera 3 et le carrefour 9 kilos ; Saint Viateur Promogim; Allabra ;
- Riviera Bonoumin : les chevaux ; Riviera Digue de Bonoumin ; Bonoumin Est (CHIC SHOP) ; Bonoumin (derrière COOPEC) ; bassin de rétention de crue ;
- Riviera golf 4 SCI Verdoyante ; Riviera Laurier 17 et SICOGI (route Bingerville) ;
- Riviera Attoban Zinsou; Angre Star 9 B+ ; Angre SCI Fondasso; Angre cité Latrille (Manguier 1 et 2) ;
- Angre : château fin goudron ;
- II Plateaux : carrefour ZOO ; Bassin du Vallon ;
- Lotissement Djorogobite ; Lotissement de Bessikoi ;
- Quartier Ran à Anyama.

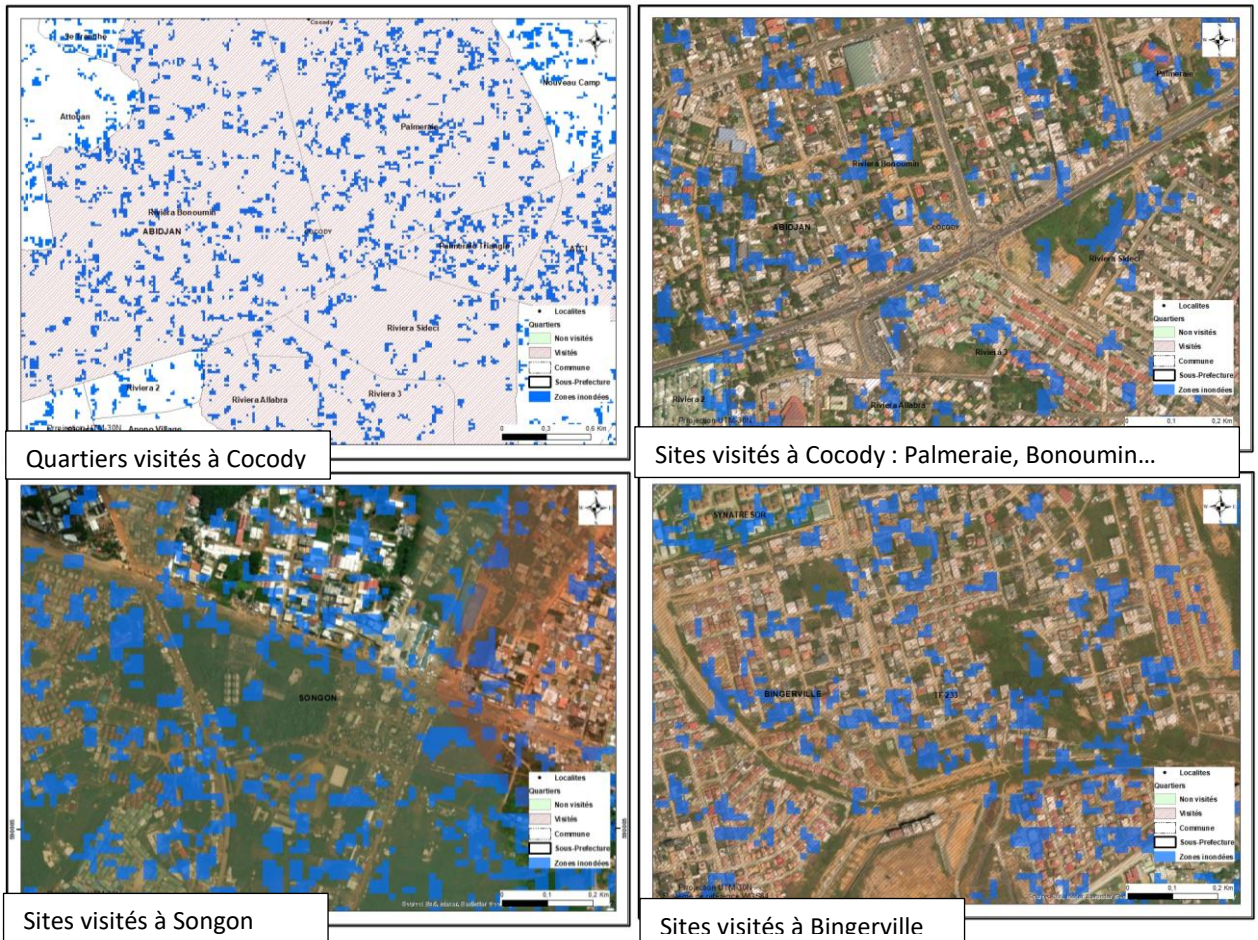


Figure 20: Quelques sites visités pour la validation de l'emplacement des zones inondées du District d'Abidjan, lors de la crue du 25 juin 2020

Ces inondations sont principalement attribuables au débordement des canaux de drainage aménagés dans les zones fortement urbanisées, à l'urbanisation intense des terrains en amont, au dépassement des capacités des ouvrages hydrauliques de drainage, et à l'augmentation de la fréquence des pluies extrêmes. Dans ces divers sites inondés, les niveaux d'eau les plus élevés ont été observés avec une moyenne variante entre 2 et 1,25 mètres lors de l'événement pluvieux du 25 juin 2020.

Cette mission de validation terrain organisée principalement durant la saison pluvieuse de juin 2020 sur le district d'Abidjan, a permis de recueillir des informations passées et actuelles sur les inondations.

3.1.5 Automatisation du processus et développement de l'application web

L'interface de l'application web, développée à partir de Google Earth Engine, offre la possibilité de visualiser de manière précise, à une date au choix, les données associées à une crue historique antérieure ayant survenu dans le District d'Abidjan (Figure 21).

L'utilisateur a la flexibilité de sélectionner une date à partir de 2015 et, pour cette date de crue spécifique, de produire automatiquement les éléments suivants :

- l'emplacement des zones inondées et une estimation de leur superficie ;
- les cartes des enjeux affectés et une estimation de leurs superficies, en termes de terres cultivées inondées, zones de cultures inondées, routes inondées et bâtiments affectés ;
- et une estimation de la population affectée,

Les valeurs statistiques visualisables au niveau de l'application, sont des valeurs arrondies et ont une précision de 99,88 %. Pour la crue du 25 juin 2020, la superficie des zones inondées, calculée à partir de Google earth engine est estimée à 25250 ha. La superficie à la même date de crue est estimée à 25219,23ha, après l'export au format raster et l'analyse via un logiciel SIG. L'accès à l'application web se fait en utilisant le lien suivant depuis un navigateur connecté :

<https://essai1.users.earthengine.app/view/flood-sianys2023>.

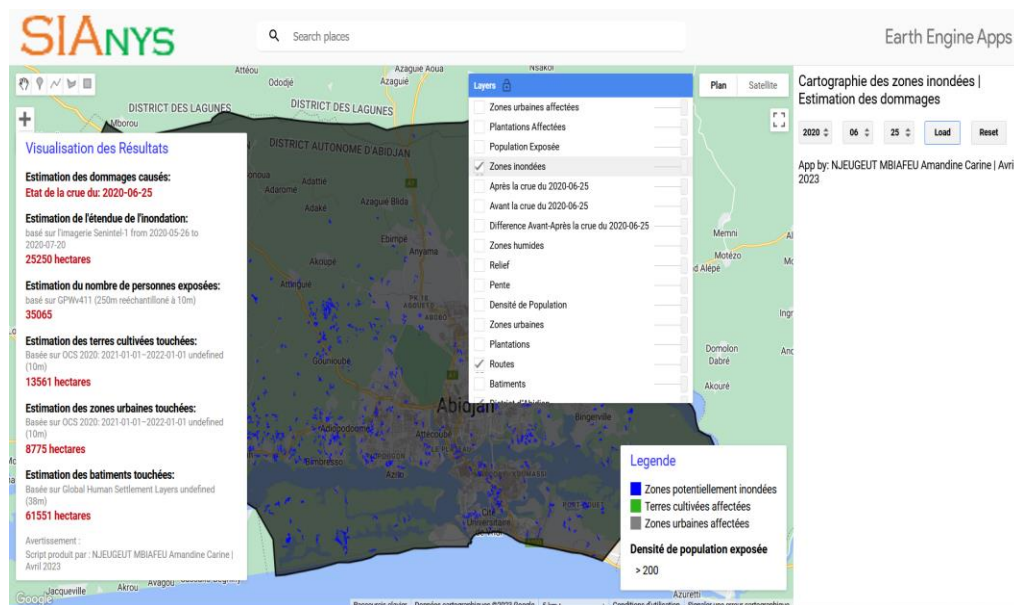


Figure 21. Interface SIANYS de visualisation automatique des zones inondées et des enjeux affectés lors de la crue historique du 20 juin 2020, survenue dans le District d'Abidjan.

3.2 Discussions

La télédétection est une technique pertinente pour la cartographie des zones qui sont touchées par les inondations. Elle permet de collecter des données précises et de haute résolution qui sont indispensables pour une gestion efficace des risques d'inondation. En utilisant des images satellites, il est possible de surveiller l'évolution des zones inondées au fil du temps, d'identifier les zones à risque et de localiser les zones touchées par les inondations. Plusieurs études ont été menées sur la télédétection et la cartographie des zones inondées, et elles ont toutes obtenu des résultats significatifs (Bi et al., 2014; Danumah et al., 2016; Kouamé et al., 2013; Z. A. Ouattara et al., 2021).

Les données satellitaires à haute résolution spatiale, en particulier celles obtenues grâce au RADAR, présentent des avantages similaires à ceux des données aériennes, en permettant de produire des images avec une couverture spatiale importante sur de longues sections de cours d'eau. Plusieurs auteurs ont également utilisé des données radar pour cartographier les zones inondées (Benzougagh et al., 2021; Jo et al., 2018; Kurapati et al., 2020). Ces études ont démontré l'efficacité des données radar, en particulier celles obtenues avec Sentinel-1, pour cartographier avec une grande précision les zones inondées, grâce à sa capacité à éviter les effets climatiques tels que les nuages et l'obscurité.

La configuration de la polarimétrie partielle VH de Sentinel-1 a été retenue car elle permet de fournir des résultats précis peu importe la saison ou la condition nuageuse. De nombreuses études ont également confirmé l'efficacité de la polarisation VH de Sentinel-1 pour la cartographie des zones inondées (Benzougagh et al., 2021; Kumar, 2019).

La capacité de GEE à traiter de grandes quantités de données selon le secteur d'étude permet d'effectuer des analyses plus complexes. Ces études ont montré que GEE est une plateforme fiable pour la cartographie des éléments de surface y compris les zones inondées, grâce à sa capacité à utiliser différentes sources d'images satellites et d'indices pour améliorer la détection des zones inondées (Njeugeut et al., 2023; Shahabi et al., 2020; Vanama et al., 2020).

L'approche par détection des changements sur une image sentinel-1 avant et après une crue historique, a permis de cartographier l'étendue des zones inondées en milieu urbain (De Almeida Pereira et al., 2019; Kefi et al., 2018; Shahabi et al., 2020). Le modèle numérique de terrain (MNT) de haute résolution Alos Polarsar et la couche des cours d'eau permanents ont été utilisés pour améliorer la précision de la cartographie des zones inondées. Le MNT a permis d'affiner les résultats de détection des zones humides en aidant à distinguer les zones planes des zones vallonnées. En utilisant la différence d'altitude entre les deux zones, il a été possible de détecter les zones qui sont

susceptibles d'être inondées et de cartographier avec plus de précision l'étendue des zones touchées.

L'automatisation du processus complet (extraction des zones inondées et estimation des dommages causées) sur la période allant de 2014 à la date actuelle, est l'une des particularités de la méthodologie utilisée. Elle met à profit la forte répétitivité temporelle des images satellites fournies par les capteurs Sentinel notamment, et la combinaison des informations extraites des MNT et spatio-cartes. Cette méthodologie permet de tirer parti des données satellites multi-dimensionnel et multi-source et les algorithmes d'intelligence artificielle disponibles dans GEE pour aller au-delà de la simple cartographie de l'aléa.

Les résultats obtenus montrent que les images satellites radar Sentinel-1, permettent de détecter les zones inondées. Les zones inondées cartographiées sont localisées et concentrées dans les quartiers situés le long des cours d'eau, dans les zones périurbaines, ainsi que dans les zones basses de la ville. Ces résultats sont appréciables au regard des réalités terrain et corroborent avec les résultats de plusieurs auteurs dans la zone d'étude (Danumah, 2016; Kangah & Alla, 2015; Konan, 2018). Ils permettent de mieux comprendre la répartition spatiale des zones inondées dans le District d'Abidjan et mettent en évidence l'efficacité de GEE et la capacité des images S1 à discriminer les zones humides.

Conclusion

La présente étude portant sur la cartographie des zones inondées et l'estimation des dommages causés dans le District d'Abidjan a montré que la télédétection et les technologies innovantes permettent de cartographier avec précision les éléments de surface. L'utilisation combinée des données satellitaires (radar Sentinel-1 et MNT ALOS) et des bases de données libres d'accès, a permis de cartographier avec une précision satisfaisante l'étendue des zones inondées, et d'estimer les dommages causés sur le milieu urbain, les terres cultivées, la population et les biens (routes et bâtiments). De même, l'éventail de possibilité qu'offre Google Earth Engine a permis de développer une application de suivi qui permet d'automatiser le processus à une date historique au choix. L'étude menée sur la crue du 25 juin 2020 a permis de cartographier une superficie de 25219,23 hectares de surface inondée, soit 11,50% de la superficie totale du District. La zone inondée cartographiée est répartie en 172186,55hectares d'enjeux (soit 80,52 %) et 41667,54 hectares de secteur non vulnérable (soit 19,48 %). L'analyse des dommages causés indique que les zones sensibles affectées se subdivisent en terres cultivées, qui couvrent 13 538,49 hectares (soit 53,68 %), et en zones urbaines, représentant 8 769,04 hectares (soit 34,77 %). La population impactée pendant cette crue est estimée à 35065 habitants. Une application web permet à l'utilisateur de

superposer la couche des zones inondées sur différentes couches d'enjeux afin de visualiser les zones affectées par les inondations (terres cultivées inondées, milieu urbain inondé, population exposée, routes exposées, équipements affectés) avec une estimation des superficies et des effectifs, à une date choisie. En raison de la menace significative qui pèse, il est impératif que les responsables portent une attention particulière à ces zones. En conséquence, les autorités compétentes devraient mettre en place des mesures rigoureuses pour prévenir des dommages plus graves, à l'image de ceux constatés après les inondations de juin 2020 dans les différentes communes du District d'Abidjan. La carte des zones potentiellement inondées élaborée représente un outil essentiel dont les décideurs pourront se servir pour orienter d'éventuelles décisions. Dans l'ensemble, il convient de noter que l'utilisation des technologies innovantes a été d'un grand apport pour l'automatisation de la cartographie des zones inondées et l'estimation des dommages depuis le cloud GEE sur la base des images radar sentinel-1 et de l'intelligence artificielle, en termes de gain de temps, d'espace de stockage, de process de traitement et d'automatisation.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

Remerciements

Nos remerciements vont à l'endroit de Dr. KOUAME KAN Jean, Directeur du Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), pour nous avoir accordé l'accès à ses locaux et équipements précieux.

References:

1. Adje, N. P., & Kouadio, K. F. (2021). Résilience des populations des zones à risque face aux inondations : le cas de la commune d'attecoubé. *International Journal of Humanities and Cultural Studies (IJHCS) ISSN 2356-5926*, 8(1), Article 1.
2. Alla, D. A., Atta, K. J.-M., & Yassi, G. A. (2018). Les risques naturels et leurs manifestations dans une ville secondaire : érosion et inondation à daloa (centre-ouest de la Côte d'Ivoire). *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, 2, Article 2.

3. ALLA, D. A., DOS SANTOS, S., & Zahiri, E.-P. (2019, juin). Penser les vulnérabilités aux inondations par le prisme de la justice environnementale : cas du projet evidence à Abidjan”. *Cyberséminaire Justice Environnemental - Justice environnementale et sanitaire au Nord et au Sud Quels apports heuristiques de l’interdisciplinarité ?* <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-02481276>
4. Ambroise, B., Beven, K., & Freer, J. (1996). Toward a Generalization of the TOPMODEL Concepts : Topographic Indices of Hydrological Similarity. *Water Resources Research*, 32(7), 2135-2145. <https://doi.org/10.1029/95WR03716>
5. Benzougagh, B., Frison, P.-L., Meshram, S. G., Boudad, L., Dridri, A., Sadkaoui, D., Mimich, K., & Khedher, K. M. (2021). Flood Mapping Using Multi-temporal Sentinel-1 SAR Images : A Case Study— Inaouene Watershed from Northeast of Morocco. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00683-y>
6. Bi, V. H. N., Saley, B., Wade, S., Valere, D. E., Kouame, F., & Affian, K. (2014). *Cartographie du risque d’inondation par une approche couplée de la télédétection et des systèmes d’informations géographiques (sig) dans le département de sinfra (centre-ouest de la cote d ’ivoire)*. 22.
7. Danumah, J. H. (2016). *Assessing Urban Flood Risks under Changing Climate and Land Use in Abidjan District, South Cote d’Ivoire* [Doctor Of Philosophy In Climate Change and Land-use]. Kwame Nkrumah University Of Science And Technology A.
8. Danumah, J. H., Odai, S. N., Saley, B. M., Szarzynski, J., Thiel, M., Kwaku, A., Kouame, F. K., & Akpa, L. Y. (2016). Flood risk assessment and mapping in Abidjan district using multi-criteria analysis (AHP) model and geoinformation techniques, (cote d’ivoire). *Geoenvironmental Disasters*, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0044-y>
9. De Almeida Pereira, G. H., Cechim Júnior, C., Fronza, G., & Deppe, F. A. C. (2019). multitemporal analysis of sar images for detection of flooded areas in pantanal. *Raega - O Espaço Geográfico Em Análise*, 46(3), 88. <https://doi.org/10.5380/raega.v46i3.66988>
10. Eba, A. E. L., Ake, G. E., Gouadou, D. F., & Jourda, J. (2021). Evaluation de la Vulnérabilité à l’Inondation des Communes à Proximité des Grandes Villes Ouest Africaines : Cas de la Commune de Bingerville (Est d’Abidjan – Côte d’Ivoire). *European Scientific Journal ESJ*, 17(14). <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n14p277>
11. Fulbert, Y. (2022, juillet 8). *Côte d’Ivoire / Inondations : 19 morts enregistrés à Abidjan (bilan)*. Agence Anadolu.

- <https://www.aa.com.tr/fr/afrique/côte-divoire-inondations-19-morts-enregistrés-à-abidjan-bilan/2632800>
12. Habal, T. K. (2021). Appréhender l'urbanisation en milieu tropical humide. *Le 4 pages*. <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03472004>
 13. Hauhouot, C. (2008). Analyse du risque pluvial dans les quartiers précaires d'Abidjan. Etude de cas à Attécoubé. *Geo-Eco-Trop*, 32, 75-82.
 14. INS. (2014). *Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2014* (p. 49) [Rapport d'exécution et présentation des principaux résultats].
 15. Jo, M.-J., Osmanoglu, B., Zhang, B., & Wdowinski, S. (2018). Flood extent mapping using dual-polarimetric sentinel-1 synthetic aperture radar imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3, 711-713. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-711-2018>
 16. Jourda, J. P., Kouamé, K. F., Soro, N., Kouamé, K. J., Kouadio, B. H., Saley, M. B., Kouamé, K., & Ahoussi, E. (2003). *Gestion et protection des eaux souterraines urbaines : Apports d'un système d'information géographique à la réalisation de la carte de vulnérabilité de la nappe du continental terminal au niveau de l'agglomération d'Abidjan*. 11.
 17. Kangah, A., & Alla, D. A. (2015). Détermination des zones à risque d'inondation à partir du modèle numérique de terrain (MNT) et du système d'information géographique (SIG) : Cas du bassin-versant de Bonoumin-Palmeraie (commune de Cocody, Côte d'Ivoire). *Geo-Eco-Trop*, 39(2), Article 2.
 18. Kefi, M., Mishra, B. K., Kumar, P., Masago, Y., & Fukushi, K. (2018). Assessment of Tangible Direct Flood Damage Using a Spatial Analysis Approach under the Effects of Climate Change : Case Study in an Urban Watershed in Hanoi, Vietnam. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/ijgi7010029>
 19. Konan, A. N. (2018). *Urban Flood modelling and Floodplain Mapping using ArcGIS, HEC-HMS and HEC-RAS in Abidjan city, Côte D'Ivoire – West Africa : Case study of the watershed of Bonoumin - Rivièra Palmeraie*. <http://repository.pauwes-cop.net/handle/1/372>
 20. Konaté, L., Kouadio, B. H., Djè, B. K., Ake, G. E., Gnagne, L., Kouame, M. K., & Biémi, J. (2016). *Caractérisation des pluies journalières intenses et récurrences des inondations : Apport des totaux glissants trois (3) jours à la détermination d'une quantité seuil d'inondation (District d'Abidjan au Sud-Est de la Côte d'Ivoire) (Heavy daily rainfall characterization and flooding repeating: contri.*

21. Kouamé, K. A., Biemi, J., & Kouame, K. F. (2013). *Application du modèle hydrologique distribué hydrotel à la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide soumis aux pressions anthropiques cas du bassin versant du bandama en Côte D'Ivoire* (UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières). Article UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières.
22. Kumar, R. (2019). Flood Inundation and Hazard Mapping of 2017 Floods in the Rapti River Basin Using Sentinel-1A Synthetic Aperture Radar Images. In P. Kumar, M. Rani, P. Chandra Pandey, H. Sajjad, & B. S. Chaudhary (Éds.), *Applications and Challenges of Geospatial Technology: Potential and Future Trends* (p. 77-98). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99882-4_6
23. Kurapati, P. V., Babu, A., Rajosarimalala, S. T., & Pyla, K. R. (2020). *Flood mapping and damage assessment using sentinel – 1 & 2 in google earth engine of port berge & mampikony districts, sophia region, madagascar*. 9.
24. Long, S., Fatoyinbo, T. E., & Policelli, F. (2014). Flood extent mapping for Namibia using change detection and thresholding with SAR. *Environmental Research Letters*, 9(3), 035002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/035002>
25. Mahaman Bachir, S., Kouamé, F., Penven, M. J., & Biémi, J. (2005). *Cartographie des zones à risque d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire : Apport des MNA et de l'imagerie satellitaire*.
26. Njeugeut, M. A. C., Ta, M. Y., Jean-Robert, K. S., Armel, K. K., Vincent, A. T., & Patrice, J. J. (2023). Mapping of land use units in the District of Abidjan using Google Earth Engine cloud, based on Sentinel-2 optical images and Machine Learning algorithms. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 40(1), Article 1.
27. Ouattara, T., Kouamé, F., Zo-Bi, C., Vaudry, R., & Grinand, C. (2021). Changements d'occupation et d'usage des terres entre 2016 et 2019 dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire : Impact des cultures de rente sur la forêt. *Bois & Forêts Des Tropiques*, 347, 91-106. <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a31868>
28. Ouattara, Z. A., Kablan, A. K. M., Gahi, N. Z., Ndouffou, V., & Dongo, K. (2021). Analyse des facteurs anthropiques et des risques sanitaires associés aux inondations par débordement d'un canal d'évacuation des eaux à Abidjan. *Environnement, Risques & Santé*, 20(5), 467-482. <https://doi.org/10.1684/ers.2021.1583>

29. PopulationStat. (2021). *Abidjan, Ivory Coast Population (2021) — Population Stat.* <https://populationstat.com/ivory-coast/abidjan>
30. Savane, I., Coulibaly, K. M., & Gioan, P. (2003). Étude comparative de trois méthodes de calcul du coefficient de tarissement des cours d'eau. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 14(1), 37-42.
31. Shahabi, H., Shirzadi, A., Ghaderi, K., Omidvar, E., Al-Ansari, N., Clague, J. J., Geertsema, M., Khosravi, K., Amini, A., Bahrami, S., Rahmati, O., Habibi, K., Mohammadi, A., Nguyen, H., Melesse, A. M., Ahmad, B. B., & Ahmad, A. (2020). Flood Detection and Susceptibility Mapping Using Sentinel-1 Remote Sensing Data and a Machine Learning Approach: Hybrid Intelligence of Bagging Ensemble Based on K-Nearest Neighbor Classifier. *Remote Sensing*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/rs12020266>
32. Vanama, V. S. K., Mandal, D., & Rao, Y. S. (2020). GEE4FLOOD : Rapid mapping of flood areas using temporal Sentinel-1 SAR images with Google Earth Engine cloud platform. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14(3), 034505. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.034505>