

Cartographie Automatique des Zones Inondées et Evaluation des Dommages dans le District d'Abidjan à l'Aide de l'Imagerie Satellitaire Radar Sentinel-1 Depuis Google Earth Engine

Njeugeut Mbiafeu Amandine Carine

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

Youan 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

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/esipreprint.10.2023.p124](https://doi.org/10.19044/esipreprint.10.2023.p124)

Approved: 05 October 2023

Posted: 06 October 2023

Copyright 2023 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Njeugeut Mbiafeu A.C., Youan Ta M., 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 à l'Aide de l'Imagerie Satellitaire Radar Sentinel-1 Depuis Google Earth Engine*. ESI Preprints. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.10.2023.p124>

Resume

La connaissance de la localisation et de l'étendue des zones inondées dans le District d'Abidjan au sud de la Côte d'Ivoire, fréquemment affectée

par les inondations pendant la saison des pluies et avec une réponse différente des précipitations et du ruissellement dans chacun de ses sous-bassins, a des implications importantes pour la gestion du risque. L'objectif de cette étude est de générer automatiquement des cartes de l'étendue des inondations dans le district d'Abidjan et d'évaluer les zones touchées, grâce au potentiel du cloud, aux algorithmes d'apprentissage automatique et à l'utilisation de données provenant de divers capteurs de télédétection optique Sentinel-2, SAR Sentinel-1 et MNT Polarsar. L'approche méthodologique a consisté à implémenter dans Google Earth Engine un script qui permet d'abord 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. 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 et superposées aux zones inondées cartographiées, permettant ainsi d'évaluer la superficie des zones touchées. De plus, une interface web a été conçue à l'aide des packages de Google Earth Engine, offrant à l'utilisateur la possibilité 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. La cartographie des zones inondées à la date du 20 juin 2020 a révélé une superficie totale de 21 763,05 hectares de zones inondées dans le District d'Abidjan. Une estimation des dégâts causés par cette crue du 20 juin 2020 indique que 13 170,17 hectares d'enjeux ont été affectés en moyenne, ce qui représente 60,5 % des zones inondées. Cette répartition se décompose en 7 875,06 hectares (soit 36,2 %) de terres agricoles touchées et 5 295,11 hectares (soit 24,3 %) de zones urbaines touchées, impactant en moyenne 64 877 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.

Mot-cles: Inondation, Intelligence artificielle, Apprentissage automatique, Sentinel-1, Alos Polarsar, 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

Njeugeut Mbiafeu Amandine Carine

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

Youan 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

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

Understanding the location and extent of flooded areas in the Abidjan District in southern Côte d'Ivoire, which is frequently affected by floods during the rainy season, and with a unique response to precipitation and runoff in each of its sub-basins, has significant implications for risk management. The objective of this study is to automatically generate maps of flood extent in the Abidjan district and assess the affected areas, leveraging the potential of the cloud, machine learning algorithms, and data from various optical remote sensing sensors, including Sentinel-2, Sentinel-1 SAR, and Polarsar DTM. The methodological approach involved implementing a script in Google Earth Engine that first accurately maps the extent of flooded areas using a change detection method based on Sentinel-1 (SAR) data before and after a specific flood event. Then, various asset classes (such as crops, inhabited areas, buildings, roads, and population density) were extracted from various free data sources and overlaid on the mapped flooded areas, allowing for an assessment of the affected area.

Additionally, a web interface was designed using Google Earth Engine packages, providing users with the ability to visualize the extent of flooded areas and maps of affected asset classes, along with statistical estimates, for a given date within the range from 2013 to the present. The mapping of flooded areas as of June 20, 2020, revealed a total area of 21,763.05 hectares of flooded zones in the Abidjan District. An estimation of the damages caused by this flood on June 20, 2020, indicates that an average of 13,170.17 hectares of assets were affected, representing 60.5% of the flooded areas. This breakdown includes 7,875.06 hectares (36.2%) of affected agricultural lands and 5,295.11 hectares (24.3%) of affected urban areas, impacting an average of 64,877 peoples. The results of this study have shown that the central part of the study area, above the lagoon, has the highest potential for flood risk due to the terrain morphology and the high vulnerability of built-up areas occupying the floodplain.

Keywords: Flooding, Artificial Intelligence, Machine Learning, Sentinel-1, Alos Polsar, Abidjan, Côte d'Ivoire, Damages

1 Introduction

Les inondations récentes en Afrique de l'Ouest et centrale ont touché cinq millions de personnes dans 19 pays de la région, entraînant des centaines de victimes (PAM, 2022). 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; AfricaNews, 2022; ALLA et al., 2019; Bi et al., 2014; Boyossoro et al., 2007; Danumah et al., 2016; Kangah & Della, 2015; K. Konan, 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 (Adje & Kouadio, 2021; ALLA et al., 2019; Kouamé et al., 2016; T. Ouattara et al., 2021), de l'imperméabilisation des sols (Dongo, 2006; Jourda et al., 2003; Konaté et al., 2016), de la topographie du milieu (Alla et al., 2018; Ambroise et al., 1996; Kangah & Della, 2015), du développement urbain mal contrôlé et rapide (Habal, 2021; Savane et al., 2003), et des

variations des événements pluvieux (Alla et al., 2018; Hauhouot, 2008; Konaté et al., 2016).

Face aux fréquentes inondations à Abidjan, une carte du risque pertinente et détaillée s'avère indéniablement un outil essentiel pour la planification territoriale, l'information des habitants, l'amélioration de la planification des interventions d'urgence, ainsi que 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, tels que l'infiltration ou la recharge du sol, le relief, l'occupation des sols, les précipitations, et bien d'autres (Alla et al., 2018; ALLA et al., 2019; Attoumane et al., 2022; Bi et al., 2014; Coulibaly et al., 2014; Danumah, 2016; Dongo, 2006; Eba et al., 2021; K. Konan, 2021; Konaté et al., 2016; Kouakou, 2015; Kouassi et al., 2018; N'Dri et al., 2017; Z. A. Ouattara et al., 2021). 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.

2 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).

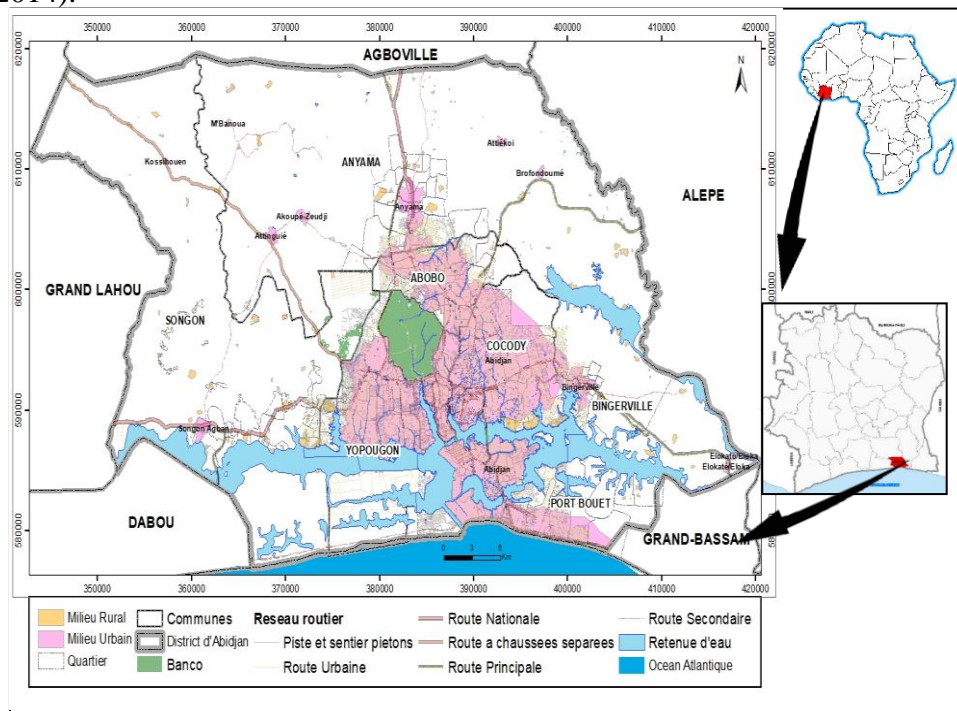


Figure 1. Situation géographique du District d'Abidjan

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).

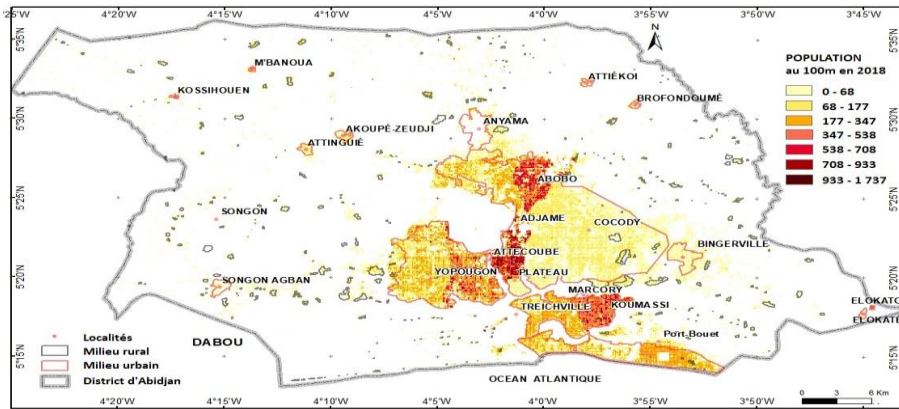


Figure 2. Répartition spatiale de la population du District d’Abidjan au 100m (PopulationStat, 2021)

Les fleuves jouent principalement un rôle de drainage des eaux, tandis que certains cours d'eau ont été aménagés en caniveaux (Figure 3). La zone est drainée par quelques rivières dont le régime hydrologique est 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. Le système de drainage dans la zone d'étude présente une densité moyenne, avec un régime essentiellement irrégulier.

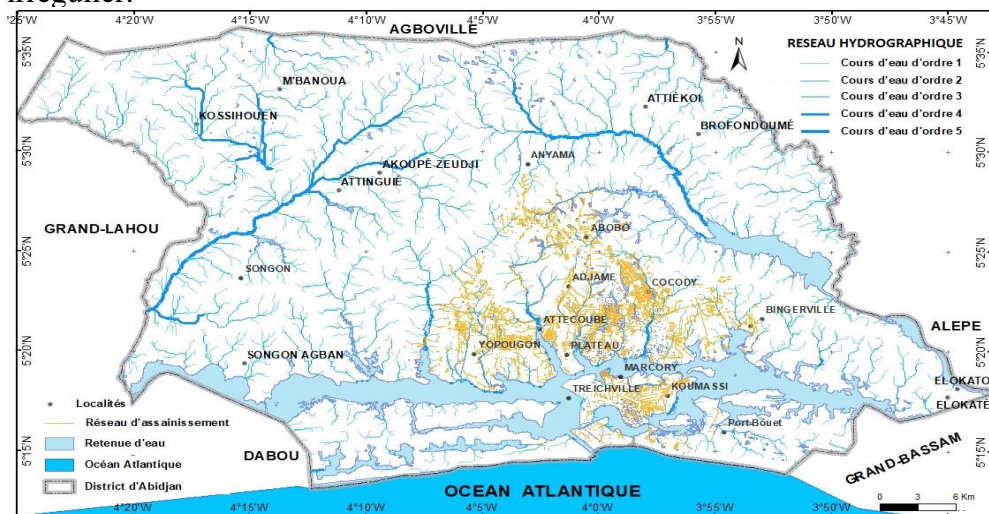


Figure 3. Système de drainage des eaux de la zone d’étude

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, on observe un débordement rapide des ouvrages de drainage. 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.

La zone est drainée par quelques rivières dont le régime hydrologique est 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.

3 Matériel et méthode

4 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 (Tableau1).

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 satellites de types RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) Sentinel-1 en bande C de la collection COPERNICUS/S1, avec une polarisation verticale d'émission/horizontale de réception (VH) à double bande et une taille de pixel de 10 m allant de 2014 jusqu'à la date actuelle, 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. Aussi 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 nos choix sur les images satellites 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.

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, nous avons également utilisé les packages `ui.Select()`, `ui.Button()` et `ui.Panel()`.

5 Méthode

La méthodologie générale utilisée pour cartographier les zones potentiellement inondées et 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**).

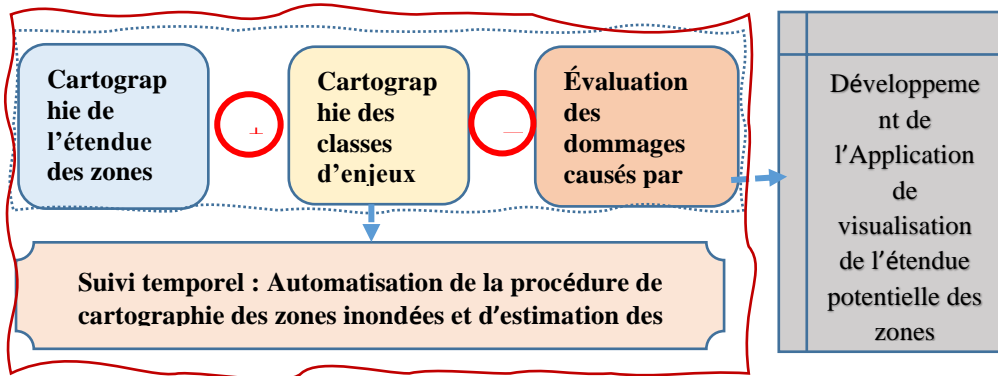


Figure 4. Diagramme simplifié de la Cartographie automatique des zones inondées et évaluation des dommages depuis Google Earth Engine

6 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.

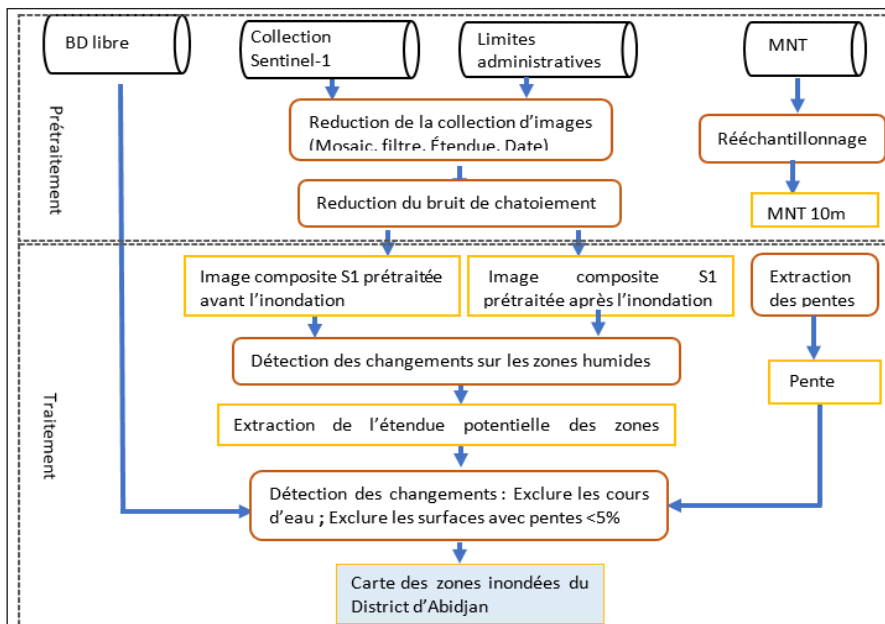


Figure 5. Organigramme de la chaîne de traitement pour la cartographie des zones inondées avec Google Earth Engine

7 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 Google Earth Engine (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 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 événement 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 Palsar de 12,5m de résolution a subi un rééchantillonnage à 10m 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 qui ont une résolution de 10m et obtenir une représentation plus lisse du terrain, car les MNT de haute résolution peuvent contenir des bruits ou des artefacts dus à des variations mineures dans les données d'origine.

8 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 événement 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).

$$CD = F/R \quad (\text{Éq. 1})$$

Ce qui permet d'obtenir une couche raster de l'indice de différence qui montre le degré de changement par pixel dans la scène, y compris les zones inondées.

Ensuite le seuillage est appliqué à l'indice de différence 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 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.

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

9 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).

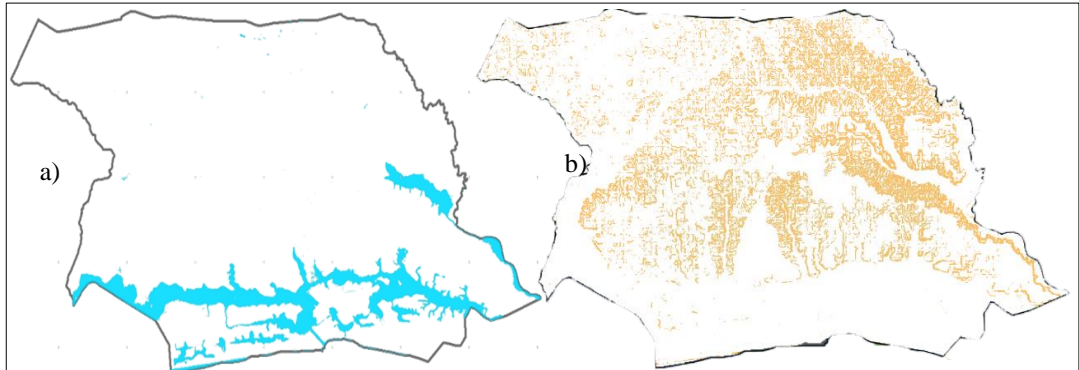


Figure 6. Paramètres d'affinages de l'étendue des zones inondées : cours d'eau (a) et pentes supérieures à 5 (b).

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 a une résolution de 30 m et 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 semblent 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.

Enfin l'unité minimale cartographique est fixé à 0,1 ha soit 10 pixels voisins, en vertu de la nouvelle réglementation forestière ivoirienne, qui fixe la superficie minimale de forêt à 0,1 hectare. La connectivité des pixels d'inondation est évaluée afin d'éliminer ceux qui sont connectés à dix voisins ou moins. Cette opération réduit le bruit du produit de l'étendue des inondations.

10 Extraction des classes d'enjeux

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

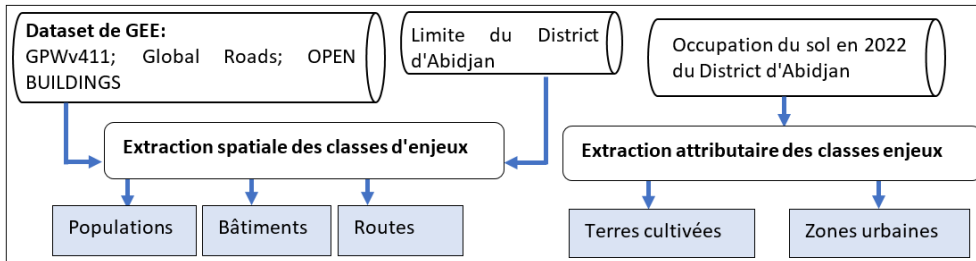


Figure 7. Extraction des classes d'enjeux étudiées, du District d'Abidjan

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, rééchantilonnée à 10m 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, on peut procéder à l'analyse des résultats pour estimer l'ampleur des dommages qui est quantifié par la superficie des zones inondées et le pourcentage des enjeux endommagés.

11 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 pour évaluer les dommages a consisté à calculer la superficie totale des zones affectées et à identifier les zones les plus touchées. Les cartes de dommages résultantes sont exploitées pour la visualisation, la représentation graphique des zones affectées et la superposition avec les zones affectées sur des images de référence.

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 intercèdent les zones inondées.

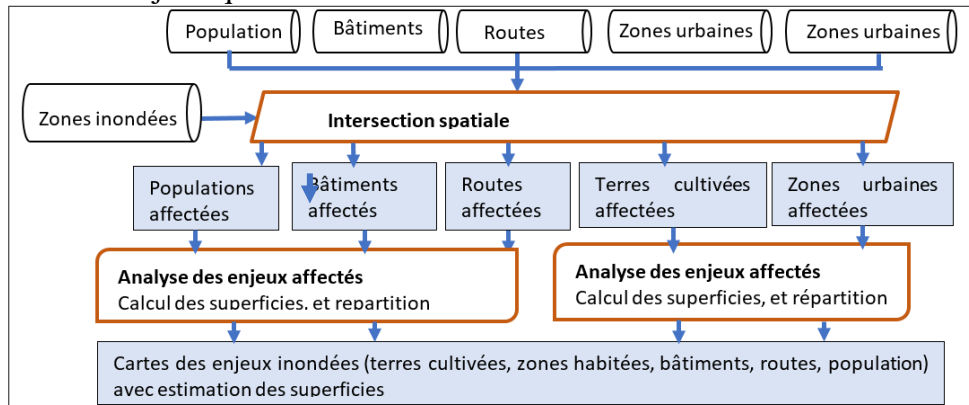


Figure 8. Évaluation des dommages causés par les inondations

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

- la cartes des terres cultivées affectées avec une estimation de la superficie ;
- la cartes des Zones urbaines affectées avec une estimation de la superficie ;
- le nombre de personnes exposées avec une estimation de la superficie ;
- la carte des bâtiments avec une estimation de la superficie;
- la carte du réseau routier affecté avec une estimation de la superficie.

12 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 :

- les images appropriées provenant de Sentinel-1 sont sélectionnées et traitées automatiquement au sein de GEE via des scripts visant à éliminer le bruit et à effectuer les phases préliminaires de prétraitement et de calibrage des données.
- l'algorithme de détection des changements est ensuite implanté dans GEE. Ce faisant, les étapes nécessaires pour identifier les zones

inondées à partir des images Sentinel-1 ont été appliquées. Cette procédure est automatisée pour différentes dates.

- puis les données relatives à l'occupation du sol ont été intégrées dans le processus en ayant recours à des filtres et des opérations spatiales. 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.

Earth Engine est livré avec une API d'interface utilisateur qui permet de créer une application Web interactive alimentée par Earth Engine avec des widgets prêts à l'emploi, tels que des boutons, des menus déroulants, des curseurs, etc. - et un hébergement cloud gratuit pour permettre à quiconque de publier une application avec seulement quelques lignes de code. Les applications s'exécutent dans votre navigateur, elles doivent donc utiliser des fonctions côté client. Toutes les fonctions de l'interface utilisateur sont contenues dans l'interface utilisateur. Les packages tels que `ui.Select()`, `ui.Button()`, et `ui.Panel()` ont été utilisés pour englober divers types de widgets et pour permettre le fonctionnement de l'application à partir du navigateur. 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 telles 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 de 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.

13 Resultat et discussion

14 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.

15 Cartographie des zones potentiellement inondées

16 *Prétraitement des images*

L'analyse comparative entre l'image filtrée et non filtrée en polarisation VH montre que le filtre moyen de rayon 5m 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**).

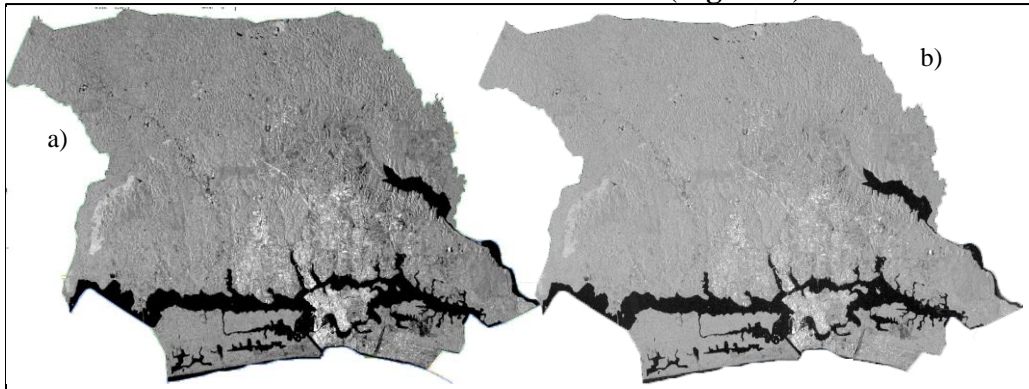


Figure 9. Réduction du chatoiement sur les images Sentinel 1 du District d'Abidjan : image brute (a) et image filtrée (b)

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 l'extraction des zones inondées.

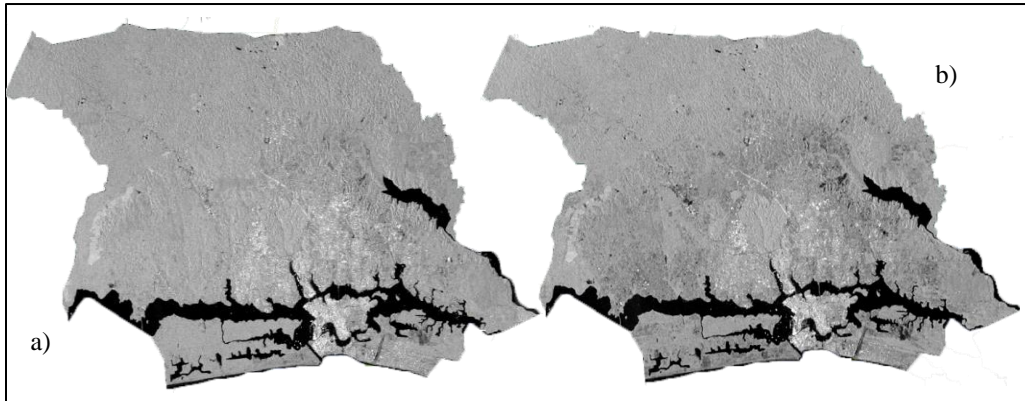


Figure 10. Images prétraitées avant (a) et après (b) la crue du 20 juin 2020 du District d'Abidjan

17 Étendues potentielles des zones inondées

La **Figure 11a** 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 11b**, montre l'étendue de l'inondation potentielle (valeurs supérieures à 1,25).

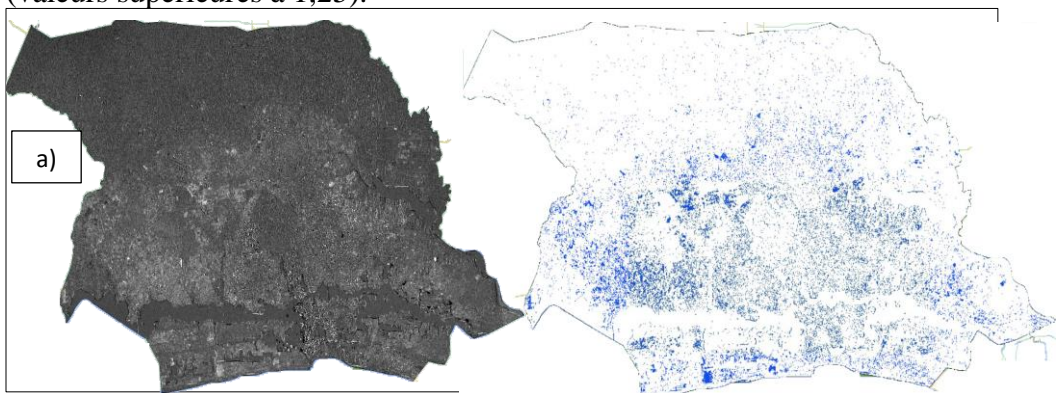


Figure 11. Couche raster binaire de la différence entre l'image avant et après la crue du 25 juin 2020 (a) et l'étendue de l'inondation potentielle (b) du District d'Abidjan

18 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 21763,051056 ha.

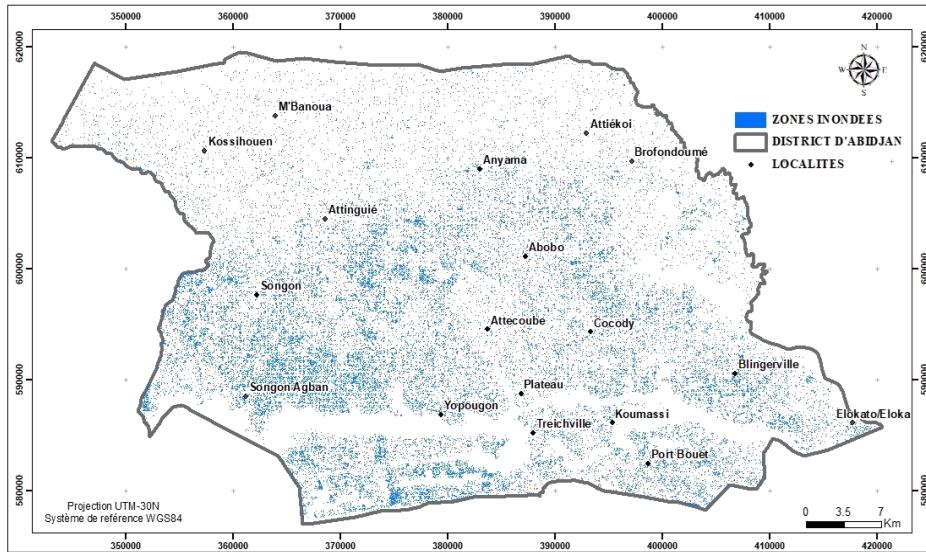


Figure 12. Carte des zones inondées du District d’Abidjan issue du traitement des images Sentinel-1 depuis GEE

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

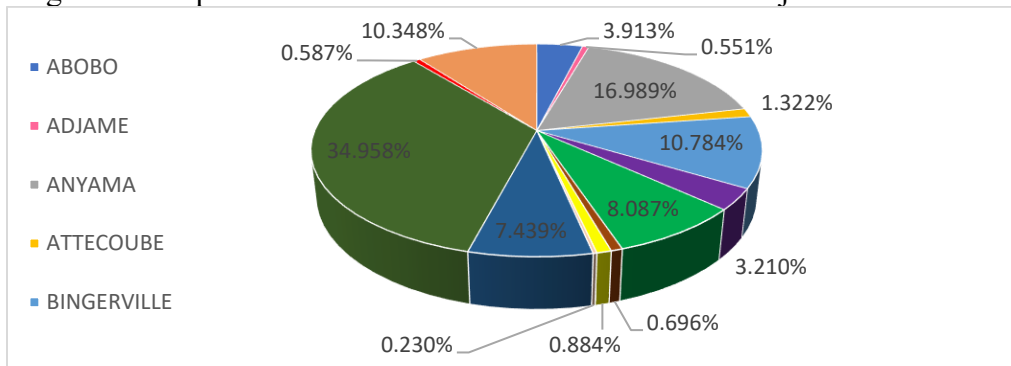


Figure 13. Répartition des zones inondées dans les différentes communes du District d’Abidjan

L’analyse spatiale de la répartition des zones inondées permet de classer les communes du District d’Abidjan selon leur degré d’exposition aux inondations. Classées comme les communes les plus touchées on a 34,958% des zones inondées du District localisé dans la commune de Songon, 16,989% à Anyama, 10,784% à Bingerville, 10,348% à Yopougon, 8,087% à Cocody, 7,439% à Port-Bouet, 3,913% à Abobo et 3,210% dans la commune de Brofodoumé. Et classées comme communes les moins touchées on a 0,884% des zones inondées du District localisé à Marcory, 0,696% à Koumassi, 0,587% à Treichville, 0,551% à Adjame et 0,230% dans la commune du Plateau.

L'observation générale dans l'ensemble des communes du District, révèle que la superficie des zones inondées est inférieure à 0,2% de la superficie totale (**Tableau 2**). La commune de Cocody est la commune la plus impactée avec 0,15% de sa superficie totale couverte.

Tableau 2. Analyse statistique des zones à risque d'inondation

Commune	Superficie des Commune (ha)	Superficie des zones inondées ha)	Pourcentage des Zones inondées (%)	Pourcentage de la surface de la commune inondée (%)	Pourcentage de la surface de la commune non inondée (%)
ABOBO	71544791,99	851,732886	3,913%	0,0012%	99,9988%
ADJAME	12003464,05	120,031876	0,551%	0,0010%	99,9990%
ANYAMA	508756882,3	3698,081314	16,989%	0,0007%	99,9993%
ATTECOUBE	45143201,58	287,862593	1,322%	0,0006%	99,9994%
BINGERVILLE	292744017,2	2347,383507	10,784%	0,0008%	99,9992%
BROFODOUME	186533998,3	698,649892	3,210%	0,0004%	99,9996%
COCODY	117768045,5	1760,23802	8,087%	0,0015%	99,9985%
KOUMASSI	19420277,07	151,492738	0,696%	0,0008%	99,9992%
MARCORY	18895031,83	192,500577	0,884%	0,0010%	99,9990%
PLATEAU	6358327,138	50,020481	0,230%	0,0008%	99,9992%
PORT BOUET	127881082,1	1619,196915	7,439%	0,0013%	99,9987%
SONGON	60655700,2	7609,360189	34,958%	0,0013%	99,9987%
TREICHVILLE	16488175,1	127,823407	0,587%	0,0008%	99,9992%
YOPOUGON	162323609,2	2252,512855	10,348%	0,0014%	99,9986%
TOTAL	2192416604	21766,88725			

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

16 Évaluation des dommages causés par les inondations

17 *Enjeux affectés par les inondations*

Nous observons que sur une superficie de 21763,051056 ha de surface inondée, 13170,17 ha sont composés d'enjeux soit 60.5% répartie en terre cultivée 7875.06 ha (36.2%) et milieu urbain ha (24,3%). 8592,88 ha (39,5%) des surfaces inondées du District n'est pas vulnérable aux inondations (**Tableau 3**). Ce pendant le nombre de personne affecté sur la base de la densité de la population est estimé à 64877 habitants.

Tableau 3. Répartition des 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	7875.06	36.2%
Milieu urbain	5295.11	24.3%
Reste	8592.88	39.5%
Superficie inondée	21763.05	

La **figure 14** présente les cartes des enjeux affectés par l'évènement de crue du 25 juin 2020.

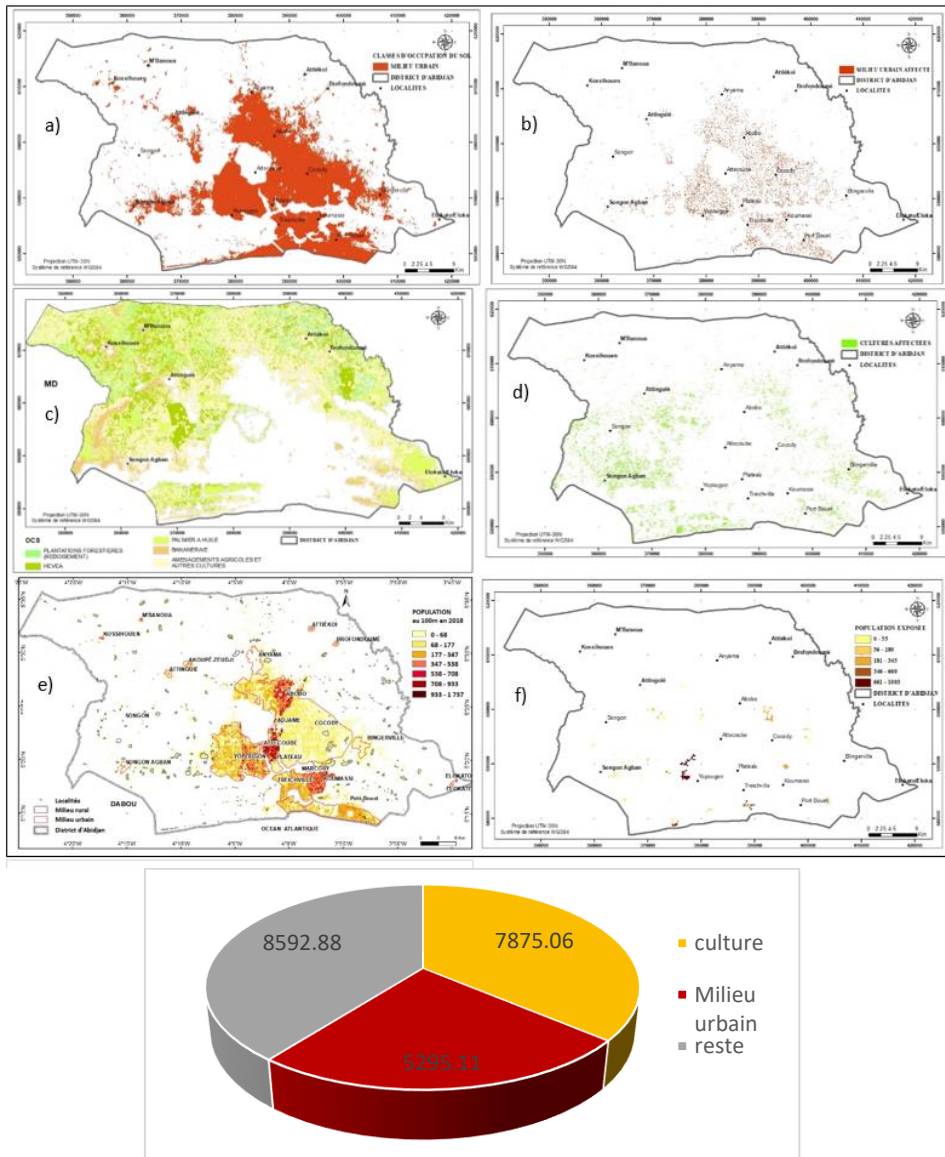


Figure 14. Carte des enjeux affectés par les inondations dans le District d'Abidjan issue du traitement des images Sentinel-1 depuis GEE repartis en classe : milieu urbain (a) et milieu urbain affecté par les inondations (b), cultures (c) et cultures affectées par les inondation (d); et densité de la population (e) et densité de la population affectée (f)

18 *Visualisation des autres classes d'enjeux*

L'interface de engine permet de visualiser l'intersection entre les zones potentiellement inondées et les classes d'enjeux (**Figure 15**).



Figure 15. Visualisation des autres classes d'enjeux affectés par les inondations du 20 juin 2020 dans le District d'Abidjan : routes (a) et routes affectées (b), bâtiments (c) et bâtiments affectés (d)

19 *Analyse statistique des dommages causés par les inondations*

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**.

Tableau 5. Statistiques des enjeux affectés par les inondations par commune de la zone d'étude

Commune	Cultures affectées		Milieu urbain affecté	
	Superficie (ha)	Proportion (%)	Superficie (ha)	Proportion (%)
ABOBO	150,61	1,91%	587,80	11,10%
ADJAME	8,89	0,11%	102,70	1,94%
ANYAMA	1163,31	14,77%	459,58	8,68%
ATTECOUBE	9,94	0,13%	81,34	1,54%
BINGERVILLE	949,35	12,06%	458,33	8,66%
BROFODOUME	102,25	1,30%	16,04	0,30%
COCODY	330,96	4,20%	1139,07	21,51%
KOUMASSI	4,70	0,06%	135,85	2,57%
MARCORY	12,03	0,15%	173,98	3,29%
PLATEAU	2,41	0,03%	40,92	0,77%
PORT BOUET	712,21	9,04%	632,99	11,95%
SONGON	3787,89	48,10%	299,42	5,65%
TREICHVILLE	9,91	0,13%	120,86	2,28%
YOPOUGON	630,60	8,01%	1046,22	19,76%
TOTAL	7875,06		5295,11	

Les terres cultivées sont beaucoup plus affectées par les inondations dans la commune de Songon soit 3787,89 ha (48,10%) pendant la crue du 25 juin 2020. Par contre le milieu urbain de la commune de Cocody est la plus impactée soit 1139,07 ha (21,51%).

Le graphe de la **figure 16** permet de mieux évaluer l'impact des inondations sur les classes de vulnérabilité dans le District d'Abidjan.

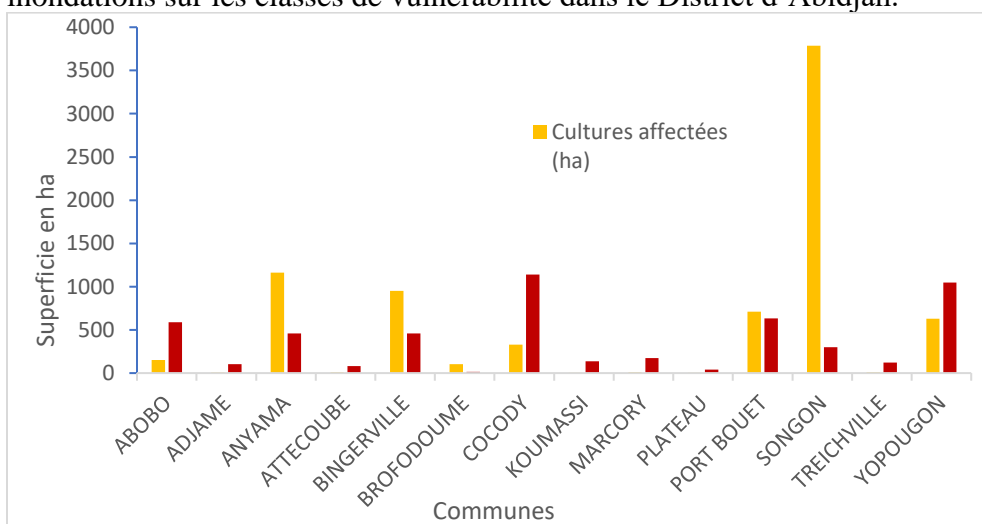


Figure 16. Carte des zones inondées du District d'Abidjan issue du traitement des images Sentinel-1 depuis GEE

Les sites inondés correspondent également aux zones où la densité de la population est élevée avec une fourchette de valeur comprise entre 0 à 1003 habitants tous les 100m.

20 Automatisation du processus et développement de l'application web

L'application web développée depuis google earth engine, et accessible via le lien : : <https://essai1.users.earthengine.app/view/flood-sianys2023>, permet de visualiser avec précision à une date au choix les informations liées à une crue historique passée (Figure 17).

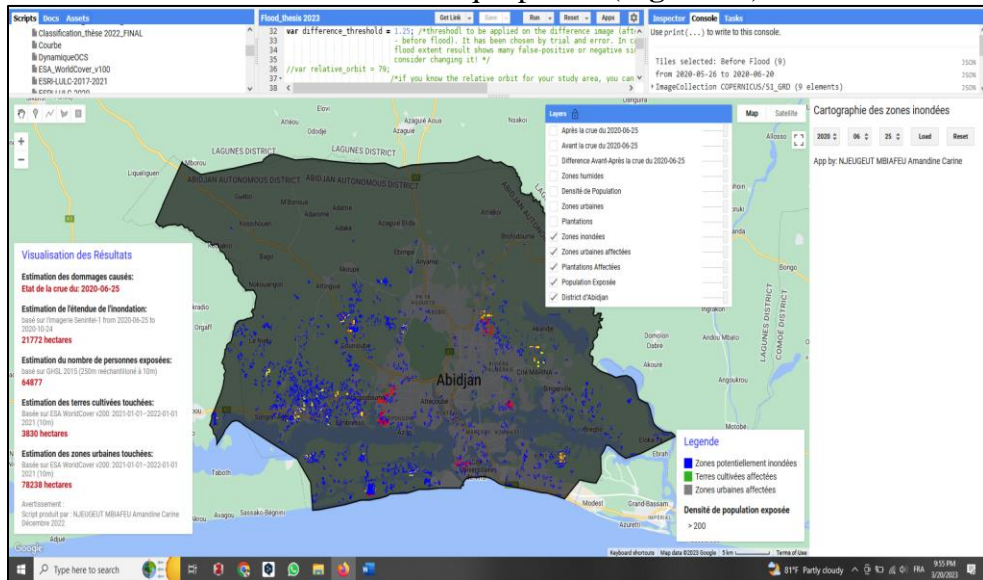


Figure 17. Interface de visualisation de l'état des lieux de la crue historique du 20 juin 2020, survenue dans le District d'Abidjan

L'interface web développée donne la possibilité à l'utilisateur de sélectionner une date de crue et de générer automatiquement à la date spécifiée :

- 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.

21 Discussion

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; Kouakou, 2015, 2015; Kouamé et al., 2013; Kouassi et al., 2018; Z. A. Ouattara et al., 2021; Saley et al., 2005, 2009).

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 dans le District (Benzougagh et al., 2021; Hostache et al., 2007; Jo et al., 2018; Kurapati et al., 2020; Li et al., 2020; Shen et al., 2019). 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.

Le choix des images issues de l'orbite ascendant plutôt que descendante pour l'étude dans le District d'Abidjan est dû à la disponibilité des images Sentinel-1 en bande C. 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; R. Kumar, 2019; Kurapati et al., 2020).

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). Nous avons également utilisé le modèle numérique de terrain (MNT) de haute résolution Alos Polsar et la couche des cours d'eau permanents 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 causés) 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 plusieurs auteurs dans la zone d'étude (ALLA, 2013; Danumah, 2016; Kangah & Alla, 2015; A. N. Konan, 2018; Kouakou, 2015; Ulrich, 2019). 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.

En, effet, 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'offrent Google Earth Engine a permis de développer une application de suivi qui permet d'automatiser le processus à une date au choix.

L'étude menée sur la crue du 25 juin 2020 a permis de cartographier une superficie de 21 763,051056 hectares de surface inondée, répartie en 13 170,17 hectares d'enjeux (soit 60,5%) et 8 592,88 hectares de secteur non vulnérable (soit 39,5%). L'analyse des dommages causés indique que 36,2% des terres cultivées et 24,3% du milieu urbain ont été affectés. 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 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.

Remerciements

Au terme de ce travail, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers le Dr. KOUAME KAN Jean, le Directeur du Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), pour nous avoir accordé l'accès à ses locaux et équipements précieux.

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.

References:

1. Adje, N. P., & Kouadio, K. F. (2021). RESILIENCE DES POPULATIONS DES ZONES A RISQUE FACE AUX INONDATIONS : LE CAS DE LA COMMUNE D'ATTECOUBE. *International Journal of Humanities and Cultural Studies (IJHCS)* ISSN 2356-5926, 8(1), Article 1.
2. AfricaNews. (2022, juillet 10). Côte d'Ivoire : Abidjan exposée aux inondations. Africanews. <https://fr.africanews.com/2022/07/10/cote-divoire-abidjan-exposee-aux-inondations/>

3. ALLA, D. A. (2013). *Cartographie des zones à risques d'inondation, d'érosion et de mouvement de terrain dans la ville d'Abidjan, PNUD, MESUDD.* (p. 37).
4. 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.
5. 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>
6. 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>
7. Attoumane, A., Dos Santos, S., Kacou, M., André, A. D., Karamoko, A. W., Seguis, L., & Zahiri, E.-P. (2022). Individual perceptions on rainfall variations versus precipitation trends from satellite data: An interdisciplinary approach in two socio-economically and topographically contrasted districts in Abidjan, Côte d'Ivoire. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 81, 103285. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103285>
8. 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>
9. 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.
10. Boyossoro, H. K., Koffi, F. K., Bachir, M. S., Biemi, J., & Traore, I. (2007). Insécurité climatique et géorisques en Côte d'Ivoire: Étude du risque d'érosion hydrique des sols dans la région semi-

- montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Sécheresse*, 18(1), Article 1.
11. Coulibaly, T. J. H., Coulibaly, N., Koffi, D., Camara, M., & Savane, I. (2014). Cartographie des zones à l'origine de l'ensablement des canaux du bassin Versant du Gourou (Abidjan—Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 642-653.
 12. 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.
 13. 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>
 14. 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>
 15. Dongo, K. (2006). *NALYSE DES DEFICIENCES DANS LA GESTION DU DRAINAGE URBAIN ET DES DECHETS SOLIDES ET LIQUIDES DANS LES QUARTIERS PRECAIRES DE YOPOUGON (ABIDJAN, COTE D'IVOIRE): APPROCHE CARTOGRAPHIE-SIG, MODELISATION ET SOCIO-ANTHROPOLOGIE* [THESE UNIQUE DE DOCTORAT]. Université de Cocody.
 16. 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>
 17. 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>
 18. Habal, T. K. (2021). Appréhender l'urbanisation en milieu tropical humide. *Le 4 pages*. <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03472004>

19. Hauhouot, C. (2008). Analyse du risque pluvial dans les quartiers précaires d'Abidjan. Etude de cas à Attécoubé. *Geo-Eco-Trop*, 32, 75-82.
20. Hostache, R., Puech, C., & Raclot, D. (2007). Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.7722>
21. INS. (2014). *Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2014* (p. 49) [Rapport d'exécution et présentation des principaux résultats].
22. 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>
23. 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.
24. 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.
25. Kangah, A., & Della, A. 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)*. 12.
26. 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>
27. 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 - Riviera Palmeraie*. <http://repository.pauwes-cop.net/handle/1/372>

28. Konan, K. (2021). *IMPLICATIONS SOCIO-ÉCONOMIQUES DE LA RIZICULTURE ET RISQUES SANITAIRES DIAGNOSTIQUES À GAGNOA*. 16.
29. 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.*
30. Kouakou, K. S. (2015). *Cartographie du risque d'inondation du bassin versant du Gourou (District d'Abidjan)*. <http://repo.floodalliance.net/jspui/handle/44111/4285>
31. Kouamé, K. A., Biémi, 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.
32. Kouamé, K. A., Oulare, S., Adon, G. C.-R., Kouassi, A. M., & Bernier, M. (2016). Un modèle hydrologique distribué pour la simulation des écoulements des eaux du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire, Afrique de l'Ouest. *Afrique Science*, 12(1), Article 1. <http://espace.inrs.ca/id/eprint/4696/>
33. Kouassi, A. M., Nassa, R. A. K., Bi, T. M. N., Kouame, K. F., & Biémi, J. (2018). Caractérisation des débits d'étiage dans un contexte de changements climatiques : Cas du bassin versant du N'zi (Cote d'Ivoire). *Agronomie Africaine*, 30(3), Article 3. <https://doi.org/10.4314/aga.v30i3>
34. 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
35. 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.
36. Li, D., Wu, B., Chen, B., Wang, Y., Zhang, Y., Xue, Y., & Qin, C. (2020). *Fusion of Sentinel-1 radar and Sentinel-2 MSI imagery for*

- water extraction in Tibetan plateau* (EGU2020-4512; Numéros EGU2020-4512). Copernicus Meetings.
<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-4512>
37. 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*.
 38. N'Dri, B. É., Niamke, K. H., Koudou, A., & N'Go, Y. A. (2017). CARTOGRAPHIE DES FORMES D'ÉROSION HYDRIQUE DANS LA COMMUNE URBAINE D'ATTÉCOUBÉ (ABIDJAN, CÔTE D'IVOIRE). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 19(4), Article 4.
 39. 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.
 40. 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 & FORETS DES TROPIQUES*, 347, 91-106. <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a31868>
 41. 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>
 42. PopulationStat. (2021). *Abidjan, Ivory Coast Population (2021)—Population Stat*. <https://populationstat.com/ivory-coast/abidjan>
 43. Saley, M. B., Kouamé, F. K., Penven, M. J., & Biémi, J. (2005). *CARTOGRAPHIE DES ZONES À RISQUE D'INONDATION DANS LA RÉGION SEMI-MONTAGNEUSE À LOUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE : APPORTS DES MNA ET DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE*. 5, 16.
 44. Saley, M. B., Tanoh, R., Kouamé, K. F., Oga, M. S., Kouadio, B. H., Djagoua, E. V., Oulare, S., Youan, T. M., Affian, K., Jourda, J. P., Savane, I., & BIEMI, J. (2009). *Variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie et son impact sur les ressources en eaux souterraines : Cas du district d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire)*. 18.

45. 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.
46. 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>
47. Shen, X., Wang, D., Mao, K., Anagnostou, E., & Hong, Y. (2019). Inundation Extent Mapping by Synthetic Aperture Radar: A Review. *Remote Sensing*, *11*(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/rs11070879>
48. Ulrich, E. A. K. (2019). *Flood Inundation Modeling in the Gourou Watershed of Côte d'Ivoire, West Africa*. <http://repository.pauwes-cop.net/handle/1/342>
49. 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>