Surveillance des zones à risque d'habitation à l'aide de la Géo-intelligence artificielle (GeoAI) dans la commune de Cocody

N'Gouan Désiré Alex AKA
ndealak@gmail.com

Krapa Valérie BOA
boa_valery@yahoo.fr
Laboratoire Africain de Démographie et de Dynamiques Spatiales (Laboraddys), Université Alassane Ouattara, Bouaké, Côte d'Ivoire

Kpan Noël VEI
veizrangbeu@gmail.com
Département de Géographie, Université Alassane Ouattara de Bouaké

Résumé

Depuis la fin des années 1980, La Côte d'Ivoire a amorcé une nouvelle politique, celle du transfert de compétences aux collectivités territoriales, visant ainsi à rapprocher l'administration des citoyens et à réduire les disparités régionales. Le développement local se substitue désormais au modèle de développement « Top-down ». Le territoire ivoirien est devenu ainsi le champ d'opérationnalisation des objectifs globaux de l'État et des aspirations de la population locale (Soumahoro, 2015). Cette politique vise à promouvoir le bien-être des populations par la transformation qualitative de leur niveau de vie et de leur cadre de vie. Ce qui n'est toujours pas le cas quand celles-ci sont en proie à une résurgence d'effondrements d'habitation, de glissement de terrain et d'inondation. Cet article a pour objectif général de cartographier les zones à risque d'habitation dans la commune de Cocody en utilisant des techniques de l'intelligence artificielle géospatiale (GeoAI) intégrant l'analyse du Normalized Difference Built-up Index (NDBI), afin de fournir des informations précises et exploitables pour la planification urbaine durable et la réduction des risques pour les habitants. La méthodologie adoptée s'appuie sur l'analyse d'image satellite de Sentinelle 2 de 2022 et 2023 à partir de la plateforme Google Earth Engine, la recherche documentaire, l'observation sur le terrain et le traitement cartographique avec le logiciel ArcGIS Pro 3.2.1. Cette étude permet d'obtenir, comme résultat, une carte de la densité des constructions. Les quartiers comme Djorobité, Djibi, Angré Château et Bessikoi enregistrent une nette augmentation des constructions, contrairement aux quartiers de Cocody Danga, Riviera 2 et la Riviera palmeraie pour lesquelles les constructions connaissent une légère diminution. Par ailleurs l'analyse révèle une corrélation significative entre les valeurs du NDBI et les zones à risque d'habitation, démontrant que les zones fortement urbanisées ou soumises à des changements dans l'utilisation des terres présentent un risque accru pour les habitants.

Mots-clés : Cocody, construction, habitation, intelligence artificielle géospatiale (GeoAI), surveillance, norme ISO 31000, Méthode SWOT

Monitoring of Residential Hazard Zones Using Artificial Geo-Intelligence (GeoAI) in the Commune of Cocody

Abstract

Since the late 1980s, Côte d'Ivoire has initiated a new policy, that of transferring powers to local authorities, thus aiming to bring the administration closer to citizens and reduce regional disparities. Local development is now replacing the "Top-down" development model. The Ivorian territory has thus become the operational field of the overall objectives of the State and the aspirations of the local population (Soumahoro, 2015). This policy aims to promote the well-being of the populations by the qualitative transformation of their standard of living and their living environment. This is still not the case

when they are prey to a resurgence of housing collapses, landslides and flooding. The general objective of this article is to map the housing risk areas in the commune of Cocody using geospatial artificial intelligence (GeoAI) techniques integrating the analysis of the Normalized Difference Built-up Index (NDBI), in order to provide precise and usable information for sustainable urban planning and risk reduction for residents. The methodology adopted is based on the analysis of Sentinel 2 satellite images for 2022 and 2023 using the Google Earth Engine platform, literature research, field observation, and cartographic processing using ArcGIS Pro 3.2.1 software. This study produces a building density map. Neighborhoods such as Djorobité, Djibi, Angré Château, and Bessikoi have seen a significant increase in construction, unlike the neighborhoods of Cocody Danga, Riviera 2, and Riviera Palmeraie, where construction has slightly decreased. Furthermore, the analysis reveals a significant correlation between NDBI values and residential risk areas, demonstrating that highly urbanized areas or those subject to land-use changes pose an increased risk to residents.

Keywords : Cocody, construction, housing, geospatial artificial intelligence (GeoAI), monitoring, ISO 31000 standard, SWOT method

Introduction

Depuis la fin des années 1980, les politiques d'aménagement centralisées du gouvernement ivoirien ont graduellement laissé la place à une nouvelle dynamique de décentralisation, qui a transféré des compétences aux collectivités territoriales. Ce nouveau modèle de développement local s'est éloigné de l'approche descendante « Top-down ». Conformément à cette logique, le territoire ivoirien devient le lieu où appliquer les objectifs globaux initiaux de l'État en considération des populations locales (Soumahoro, 2015). Cette politique vise à promouvoir le bien-être des populations par la transformation qualitative de leur niveau de vie et de leur cadre de vie. Ce qui n'est toujours pas le cas quand celles-ci sont en proie à une résurgence d'effondrements d'habitations, de glissements de terrain et d'inondations. L'avènement de nouvelles technologies telles que l'intelligence artificielle géospatiale (Geo AI) est une belle aubaine pour mieux comprendre et anticiper sur les manifestations de ces résurgences de risques d'habitation en milieu urbain. L'intelligence artificielle géospatiale, souvent connue sous le nom de GeoAI, a récemment gagné en popularité d'intérêt. La GeoAI consiste à utiliser des méthodes d'intelligence artificielle (IA), notamment l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond, pour produire des connaissances grâce à l'analyse de données spatiales et d'images. Les technologies de positionnement sont positivement affectées par l'IA. Les secteurs tels que la logistique et les systèmes de navigation sont les principaux domaines concernés[1]. La disponibilité accrue des données géospatiales, les progrès de l'Intelligence artificielle et la disponibilité d'une puissance de calcul massive ont abouti à la pertinence et au potentiel croissants de GeoAI. Le concept a été placé dans le cadre plus large des relations IA intra en tant que sous discipline de l'IA qui utilise l'apprentissage automatique pour extraire des connaissances à partir de données spatiales (Comité d'experts des Nations Unies, 2015). Les données spatiales se répandent dans divers domaines scientifiques et applications tels que les villes intelligentes, les transports, les affaires, la santé publique, la sécurité publique, la résilience aux catastrophes naturelles, le changement climatique, etc.(Abdelkhalek & Ashraf, 2022). L'objectif de cet article est de cartographier les zones à risque d'habitation dans la commune de Cocody en utilisant des techniques d'intelligence artificielle géospatiale (GeoAI) intégrant l'analyse du Normalized

[1] https://joinup.ec.europa.eu/collection/elise-european-location-interoperability-solutions-e-government/glossary/term/geospatial-artifical-intelligence

Difference Built-up Index (NDBI), afin de fournir des informations précises et exploitables pour la planification urbaine durable et la réduction des risques pour les habitants. Il s'agira en premier lieu d'identifier et évaluer les risques d'habitation dans la commune s'appuyant sur la norme ISO 31000. Dans un second lieu, la cartographie des zones en construction dans la commune sera réalisée. Enfin, une analyse sur la corrélation existante entre les zones en construction et les zones à risque d'habitation sera effectuée en vue d'établir la nécessité de prendre en considération le flux de constructions d'habitat aux abords des zones à risque dans la commune de Cocody.

1. Matériels et méthode utilisés

1.1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE LA COMMUNE DE COCODY

Cocody est une commune faisant partie du District Autonome d'Abidjan en Côte d'Ivoire. Elle se situe entre les coordonnées géographiques suivantes : de 5° 19′ 48″ à 5° 25′ 48″ de latitude Nord et de 4° 00′ 36″ à 3° 57′ de longitude Ouest. C'est une des communes les plus importantes d'Abidjan, connue pour ses quartiers résidentiels, ses institutions éducatives, et ses nombreuses ambassades. (Figure 1)

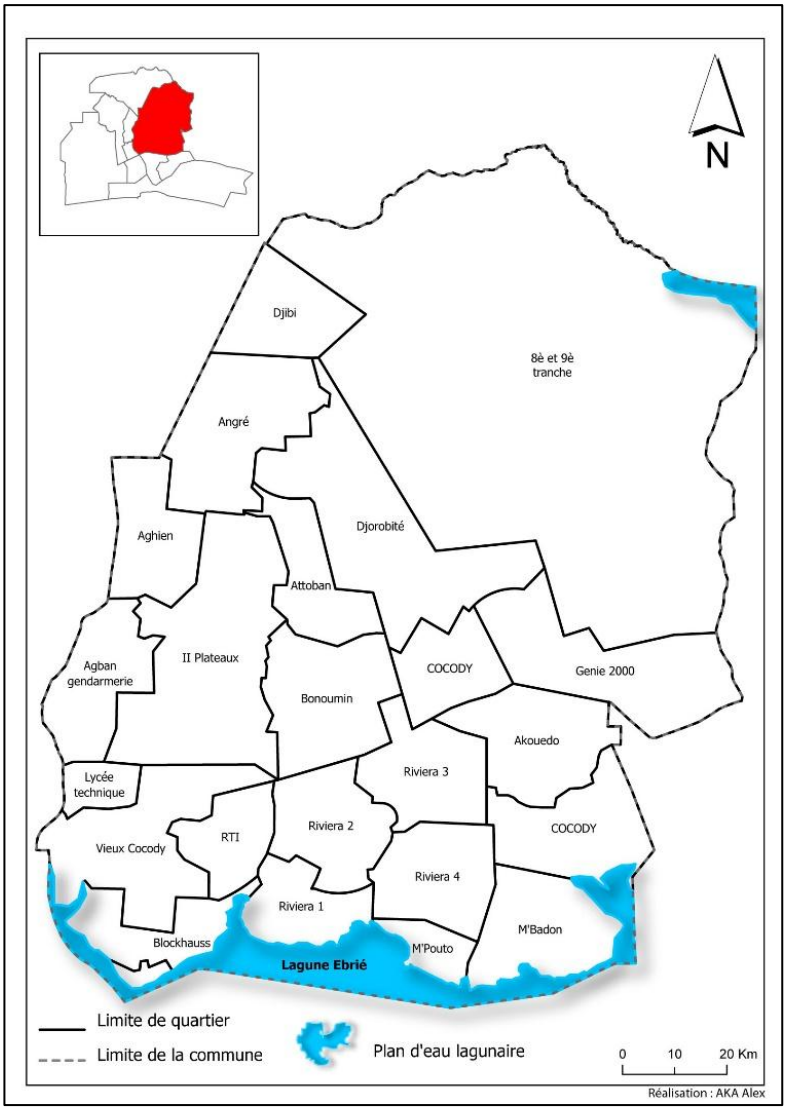

Figure 1 : Situation géographique de la commune de Cocody

Cette commune a connu un véritable dynamise démographique et se caractérise par ses fonctions administrative et résidentielle. La population est passée de 128 756 habitants en 1988 à 692 583 habitants en 2021, soit environ 12 % de la population actuelle de la ville d'Abidjan (INS, 1998 et 2021). Elle concentre plus de populations dans les quartiers de Agban gendarmerie, Riviera 2 et 3, Aghien, Angré et Djibi ainsi qu'Akouédo. Les quartiers de Vieux Cocody, Attoban, Bonoumin, II plateaux, Djorobité, Riviera palmeraie, Génie 2000, M'Pouto et M'Badon ont autour 3.000 habitants par endroit. Certains quartiers sont cependant en dessous de 1500 habitants c'est le cas de RTI, Lycée technique, Riviera 1, Abatta et Angré 8e et 9e tranche. (Figure 2).

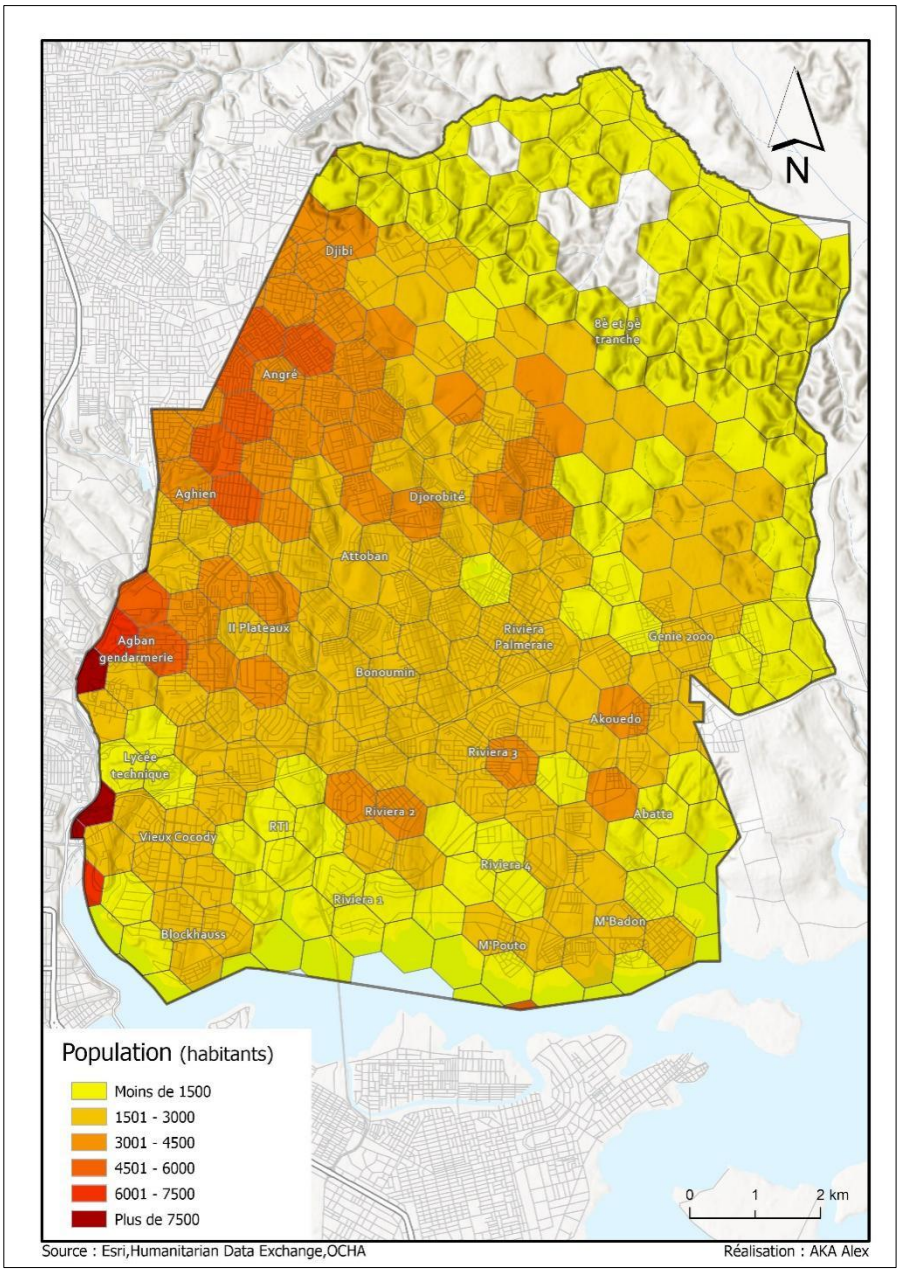

Figure 2 : Répartition de la population de la Commune de Cocody selon les grilles hexagonales H3 de 400 m de résolution (humdata, 2023)

ISSN 1817-5589

1.2. DONNÉES ET MATÉRIELS DE TRAVAIL

Cette étude requiert plusieurs bases de données comprenant des images satellites, des informations dérivées de l'occupation du sol accompagnée de bases de données libres. Les images satellites utilisées pour l'élaboration de cette étude émanent de la collection Sentinel-2. Sentinel -2 est une mission de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) composée de deux satellites (Sentinel-2A et Sentinel-2B) équipés de capteurs optiques multispectraux à haute résolution. Ils font également partie de la mission Copernicus. Ces satellites fournissent des images avec une résolution spatiale allant de 10 à 60 mètres, couvrant une large gamme de longueurs d'onde. Les images Sentinel-2 de la collection COPERNICUS/S2, en utilisant les bandes infrarouges proches (NIR) et moyens infrarouges (SWIR), ont été employées pour cartographier et analyser l'évolution de l'urbanisation dans la commune de Cocody. Le choix de ces bandes est guidé par leur capacité à distinguer efficacement les zones urbanisées des zones végétalisées. Contrairement aux bandes visibles, les bandes NIR et SWIR offrent une meilleure différenciation entre les surfaces construites et les surfaces naturelles. En plus de ces images satellites, il faut ajouter l'utilisation d'images obtenues à partir de drone avec une résolution allant de 10 cm à 1 m disponible sur le site openaerialmap.org.

Les données topographiques sont issues l'ensemble de données de la NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) version 3.0 Global 1 arc second (SRTMGL1). Les données SRTM offrent une résolution d'environ 30 mètres (1 arc-second) dans leur version SRTM Plus V3, ce qui permet de capturer des détails topographiques fins. Cette résolution est suffisamment élevée pour de nombreuses applications géographiques et environnementales. Les données SRTM sont librement disponibles au grand public via des plateformes comme EarthExplorer de l'USGS. De plus elles ont été largement validées et sont reconnues pour leur précision. Tous ces aspects renforcent notre choix dans les analyses basées sur ces données.

Des données sur les empreintes des bâtiments ont été obtenues à partir d'un modèle d'apprentissage profond entraîné sur un raster en entrée pour produire une classe d'entités contenant les objets qu'il trouve. Les entités sont des délimitations ou des polygones autour des toits des bâtiments. Le modèle a été formé à partir de l'outil Train Deep Learning Model, module du logiciel ArcGIS Pro 3.2.1.

Le Code Editor de Google Earth Engine (GEE) a été d'une grande utilité dans le cadre de l'obtention des données sur l'évolution urbaine de la commune de Cocody. Le Code Editor de Google Earth Engine (GEE) et le langage de programmation JavaScript ont été utilisés pour développer des scripts visant à cartographier les zones en construction. GEE offre une plateforme puissante pour l'analyse géospatiale en fournissant un accès à une vaste collection d'images satellites et d'outils d'analyse à grande échelle.

Les recherches documentaires ont permis de télécharger des données depuis le site data.humdata.org. Ainsi des données plus récentes sur la population de la commune de Cocody ont été obtenues. Ces données se présentaient sous la forme hexagonale respectant le système de grilles globales hexagonales, multirésolution, H3. Ce type de représentation se révèle avantageux dans la représentation de la population en ce sens qu'il prône une certaine uniformité et précision. Les hexagones couvrent uniformément une surface sans laisser d'espaces, contrairement aux carrés ou aux rectangles. Cela permet une représentation plus précise et homogène des données. La forme hexagonale permet de mieux visualiser les variations de densité de population. Les changements de densité sont plus facilement observables, car chaque hexagone couvre une zone équivalente, facilitant la comparaison.

1.3. MÉTHODE

La méthode utilisée dans le cadre de cette étude s'appuie sur cinq étapes essentielles qui se formulent comme suit :

Etape 1 : Identification des risques

Cette étape consiste à identifier les risques. À ce stade, la méthode SWOT sera utilisée pour évaluer les facteurs internes (forces et faiblesses) qui pourraient influencer la probabilité ou l'impact des risques identifiés.

Etape 2 : Analyse des risques

Il sera question dans cette seconde étape d'utiliser des images satellites à haute résolution pour cartographier les zones à risque d'habitation, en identifiant les caractéristiques géographiques associées aux risques (par exemple, la proximité des cours d'eau, les pentes abruptes, les zones propices aux glissements de terrain, etc.). Notre analyse s'est appuyée sur le processus de calcul de l'indice de végétation par différence normalisée, autrement dit le NDVI principalement dans Google Earth Engine (GEE). Ce processus a consisté à implémenter un script JavaScript dans l'interface de développement de GEE, dont les étapes ont été les suivantes :

-Définition de la zone d'intérêt à partir de la création d'une variable : la variable *Cocody* définit la géométrie de la zone de Cocody en utilisant les coordonnées géographiques.

-Importation des images Sentinel-2 : cette partie du script charge les images Sentinel-2 pour la zone de Cocody et pour l'année 2022. Les images avec une couverture nuageuse supérieure à 20 % sont exclues du processus.

-Calcul du NDVI à partir d'une fonction spécifique : La fonction *calculateNDVI* calcule le NDVI pour chaque image dans la collection Sentinel-2.

-Calcul de la moyenne du NDVI : le script prend en compte un calcul de la moyenne du NDVI pour l'année 2022 pour obtenir une seule image représentant le NDVI moyen.

-Configuration des Visualisations du résultat : les paramètres de visualisation définissent comment le NDVI sera affiché sur la carte en tenant compte des couleurs souhaitées.

-Exportation du résultat vers le cloud : il est donc utilisé la fonction *Export. image. toDrive* pour exporter l'image du NDVI moyen vers Google Drive.

Etape 3 : Evaluation des risques

A partir des résultats d'analyse des risques, il s'agira d'évaluer les habitations qui selon leurs positions géographiques qui sont les plus exposées aux risques.

Etape 4 : Traitements des risques

Dans cette rubrique il s'agit de mettre en œuvre des stratégies de traitement des risques pour réduire et éviter les risques identifiés.

 ISSN 1817-5589

Etape 5 : Surveillance

Mise en place d'un mécanisme de surveillance temporelle à partir des données de Google Earth Engine (GEE) et utilisation des techniques de GeoAI pour détecter les signes précurseurs des risques.

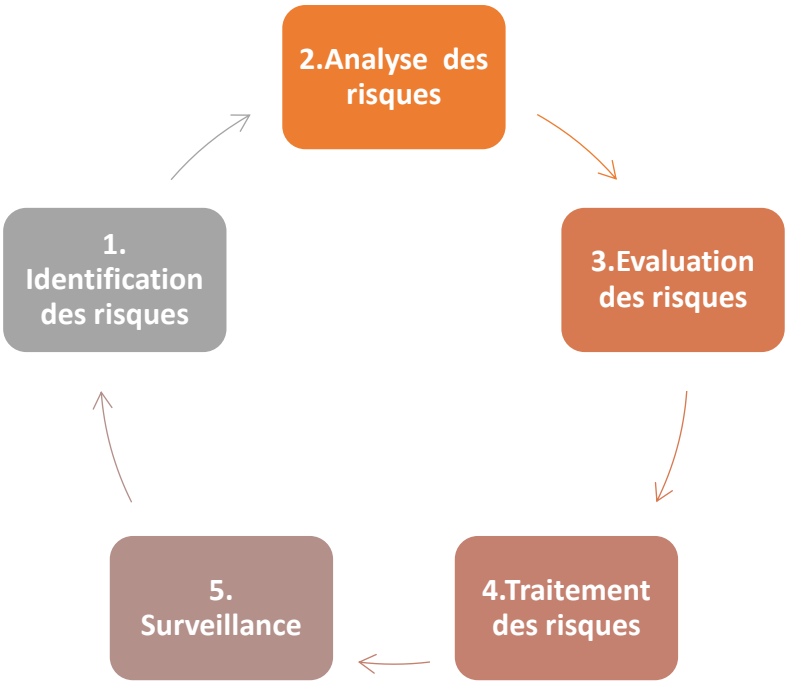

Figure 3 : Processus de Surveillance des Zones à Risque d'Habitation

Source : Etape du processus de Management des Risques[2]

3. Résultats

3.1 IDENTIFICATION DES RISQUES

Sur la base de la méthode SWOT, il est possible de mieux comprendre les facteurs qui influencent les risques d'habitation dans la commune de Cocody. Cette approche holistique aide à tirer parti des forces existantes, de remédier aux faiblesses, de saisir les opportunités et de minimiser les menaces. (Tableau I)

De ce fait, l'analyse SWOT de la commune de Cocody révèle des points forts et faiblesses ainsi que des opportunités sans toutefois omettre les menaces à prendre en compte dans le contexte de la surveillance des risques d'habitation.

[2] https://www.migso-pcubed.com/fr/blog/gestion-des-risques/etapes-du-management-des-risques/

Tableau I : Identification des risques dans la Commune de Cocody

Forces	Faiblesses	Opportunités	Menaces
Infrastructure urbaine développée : Cocody possède des infrastructures bien établies, comme des routes principales (boulevard Latrille, la voie Y4), facilitant l'accès et la gestion des risques.	**Urbanisation rapide et non planifiée :** Une urbanisation rapide peut mener à des constructions dans des zones à risque, sans respecter les normes de construction appropriées.	**Technologies avancées (GeoAI) :** L'utilisation de la GeoAI et des images satellites peut améliorer considérablement la surveillance et la gestion des risques en temps réel.	Anarchie de certaines zones urbaines.
Présence d'établissements éducatifs et de recherche : La commune abrite des institutions académiques et de recherche (par exemple, l'Université Félix Houphouët-Boigny), qui peuvent fournir des données et des analyses pour la surveillance des risques.	**Infrastructure vieillissante :** Certaines infrastructures peuvent être vieilles et mal entretenues, augmentant la vulnérabilité face aux risques naturels.	**Présence de plusieurs partenaires au développement** (Programme des Nations unies pour le développement, ONU Habitat, Banque mondiale).	**Lotissements anormaux**
Engagement communautaire : Une forte présence de communautés organisées qui peuvent participer activement à la surveillance et à la gestion des risques.	**Capacités limitées de gestion des déchets :** Une gestion inefficace des déchets peut aggraver les problèmes d'inondation et de glissement de terrain.	**Partenariats public-privé :** Opportunités de collaborations entre le secteur public et le secteur privé pour améliorer l'infrastructure et la résilience face aux risques.	**Changements climatiques :** Les phénomènes météorologiques extrêmes deviennent plus fréquents et plus sévères, augmentant les risques d'inondations et de glissements de terrain.
Schéma directeur adéquat : Existence d'un Schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme.	**Politique de logement :** Absence de politique d'identification des besoins en matière de logement.		**Croissance démographique :** L'augmentation de la population peut accentuer la pression sur les infrastructures existantes et les ressources, aggravant les vulnérabilités.
	Existence de conflits fonciers.		**Érosions et dégradations environnementales dues aux lotissements non maitrisés :** La déforestation et la dégradation des sols peuvent accroître les risques

ISSN 1817-5589

			naturels comme les glissements de terrain avec les nombreux lotissements non maitrisés
	Manque de suivi de l'urbanisation rapide de la commune		
	Méconnaissance de la population du Code de l'habitat		

Parmi les points forts, il faut noter que la Commune de Cocody bénéficie d'une infrastructure urbaine bien développée, facilitant l'accès et la gestion des risques grâce à des routes principales comme le boulevard Latrille et la voie Y4. La présence d'établissements éducatifs et pôles de recherche, tels que l'Université Félix Houphouët-Boigny, offre un accès à des données et analyses précieuses pour la gestion des risques. De plus, l'engagement communautaire dans la commune permet une participation active à la surveillance et à la gestion des risques.

Cependant, Cocody fait face à des faiblesses significatives, notamment une urbanisation rapide et non planifiée qui entraîne des constructions dans des zones à risque. Les infrastructures vieillissantes augmentent également la vulnérabilité aux risques naturels. La commune résidentielle de Cocody, à l'image de bien d'autres dans la métropole abidjanaise, n'échappe pas à cette réalité. La mauvaise gestion des ordures demeure l'un des problèmes de l'environnement auxquels cette cité doit faire face (PREGNON et al., 2020). Par ailleurs, une gestion inefficace des déchets peut aggraver les problèmes d'inondation et de glissement de terrain.

En termes d'opportunités, l'utilisation des technologies avancées, comme la GeoAI et les images satellites, permet d'améliorer la surveillance et la gestion des risques en temps réel. Les partenariats public-privé offrent quant à eux des possibilités de collaboration pour renforcer les infrastructures et la résilience face aux risques.

Néanmoins, la commune est confrontée à des menaces telles que les changements climatiques, qui augmentent la fréquence et la sévérité des phénomènes météorologiques extrêmes, exacerbant les risques d'inondations et de glissements de terrain. La croissance démographique met également une pression supplémentaire sur les infrastructures existantes, augmentant la vulnérabilité. Enfin, la déforestation et la dégradation des sols causées par d'innombrables lotissements non maitrisés augmentent les risques naturels.

3.2 -ANALYSE DES RISQUES

3.2.1. Dégradation du couvert végétal au profit de lotissement non maîtrisé

Cette analyse part d'une observation de la disparition du couvert végétal au profit de zones entièrement décapées pour des opérations immobilières. A l'aide de GEE nous avons obtenu des images satellites de Sentinel 2 montrant l'évolution de la disparition du couvert végétal. Les résultats ont été obtenus à partir du calcul de l'indice de végétation par différence normalisée. Le même processus est repris pour les années 2018 et 2020 permettant d'obtenir des images d'années différentes. L'obtention de plusieurs images d'années diverses facilite

l'observation de l'évolution du couvert végétal sur une période allant de 2018 à 2022 avec une différence de deux années entre chaque image prise. Le NDVI moyen fait référence à la moyenne d'images comprises entre le 1er janvier au 31 décembre de l'année en cours. Cette méthode s'avère importante dans la mesure où elle facilite la manipulation d'images satellites sans toutefois avoir recours à des logiciels de traitement d'images satellites telles qu'Envi ou Erdas Imagine. Plus loin l'utilisateur n'est pas obligé d'avoir les données sources des images de Sentinel-2 pour faire son analyse. Ce qui permet un gain de temps pour l'utilisateur.

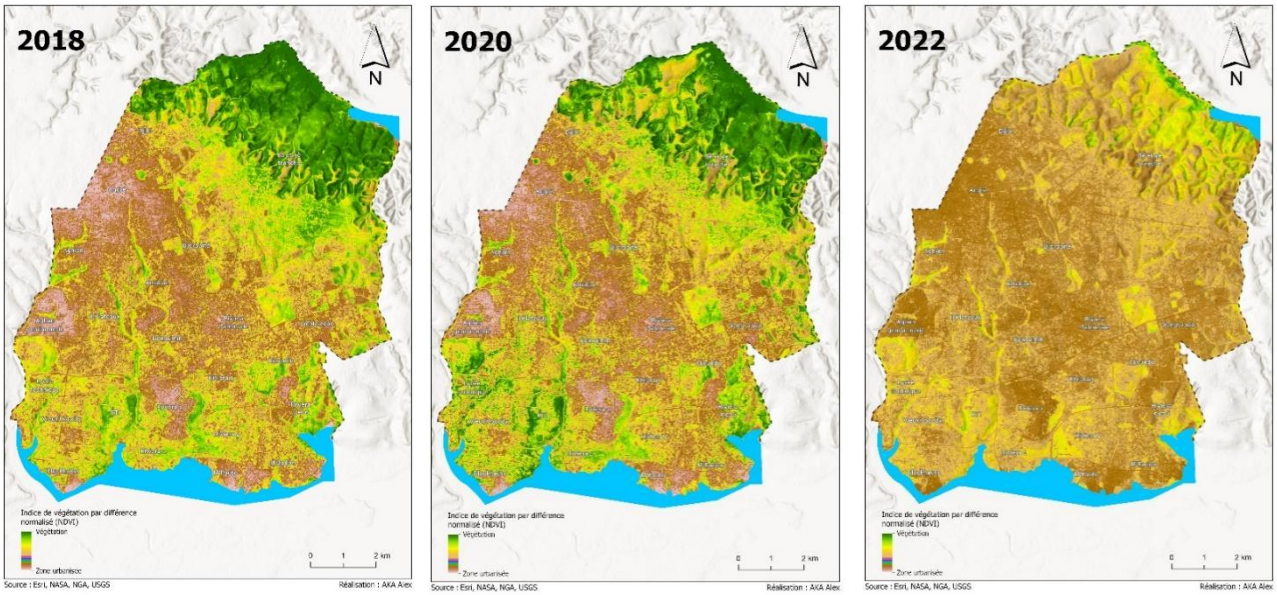

Figure 4 : Disparition du couvert végétal

L'urbanisation s'est fortement accrue dans la commune ces dernières. Le couvert végétal est en nette régression surtout dans les quartiers comme Djorobité, 8e et 9e. Ces zones en 2018 étaient encore en friche. En 2022, la tendance s'est inversée avec l'avènement de programmes immobiliers. Ces endroits sont désormais très prisés. Cette urbanisation part jusqu'aux confins des talwegs dont certains sont remodelés en vue d'abriter des habitations huppées. Tout ceci donne d'identifier les zones en cours d'exploitation pour des constructions de bâtiments dans la commune de Cocody.

3.2.2. Identification de zone en cours d'exploitation pour des constructions

La commune de Cocody à l'instar des grandes métropoles est en parfaite mutation. Avec la construction de plusieurs ouvrages routiers, elle se hisse parmi les communes les plus viabilisées du District Autonome d'Abidjan. En termes d'infrastructures routières également, elle fait partie des plus nanties. L'infrastructure est un véritable potentiel pour l'écoulement des flux entre deux points donnés. Elle peut constituer un véritable potentiel de structuration des territoires pour les populations locales et qui plus est un instrument de développement (Dagnogo, 2020). Pour ce faire, l'expansion urbaine demande une mise en place de mécanisme de contrôle et de surveillance de ces corolaires. Dans le contexte il a été possible d'observer, par le biais d'images satellite récentes, l'évolution de l'urbanisation dans la commune de Cocody. L'analyse s'est faite avec GEE au moyen des images Sentinel-2 de la collection COPERNICUS/S2. Un choix particulier s'est effectué sur les couches de données à exploiter pour obtenir des résultats probants. Les bandes infrarouges proches (NIR) et moyens infrarouges (SWIR), ont été employées pour cartographier et analyser l'évolution de l'urbanisation dans la ville d'Abidjan. Le choix de ces bandes est guidé par leur capacité à

 ISSN 1817-5589

distinguer efficacement les zones urbanisées des zones végétalisées. Contrairement aux bandes visibles, ces bandes offrent une meilleure différenciation entre les surfaces construites et les surfaces naturelles. Ainsi faut-il dire que la bande NIR (bande 8) de Sentinel-2 est sensible à la végétation, car les plantes réfléchissent fortement la lumière dans cette gamme de longueurs d'onde, tandis que les surfaces bâties ont une réflectance plus faible. La bande SWIR (bande 11), en revanche, est sensible aux caractéristiques des sols et des infrastructures urbaines, qui ont une réflectance plus élevée dans cette gamme de longueurs d'onde. Cette combinaison permet de calculer le Normalized Difference Built-up Index (NDBI), qui met en évidence les zones urbanisées de manière efficace. Le NDBI est calculé à partir des bandes NIR et SWIR comme suit :

$$\text{NDBI} = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$$

Pour une étude optimale de cette évolution urbaine, il a été crucial d'utiliser des images de la même saison afin d'éviter les différences de réflectance dues aux variations saisonnières de la végétation et des conditions d'éclairage. Ainsi, les images de janvier 2022 et de janvier 2023 ont été sélectionnées pour cette analyse. La matérialisation de cette combinaison s'est effectuée dans GEE selon un script dont les étapes étaient les suivantes :

-Définition de la zone d'intérêt à partir de la création d'une variable : la variable *Cocody* définit la géométrie de la zone de Cocody en utilisant les coordonnées géographiques.

-Importation des images Sentinel-2 : il s'agit de charger les images Sentinel-2 avec cette variable, *var sentinel2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')*, tout en couvrant la zone d'intérêt et filtrer celles de l'année 2022 et 2023 avec une couverture nuageuse inférieure à 20 %.

-Calcul du NDBI pour chaque image de la collection Sentinel-2. Le NDBI est calculé avec la fonction *calculateNDBI* en utilisant les bandes du proche infrarouge (B11) et du rouge (B8A) des images Sentinel-2.

-Calcul de la moyenne du NDBI pour l'année concernée et découper l'image résultante à la zone d'intérêt.

-Définition des paramètres de visualisation et affichage du NDBI moyen sur la carte avec la variable *ndbiparams* et choix des couleurs souhaitées.

Cette méthode a permis une extraction d'informations sur les zones en construction. Les zones les plus sollicitées et celles qui ne le sont plus. Une extraction rapide et précise des zones bâties urbaines est cruciale pour résoudre les problèmes environnementaux liés aux changements rapides de la couverture terrestre urbaine, ce qui est fondamental pour optimiser les modèles d'utilisation des terres et soutenir le développement durable mondial (Zheng et al., 2021).

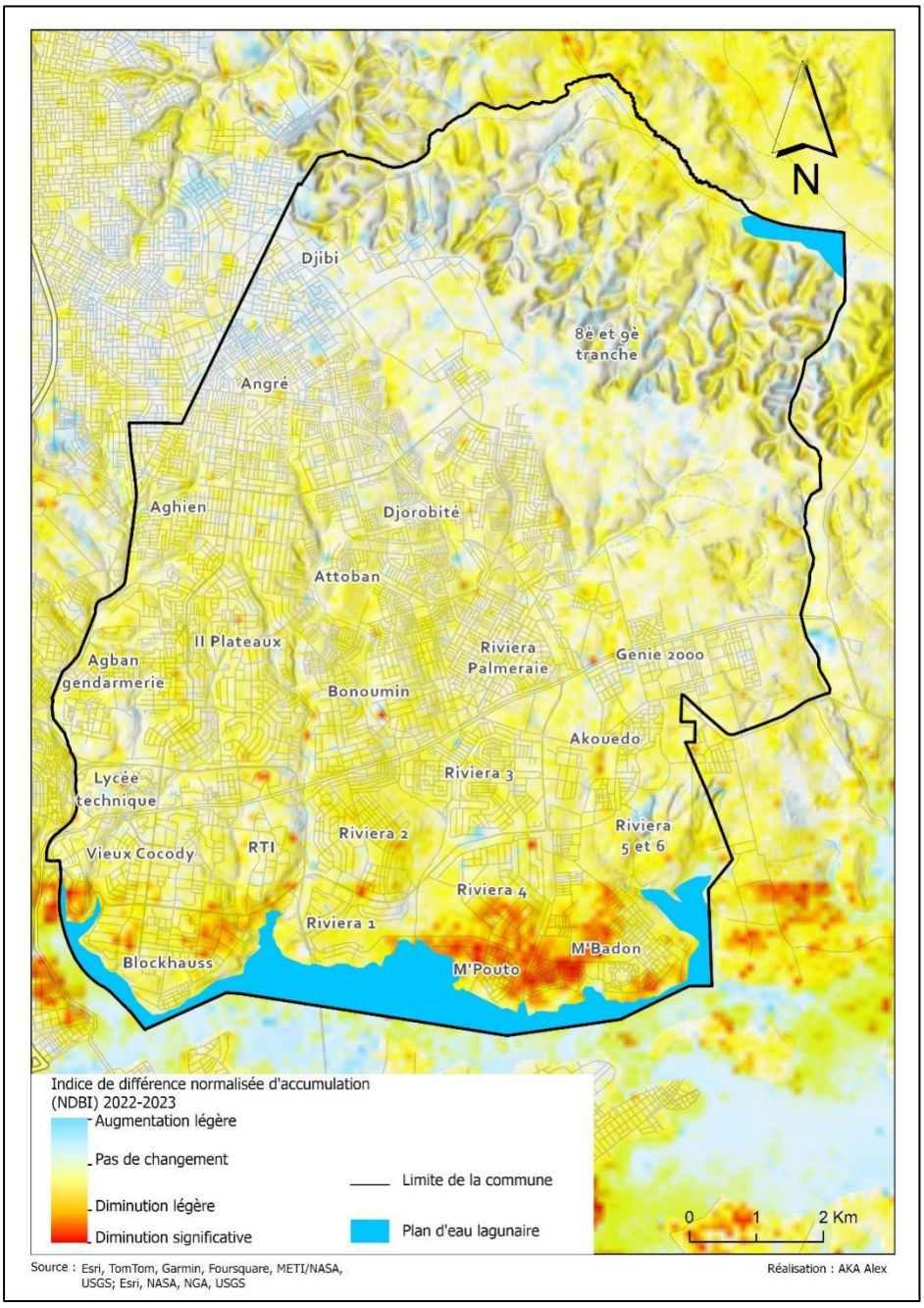

Figure 5 : Présentation des zones d'exploitation pour des constructions de bâtiments dans la commune de Cocody de 2022 à 2023

Les différences de NDBI sont représentées par des couleurs différentes (Figure 5). La couleur rouge représente la diminution significative des constructions. Cette couleur est plus perceptible dans les quartiers de Blockhaus, M'Pouto et M'Badon. La couleur jaune quant à elle symbolise une régression légère des constructions de bâtiments dans la zone. C'est le cas de la majeure partie de la commune. La couleur blanche matérialise les zones où il n'y a eu aucun changement notable en termes d'élévation de bâtiments. Par contre la couleur cyan ou bleu clair montre qu'il y a augmentation légère dans certaines zones. C'est le cas de certains quartiers comme Angré, Djibi, 8e et 9e Tranche et Djorobité.

 ISSN 1817-5589

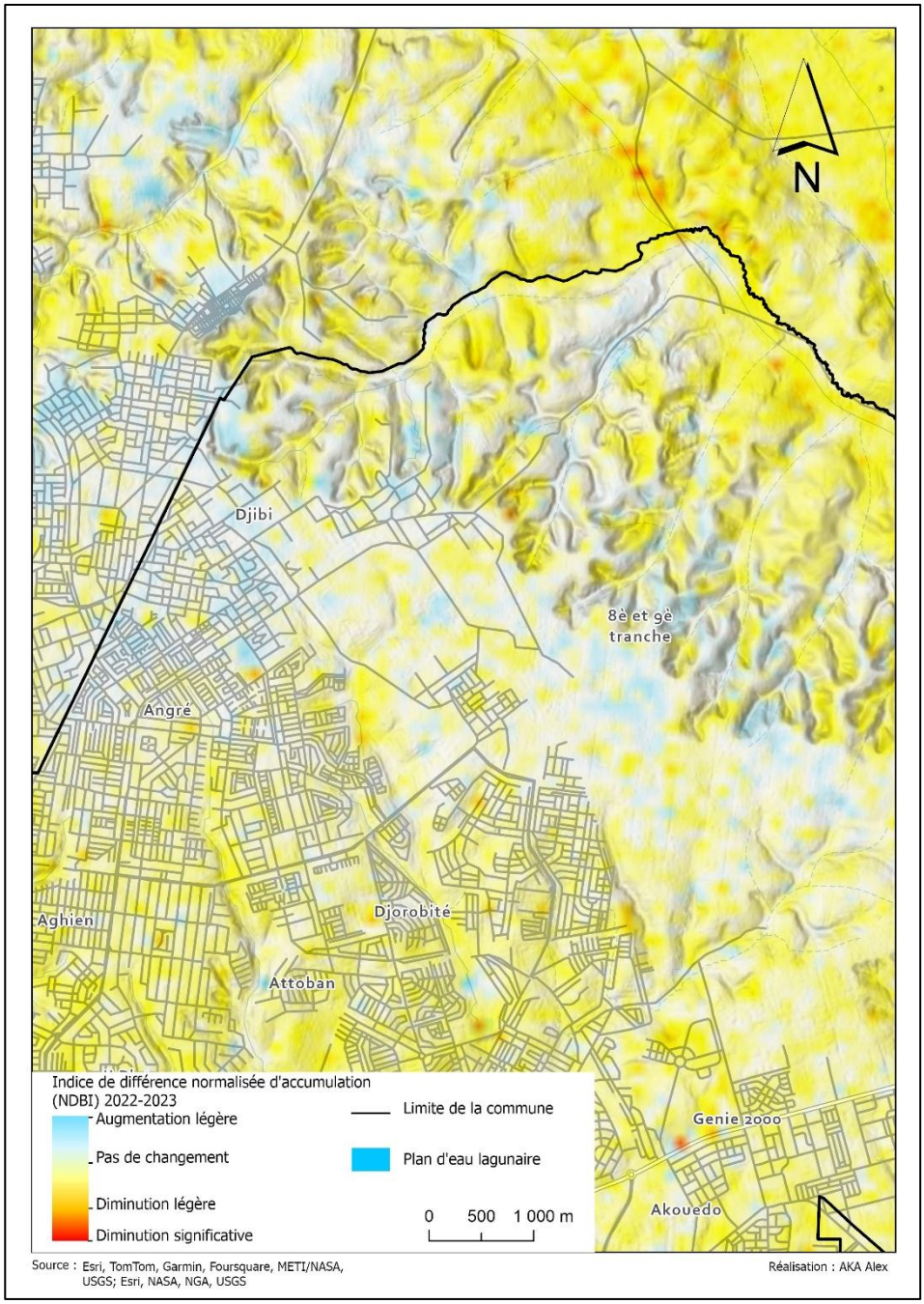

Figure 6 : Présentation de zones en cours d'exploitation pour des constructions de bâtiments les quartiers de la commune de Cocody

3.3. EVALUATION DES RISQUES

Un certain nombre d'événements naturels, qui se sont pour la plupart toujours produits dans l'histoire, se transforme chaque année en catastrophes dans la mesure où elles affectent de manière plus ou moins significative les populations humaines et les intérêts économiques qui y sont exposés (Barthélemy & Courrèges, 2011). Dans notre contexte il s'agira d'évaluer les risques encourus par les habitants dans les zones en forte croissance de construction. Le District Autonome d'Abidjan dans son ensemble présente des pentes fortes supérieures à 7 % et très fortes, au-delà de 15 % couvrant respectivement 23,7 % et 12,7 % du territoire

(TRAORE, 2022). Dans la commune de Cocody, elles oscillent entre 3 % et 25 % avec plus d'acuité dans les parties septentrionales de la commune.

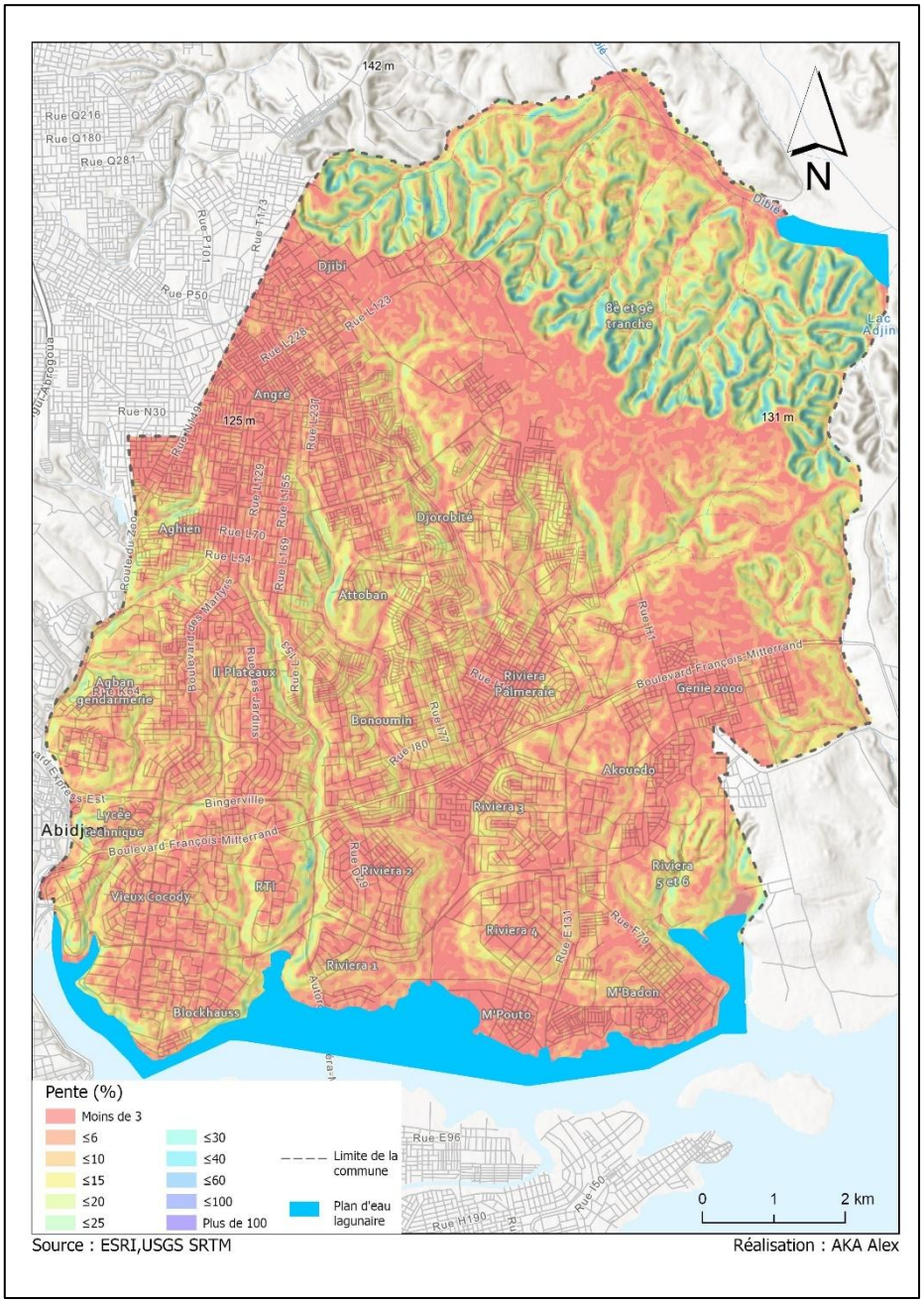

Figure 7 : Répartition des pentes dans la Commune de Cocody

La commune de Cocody présente une topographie variée, avec des zones planes et vallonnées. La pente moyenne de la commune de Cocody est d'environ 10 %. Les zones planes sont généralement plus favorables à la construction de bâtiments et d'infrastructures, tandis que les zones vallonnées peuvent présenter des contraintes supplémentaires. Ce pour quoi la connaissance de la pente est essentielle pour la planification urbaine et la gestion des risques naturels de la commune de Cocody. Néanmoins il est possible de catégoriser les différents risques en fonction de l'intensité de la pente. Deux risques majeurs ont été décelés.

 ISSN 1817-5589

3.3.1. Le risque d'inondation

Le risque d'inondation s'étend sur des zones de pentes inférieures à 2 %. Ces zones correspondent de façon générale à des bas-fonds situés le long des cours d'eau. Les crues le long des cours d'eau se produisent fréquemment dans des régions altérées par les activités humaines. En effet, les cours d'eau sont encaissés et les aménagements environnants sont exposés à l'érosion. Cependant, à cause de l'urbanisation, certaines parties ont été modifiées, ce qui a entraîné une réduction de la pente et donc une plus grande vulnérabilité aux inondations. (KONAN & ALLA, 2020).

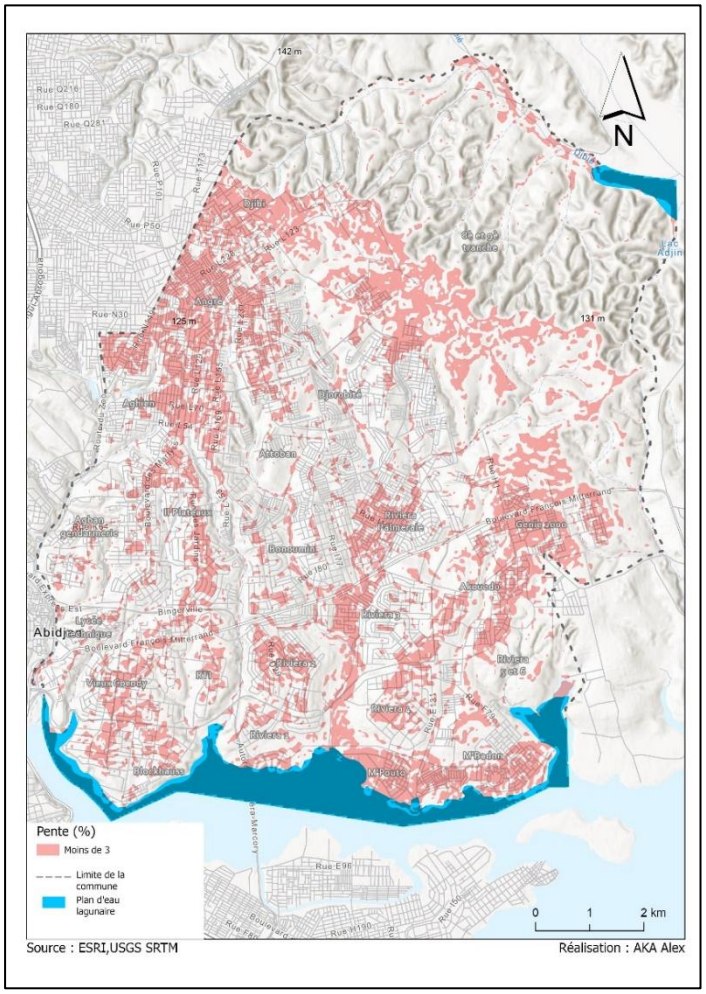

Figure 8 : Risque d'inondation dans la Commune de Cocody

3.3.2. Le risque de mouvement de terrain

Lorsqu'on évoque les catastrophes naturelles, on ne se souvient pas d'abord des effets des mouvements de terrain. Cependant, ces événements entraînent chaque année plusieurs milliers de décès à travers le monde. C'est une fois de plus un domaine où la prévention est complexe, car les événements correspondants sont d'une fréquence d'occurrence difficilement perçue par la mémoire humaine pour un endroit donné. Par ailleurs, la prévention consisterait dans la majorité des cas à interrompre les activités humaines dans les zones concernées, ce qui est toujours difficilement réalisable, quand cela ne se révèle pas presque impossible, étant donné la densité de population dans certains endroits. Le terme

"mouvements de terrain" fait référence à divers événements tels que les glissements de terrain, les chutes de blocs, les coulées, les tassements, gonflements, retraits, érosions, effondrements et affaissements (Barthélemy & Courrèges, 2011). Des observations sur le terrain ont permis d'en observer certains.

Photo 1 : Construction à Djibi en situation de risque d'effondrement

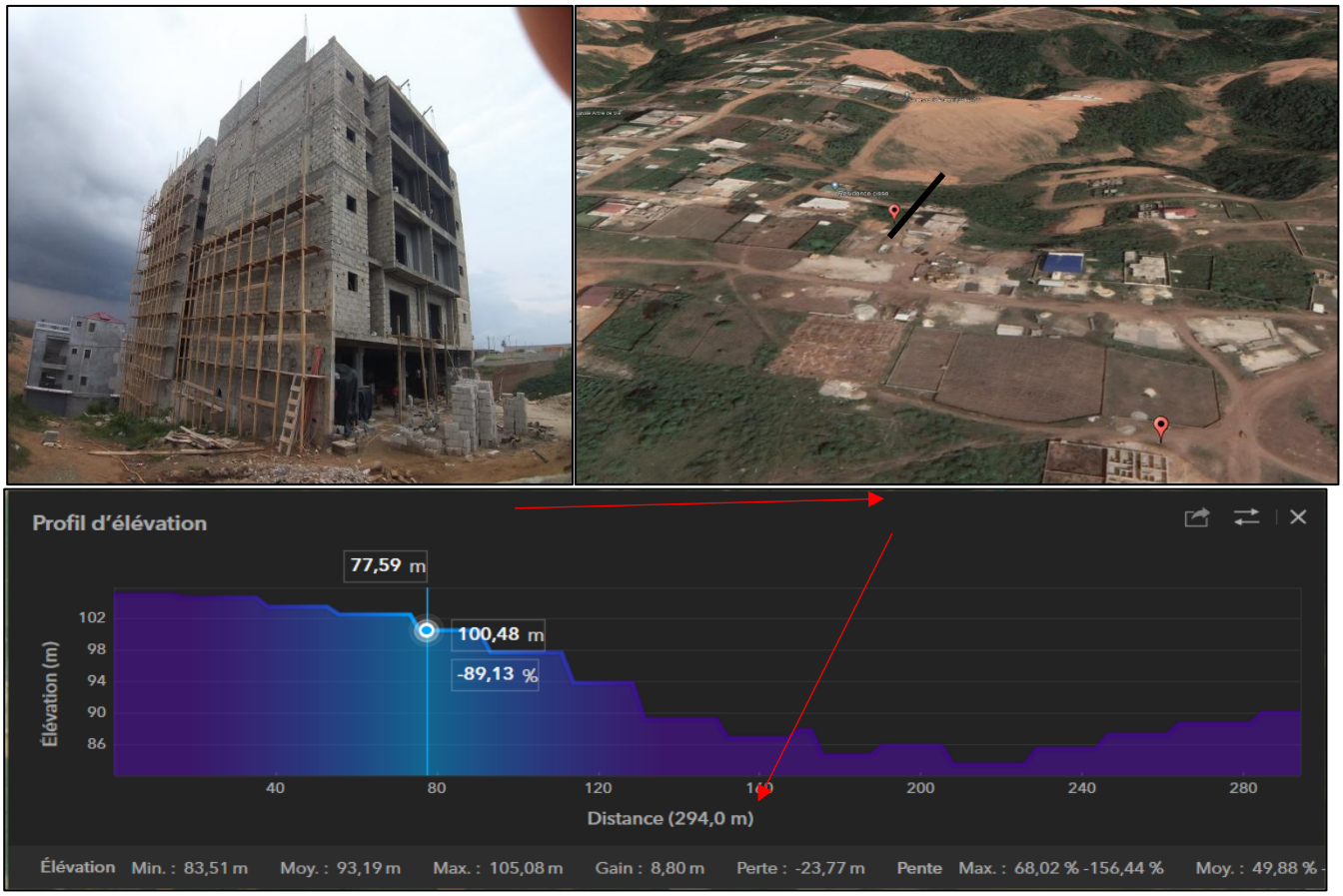

Photo 2 : Construction d'un bâtiment sur le versant d'une vallée

ISSN 1817-5589

La maison est située sur le versant d'une vallée. L'estimation de la pente fournie par Google Earth indique que la pente moyenne du terrain est d'environ 49,88 %. Cependant, il est important de noter que cette estimation peut ne pas être précise à 100 %, car elle est basée sur des données numériques et ne tient pas compte des variations microtopographiques du terrain. Mais il est tout de même possible de dire que ce bâtiment en construction sur le versant de la vallée court un risque d'effondrement en cas de pluies diluviennes.

3.4. TRAITEMENT DES RISQUES

Le traitement des risques s'appuie sur un plan de gestion des risques qui à son tour doit s'appuyer sur les outils de l'intelligence artificielle géospatiale. Il existe une corrélation entre les données obtenues par le biais du NDBI. Il a été trouvé effectivement des habitations en construction dans les zones à risque, notamment aux abords des versants de vallées, également dans des ravins. Cela traduit la fiabilité des outils utilisés (Figure 8). Plus loin, l'usage des technologies liées à l'intelligence artificielle, notamment le Deep Learning, a des atouts pour prévenir les risques d'habitation en milieu urbain. De ce fait, il sera impérieux de faire une extraction des empreintes de bâtiments à l'aide de l'apprentissage profond ou Deep Learning dans ArcGIS Pro. C'est un processus qui permet de détecter et de délimiter automatiquement les contours des bâtiments à partir d'images aériennes ou satellites. L'extraction des empreintes de bâtiments avec l'apprentissage profond (Deep Learning) dans ArcGIS Pro se fait en plusieurs étapes.

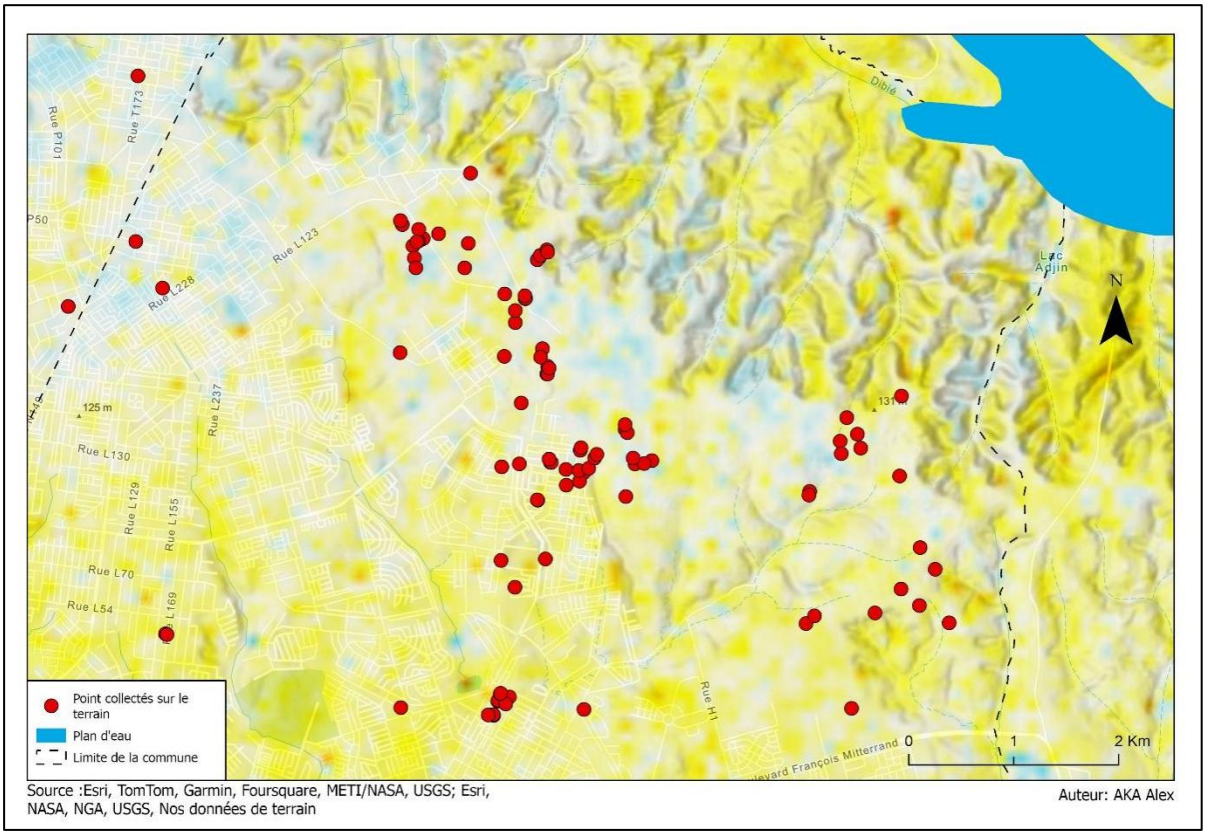

Figure 9 : Corrélation entre le NDBI et les zones à risque d'habitation

D'abord, des images aériennes récentes en haute résolution de la commune de Cocody ont été collectées sur la plateforme openaerialmap.org et sur les plateformes de living Atlas d'Esri. Une annotation manuelle des empreintes des bâtiments en utilisant "Label Objects for Deep Learning" dans ArcGIS Pro a été réalisée. Ensuite, les données annotées ont été exportées

avec « Export Training Data for Deep Learning ». La suite a été de choisir une architecture de Deep Learning appropriée, comme Mask R-CNN. Il a fallu entraîner le modèle avec TensorFlow, puis importer le modèle intégré dans ArcGIS Pro via "Detect Objects Using Deep Learning". Il est possible d'importer un modèle déjà entraîné et l'appliquer sur de nouvelles images pour détecter les empreintes de bâtiments. Enfin, la dernière étape a consisté à vérifier et corriger manuellement les résultats, puis intégrer les empreintes extraites dans les bases de données géospatiales pour diverses applications, telles que la planification urbaine. En termes de résultats, l'on constate effectivement des toits de maisons dans des zones à pentes fortes (Figure 9).

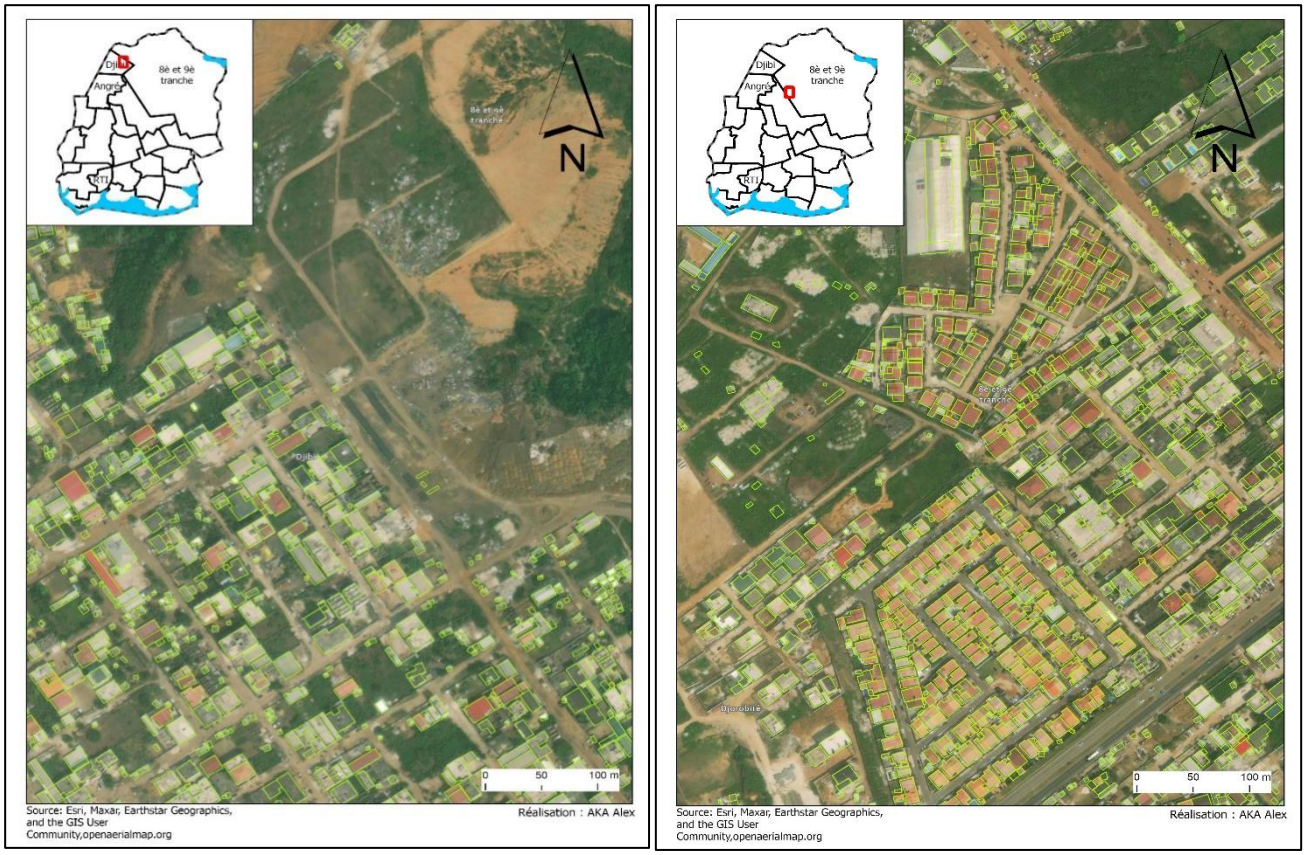

Figure 10 : Extraction d'empreintes de bâtiments à Cocody

Les empreintes de bâtiments ont été extraites à partir d'une image satellite haute résolution couplée à une image de drone de précision de 5 mètres. Les empreintes sont représentées par des polygones de couleur verte. Les modèles Deep Learning permettent d'obtenir des résultats très précis et fiables, même dans des zones complexes avec des bâtiments de formes et de tailles variées. L'évolution urbaine de la commune est ainsi bien perçue. Les combinaisons de tous ces procédés ont donné des résultats plus concrets et plus probants. Tout ceci dans un processus automatisé, ce qui permet de gagner du temps et d'économiser des ressources par rapport aux méthodes traditionnelles de numérisation manuelle.

 ISSN 1817-5589

4.Discussion

Dans le monde compétitif d'aujourd'hui, les progrès dans l'application de l'Intelligence artificielle (IA) aux données géospatiales commencent à montrer des signes prometteurs de capacité à libérer son véritable potentiel. Bien que les projets à grande échelle soient spécifiquement géospatiaux et appliqués, les méthodes d'IA sont encore relativement peu nombreuses (Abdelkhalek & Ashraf, 2022). À travers l'utilisation de techniques de GeoAI et de la plateforme Google Earth Engine, cette étude a permis de cartographier les zones à forte densité des constructions dans la commune de Cocody. Les résultats montrent une nette augmentation des constructions dans les quartiers de Djorobité, Djibi, Angré Château, et Bessikoi, tandis que d'autres quartiers comme Cocody Danga, Riviera 2, et Riviera Palmeraie ont connu une légère diminution des constructions. Les quartiers en expansion rapide présentent un risque accumulé d'effondrements d'habitations, de glissements de terrain et d'inondations. Ces résultats sont en phase avec les observations de Brou (Brou, 2015) sur les défis de la transformation qualitative du niveau de vie et du cadre de vie dans les contextes d'urbanisation non contrôlés.

L'analyse du Normalized Difference Built-up Index (NDBI) révèle une corrélation significative entre les valeurs élevées du NDBI et les zones à risque. Les zones fortement urbanisées ou en changement d'utilisation des terres sont plus vulnérables. A ce sujet plusieurs auteurs s'accordent pour dire que la méthode NDBI appliquée à la cartographie des zones urbaines produit des résultats de cartographie avec une précision de 92,6 %. Ce qui indique qu'elle peut être utilisée pour atteindre l'objectif de cartographie plus fiable (Zha et al., 2003). Le NDBI proposé peut servir d'alternative intéressante pour cartographier rapidement et objectivement les zones bâties (Karanam & Neela, 2017).

La commune présente une topographie variée, avec des pentes oscillantes entre 3 % et 25 %. Les zones de pente inférieures à 2 % sont plus exposées aux risques d'inondation, principalement dans les bas-fonds situés le long des cours d'eau (KONAN & ALLA, 2020). Ce résultat est confirmé par plusieurs chercheurs ayant travaillé dans la commune Cocody. Ils ont montré que presque tous les quartiers de cette commune sont vulnérables à l'inondation (KONATE, 2007 ; Kouadio et al., 2004 ; KOUAME et al., 2023 ; YEO, 2017).

L'utilisation de l'apprentissage profond (**Deep Learning**) dans **ArcGIS Pro** a permis d'extraire avec précision les empreintes de bâtiments dans les zones à pente aussi bien forte que faible. Cette extraction a révélé des constructions situées dans des zones à haut risque, telles que des versants de vallées et des ravins. Cette méthode se présente comme un potentiel atout pour la télédétection urbaine et la géomatique dans son ensemble. Cependant, la forme de certains bâtiments recouverts d'arbres ne peut pas être détectée avec précision, certaines mites floues et irrégulières sont difficilement classées selon plusieurs expériences de spécialistes (Xu et al., 2018). À l'avenir, un réseau neuronal profond plus optimisé est nécessaire pour améliorer l'efficacité et la précision.

Les résultats obtenus sont significatifs pour la planification urbaine durable et la réduction des risques pour les habitants. Les différentes mettent en évidence les différents risques d'habitation les plus probables. La géomatique est ses outils avancés peuvent contribuer à la surveillance en temps quasi réel de l'événement naturel (Gadal, 2007). La gestion du risque naturel passe avant tout par un plan de gestion de risque qui s'élabore avec rigueur et en fonction du risque naturel auquel l'on fait face (Barthélemy & Courrèges, 2011). Les zones à risque déterminées dans cette étude, corrobore également avec celle présentée par ALLA Della et Kangah Armand en 2015 (Kangah & Della, 2015). Par ailleurs l'extension de la commune expose les populations à l'installation dans des zones à risque d'habitation. L'usage de la GeoAI contribue activement à résoudre les problèmes du monde réel dans divers domaines (Abdelkhalek & Ashraf, 2022).

Conclusion

Cette étude a eu pour but principal l'établissement de la cartographie des zones à risque d'habitation dans la commune de Cocody. Pour y parvenir, l'on a eu recoursà des techniques de l'intelligence artificielle géospatiale (GeoAI) intégrant l'analyse du Normalized Difference Built-up Index (NDBI), afin de fournir des informations précises et exploitables pour la planification urbaine durable et la réduction des risques pour les habitants. Les résultats ont permis de découvrir qu'une course effrénée vers l'urbanisation de la commune pourrait conduire les populations à s'installer dans des zones à risque. Ainsi s'expose-t-elle à deux risques majeurs qui sont entre autres les risques d'inondation et les risques de mouvement de terrain. Par conséquent, un mécanisme de surveillance des zones à risque et le suivi de l'évolution urbaine de la commune au moyen de la détection d'empreintes de bâtiment grâce à l'apprentissage approfondi sont à prôner. La prise en compte de ces zones dans la mise en œuvre d'une planification urbaine s'avère donc cruciale. Les informations géospatiales sont nécessaires pour faciliter l'évolution des communes et que cela va encore augmenter dans un avenir proche (Comité d'expert des Nations Unies, 2015). L'émergence et l'utilisation d'informations de localisation précises avec des outils de GeoAI offrent de grandes opportunités et feront en sorte qu'elles constituent un élément essentiel de l'infrastructure des technologies de l'information.

Bibliographie

ABDELKHALEK I. Alastal; ASHRAF Hassan Shaqfa, 2022, « GeoAI Technologies and Their Application Areas in Urban Planning and Development: Concepts, Opportunities and Challenges in Smart City (Kuwait, Study Case) », Journal of Data Analysis and Information Processing, 10, pp.110-126.

BARTHÉLEMY Bernard, COURRÈGES Philippe, 2004, Gestion des risques : méthode d'optimisation globale, Paris, Éditions Eyrolles,472p.

BROU Kamenan Marcel, 2015, Croissance urbaine et risques naturels en milieu de montagne : l'exemple de Man (Côte d'Ivoire), Thèse de doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan.

DAGNOGO Foussata, 2020, « Rail-route et dynamiques spatiales en Côte d'Ivoire », Carnets de géographes, 14.

GADAL Sébastien, 2007, « Pertinence de la géomatique pour la prévention et la gestion des risques naturels », Géographes et assureurs face aux risques naturels, pp. 192-220.

KANGAH Armand, ALLAH Della André, 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), pp. 297-308.

KARANAM Hari Krishna, 2018,« Study of normalized difference built-up (NDBI) index in automatically mapping urban areas from Landsat TN imagery », International Journal of Scientific Research and Review, 8, p. 239-248.

KONAN Kouadio Eugène, ALLA Della André, 2020, « Évolution et exposition d'une ville de montagne aux risques naturels : Man (Côte d'Ivoire) », Geo-Eco-Trop, 44(4), p. 531-540.

KONATE Lassina, 2007, Contribution des indices climatiques et des modèles de pluie, à la surveillance et prévention des inondations pluviales en milieu urbain : cas du district d'Abidjan

(Sud de la Côte d'Ivoire), Thèse de doctorat, Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan, Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et De l'Environnement, 186p

KOUADIO Boyossoro Hélène, KOUAMÉ Koffi Fernand, BIÉMI Jean, BROU N'dri. Emile., Saley Mahaman BACHIR, 2004, « Étude par télédétection et SIG de la vulnérabilité à l'érosion hydrique en milieu urbain : cas de la commune de Cocody-Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) », Éditions Francophones Universitaires d'Afrique, 6 p.

SOUMAHORO Moustapha, 2015, « Construction, reconstruction territoriale et décentralisation en Côte d'Ivoire (2002-2009) », Espaces et sociétés, 2015/1 n° 160-1611, pp. 51-66.

TRAORE Kinakpefan Michel, 2022, « Cartographie du risque de glissements de terrain en masse à l'échelle du District Autonome d'Abidjan (Côte d'Ivoire) », Revue de Géographie de l'Université de Ouagadougou, N°11, volume 3, pp.123-133.

United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information Management (UN-GGIM), 2015, Future trends in geospatial information management: the five-to-ten-year vision, second edition,48p.

YONGYANG Xu, LIANG Wu, Zhong Xie, ZHANLONG Chen,2018, « Building Extraction in Very High-Resolution Remote Sensing Imagery Using Deep Learning and Guided Filters », Remote Sensing, 10, 18p.

ZHA Yong, GAO Jingqing, NI S., 2003, « Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery », International Journal of Remote Sensing, Volume 24, N°3, pp. 583-594.