



Dynamique de l'occupation du sol et impacts géomorphologiques dans laSous-Préfecture d'Ignié

Land use dynamics and geomorphological impacts in the Ignié sub-prefecture

Juverdin Rock KOMBO-KISSANGOU ^a

Léonard SITOU ^b

^a Université Marien NGOUABI, Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines, Parcours-type : Géographie, Laboratoire de l'Institut des Sciences Géographiques, Environnement et Aménagement, Brazzaville, République du Congo

^b Enseignant-Chercheur (Maître de conférences) à l'Université Marien NGOUABI, Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines, Parcours-type : Géographie, Laboratoire de Géographie et d'Aménagement (LAGEA), Brazzaville, République du Congo

Les auteurs acceptent que cet article reste en libre accès en permanence selon les termes de la licence internationale Creative Commons Attribution 4.0



Résumé

L'objectif de l'étude est d'évaluer l'impact géomorphologique à travers la dégradation du couvert végétal dans la Sous-préfecture d'Ignié. L'approche méthodologique adoptée émane de la géomatique. Les images utilisées sont celles du capteur ETM+ du satellite Landsat 7 traité avec l'algorithme de « maximum de vraisemblance » et du capteur MSI du satellite Sentinel-2 traité avec l'algorithme « Random Forest » à partir de l'utilisation du logiciel Google Earth Engine. Le coefficient de rétention et les données de ravinement ont montré une corrélation entre la pression anthropique exercée sur le milieu naturel et la dynamique de l'occupation du sol. Les résultats révèlent une forte régression du couvert végétal principalement de la savane durant les deux décennies étudiées et un impact géomorphologique qui se manifeste par le ravinement dont la moyenne de perte en terre est évaluée à 54931 tonnes par an avec un volume moyen de 34332 m³. Entre 2000 et 2020, la savane a perdu -39% de sa superficie, alors que l'habitat/Sol nu et la forêt ont progressé respectivement de 29% et 12,2%. La dynamique dégradante du couvert végétal engendrée par la pression anthropique favorise et accélère donc le processus de l'érosion hydrique qui est la résultante du ruissellement observé dans la zone d'étude.

Mots clés : Sous-préfecture d'Ignié, dynamique, ravinement, cartographie, dégradation

Abstract

The objective of the study is to assess the geomorphological impact through the degradation of the vegetation cover in the Ignié sub-prefecture. Landsat 7 ETM+ satellite images from 2000 are processed with the “maximum likelihood” algorithm and Sentinel-2 MSI from 2020 with the “Random Forest” algorithm using Google Earth Engine software. The retention coefficient and gully data showed a correlation between the anthropogenic pressure exerted on the natural environment and the dynamics of land use. The results reveal a strong regression of the vegetation cover, mainly savannah, during the two decades studied and a geomorphological impact manifested by gullying, the average soil loss of which is estimated at 54,931 tonnes per year with an average volume of 34,332 m³. Between 2000 and 2020, savannah lost -39% of its surface area, while the habitat/bare soil and the forest increased by 29% and 12.2% respectively. The degrading dynamics of the vegetation cover generated by anthropogenic pressure therefore promotes and accelerates the process of water erosion which is the result of the runoff observed in the study area.

Keywords: Ignié sub-prefecture, dynamics, ravine erosion, mapping, degradation

Introduction

En Afrique subsaharienne en général et au Congo en particulier, l'occupation du milieu naturel sans mesure d'accompagnement conduit à la dégradation des sites. En effet, la croissance démographique et le développement socioéconomique engendrent de fortes pressions sur le milieu naturel qui subit des impacts négatifs de plus en plus graves. En milieu rural, les activités agropastorales, l'exploitation des forêts pour les besoins en bois de chauffe, de construction et de fabrication du charbon de bois et la multiplication, sans mesure d'accompagnement, des carrières pour l'extraction du granulats, etc. sont autant d'activités anthropiques qui contribuent à la dégradation du couvert végétal et favorisent le déclenchement des processus de l'érosion hydrique responsable elle-même du phénomène de sédimentation des cours d'eau (Hokili et Sitou, 2024). En milieu urbain, à la suite de défaillance du lotissement, l'occupation anarchique de l'espace, favorise la dégradation des sites par les phénomènes géomorphologiques (M'bouka Milandou et Mayima, 2022). La dynamique de l'occupation du sol est donc une variable essentielle dans l'évaluation des changements du milieu naturel et des interactions entre l'homme et le milieu (Maïga et *al.*, 2020). C'est une donnée fondamentale pour la planification régionale ainsi que pour l'étude et la compréhension de l'environnement (Foody, 2002) cité par Mamadou (2009). Les informations issues de l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol sont utiles pour la définition des stratégies appropriées de gestion de l'espace (Kpedenou et *al.*, 2017).

C'est dans ce contexte que la présente étude a été réalisée dans la sous-préfecture d'Igné située au nord du département de Brazzaville. En raison de cette proximité avec la capitale congolaise cette zone connaît, ces dernières années, une croissance des activités anthropiques responsables de pressions diverses exercées sur l'environnement. L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'évolution de cette occupation des sols dans la période de 2000 à 2020 et les impacts géomorphologiques engendrés.

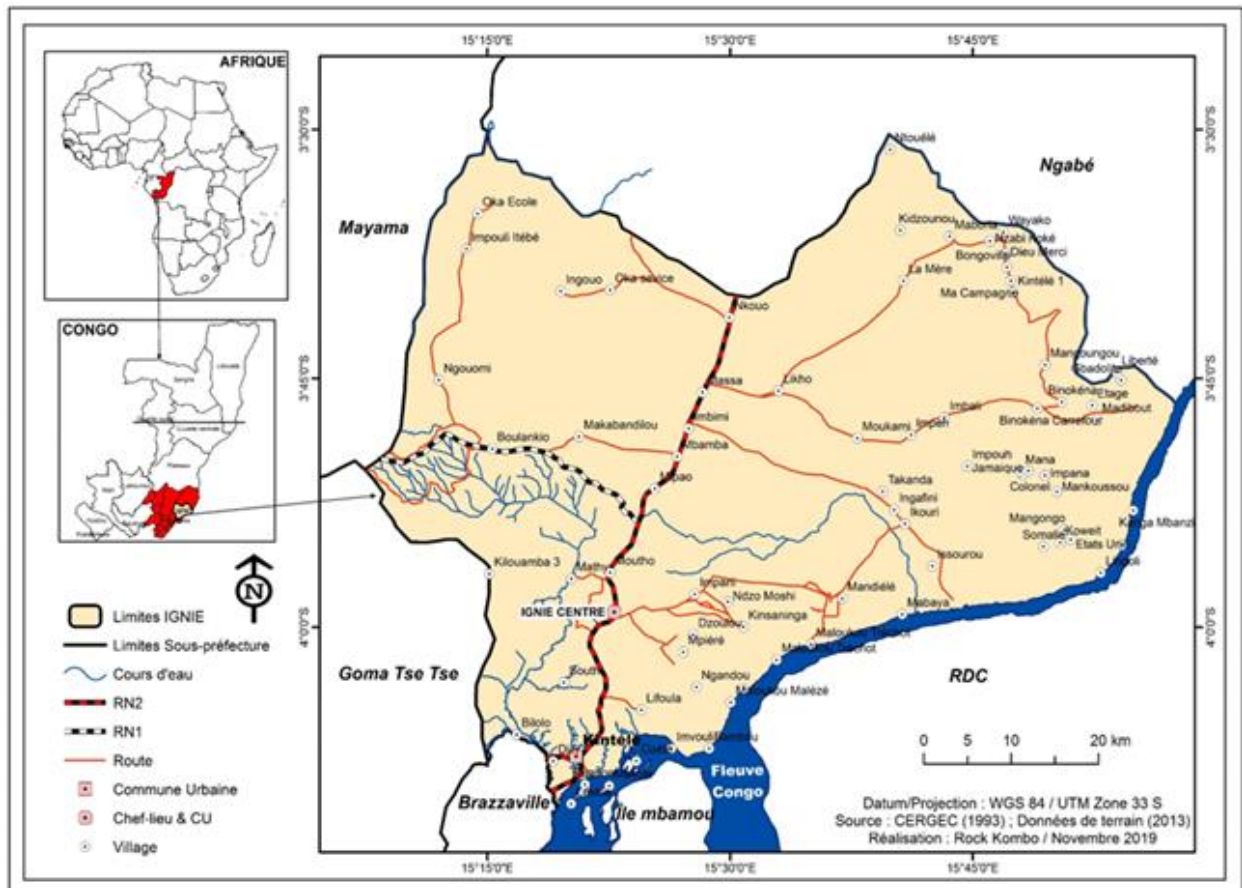
Ainsi, deux questions principales résument la problématique de cette étude à savoir comment s'est fait l'occupation du sol dans la sous-préfecture d'Igné dans la période de 2000 à 2020 et quels ont été les impacts géomorphologiques sur l'environnement ?

La présentation du cadre général de la zone d'étude, la description de l'approche méthodologique et les réponses aux questions principales de cette étude, constituent les

principales articulations de cet article qui se termine par une conclusion précédée de la discussion des résultats.

1. Présentation de la zone d'étude

Ignié couvre une superficie estimée à 4047,04 km² et compte parmi les 06 Sous-préfectures du nouveau département Djoué-Léfini, créée par la Loi n°25-2024 du 8 octobre 2024. Située au Sud du Congo, la Sous-préfecture d'Ignié s'étend entre les méridiens 15°07'26'' et 15°58'50'' de longitude Est et 3°30'04'' et 4°11'55'' de latitude Sud. Elle est limitée au nord par la Sous-préfecture de Ngabé, au sud par le département de Brazzaville et la Sous-préfecture d'Ile Mbamou, à l'Est par le Fleuve Congo qui le sépare de la RDC et à l'Ouest par la Sous-préfecture de Goma tsé-tsé et de Mayama (Figure N°1). La Sous-préfecture d'Ignié se localise dans le Plateau de Mbé qui est la plus élevée des 4 sous unités topographiques qui composent les plateaux Batékés. Son relief est tourmenté par des vallées profondes drainées ou sèches dont l'encaissement atteint et dépassent 300 mètres à plusieurs endroits. La zone est aussi occupée par des hautes collines dont les altitudes atteignent les 765 m. Le Plateau de Mbé est taillé dans la série du Stanley-Pool, constitués des grès polymorphes (Ba₁), à la base et les sables ocres (Ba₂) au sommet (Guillot et Peyrot, 1979). Le climat est de type bas-congolais caractérisé par l'alternance d'une saison sèche de 4 mois, qui s'étend de mi-mai à mi-septembre en moyenne, avec des précipitations inexistantes ou presque et d'une saison des pluies qui commence à la mi-septembre et se termine à la mi-mai, soit 8 mois. Les premières pluies qui ouvrent la saison des pluies tombent dès le mois de septembre (Samba-Kimbata, 1978). D'après les données collectées à l'ANAC, les volumes annuels des précipitations pour une période de 10 ans, soit de 2010 et 2020 sont en moyenne de 1998 mm. L'hydrographie de la zone d'étude est constituée de 3 sous bassins versants principaux aux superficies variables qui se déversent directement dans le Fleuve Congo. Il s'agit des bassins versants de la *Mary* qui s'étend du nord-ouest à l'est, de la *Mobana* qui occupe le centre de la sous-préfecture et la *Djiri-Mati* localisé au sud. La végétation dominée par la savane arborée est en pleine dégradation par les activités anthropiques. Les quelques bosquets de type mésophiles semi caducifoliés (Kœchlin, 1961), qui dominaient les bas-fonds ou les pieds de collines, ont également disparu ou presque à cause de la même pression anthropique liée à l'urbanisation accélérée que connaît cette partie de la Sous-Préfecture (Ngatsé et *al.*, 2017).

**Figure N°1 : Localisation de la zone d'étude***Source : CERGEC/IGN (1993)*

2. Méthodes

2.1 Données utilisées

Cette étude est basée sur l'analyse spatio-temporelle de la dynamique de l'occupation du sol pour la période de 2000-2020 à travers les images satellitaires. Le choix de données utilisées dans cette étude tient compte d'un certain nombre de contraintes, parmi lesquelles la qualité des images aux différentes dates et leur comparabilité. Pour alimenter une étude diachronique telle effectuée ici, la série temporelle des images devait couvrir les périodes dont la couverture nuageuse et les pas de temps devaient permettre de reconstituer les grandes tendances de cette dynamique de l'occupation du sol. Les années 2000 à 2020 et les images Landsat et sentinel-2, par leur gratuité, leur qualité de prétraitement, leur couverture tant spatiale que temporelle et leur disponibilité ont donc été choisies. En effet, dans cette approche multiscalaire, il était important d'avoir des images ayant une résolution spatiale et une couverture au sol devant permettre la réalisation de cette cartographie de l'occupation du sol. La résolution spatiale à 30

m des Landsat et 10 m des sentinel-2, couvre des scènes de 185 & 190 km de côté devait permettre d'atteindre l'objectif, par lissage des micro-hétérogénéités (le parcellaire) qui favorise une cartographie précise de l'occupation du sol (Andrieu Jer Mering, 2008) cité par Oumar *et al.*, (2021). Les données utilisées proviennent des capteurs Enhance Thematic Mapper plus (ETM+) de Landsat et Multi Spectral Instrument (MSI) de sentinel-2. Pour le choix des images, plusieurs éléments ont été pris en compte, notamment les capteurs, la date de prise de vue, les bandes, la longueur d'onde et la résolution (Tableau N°1).

Tableau N°1 : caractéristiques des images satellites

Capteur	Date d'acquisition	Bandes	Longueur d'onde (µm)	Résolution (m)
Landsat 7 ETM+	01/08/2000	1-Bleu	0,45 - 0,515	30
		2-Vert	0,525 - 0,605	
		3-Rouge	0,63 - 0,690	
Sentinel-2	01/06/2020	2-Bleu	0,4924	10
		3-Vert	0,5598	
		4-Rouge	0,6646	
Source : http://earthexplorer.usgs.gov & http://scihub.copernicus.eu				

En cette période de l'année, la couverture nuageuse est généralement faible. Après la correction géométrique, l'analyse et ensuite la composition colorée qui a permis de retenir quatre (4) classes : eau, forêt, savane et occupation humaine (habitat et sol nu).

2.2 Classification des images satellitaires

Il existe deux types de classification à savoir la classification non supervisée et la classification supervisée. La bonne connaissance du terrain d'étude nous a permis de choisir la classification supervisée qui représente le complément indispensable de la classification non supervisée. Elle s'appuie fortement sur l'interprétation visuelle de l'image satellitaire. A cet effet, l'application de ce type de classification exige une bonne connaissance préalable du terrain. En effet, nous avons déterminé les différents objets qui occupent l'image (zone d'entraînement) pour déduire leurs signatures spectrales afin de classer la totalité de l'image en attribuant l'ensemble des pixels identiques de l'image à l'une des classes d'occupation du sol définies auparavant à l'aide des zones d'entraînement (Figure N°2 : a). Nous avons appliqué la méthode du maximum de vraisemblance (maximum likelihood, en anglais) sur l'image satellitaire. Cette méthode possède des performances et fait preuve de nombreux travaux de recherche (Bensaid, 2006) cité par Chekchek et Fennouh (2019). Elle permet de fournir l'information détaillée du changement et préparer des cartes de changement (Tapboa et Fosting, 2010 ; Diallo *et al.*, 2011 et Ake, 2010) cités par Maïga *et al.*, (2020). Le logiciel de traitement d'images (Google Earth

Engine) utilisé avec la méthode *Random Forest* utilisée pour le Sentinel-2, le processus de classification a été opéré à travers la définition de la légende ou le renseignement du ROI (Regions Of Interest), la sélection des échantillons de parcelles d'entraînement, la description, le renseignement des différentes classes. La méthode prend en compte le calcul de probabilité d'appartenance d'un pixel à une classe donnée. Le pixel est affecté à la classe pour laquelle la probabilité est la plus forte (Figure N°2 : b). Cependant, si cette probabilité n'atteint pas le seuil escompté, le pixel est classé inconnu.

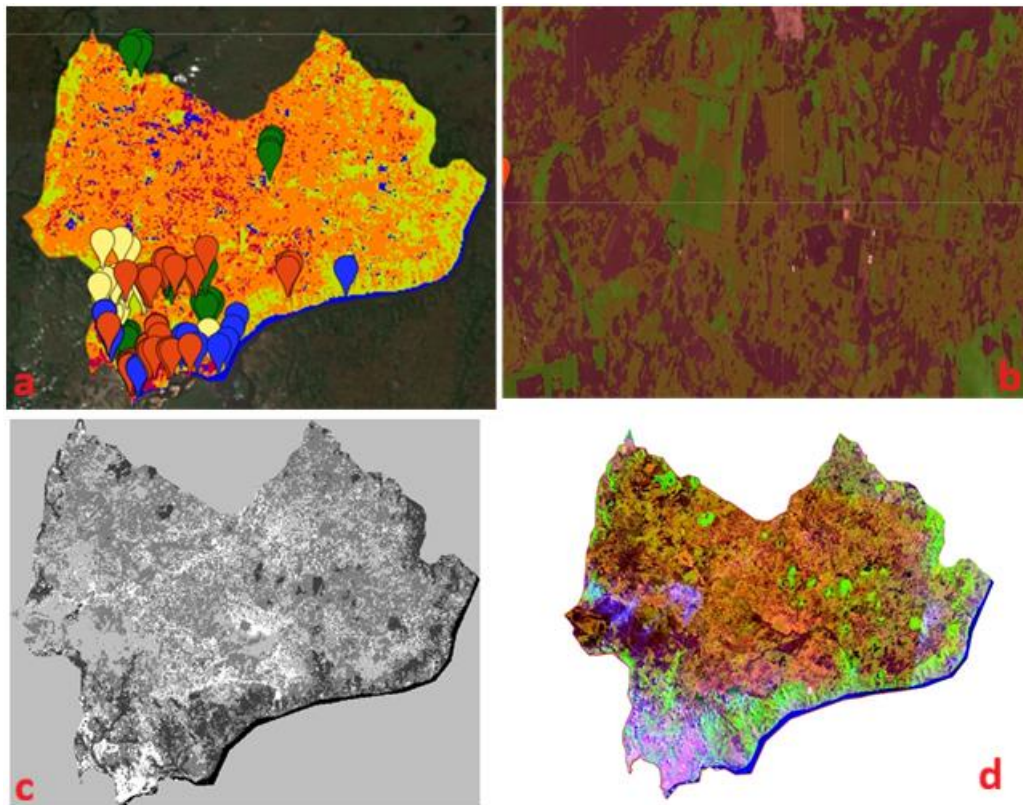


Figure N°2 (a : Zones d'entraînement ; b : Identification et nomenclature des classes d'occupation du sol à Ignié ;
c : Composition colorée fausse couleur et d : Composition colorée vrai couleur

La qualité de la classification obtenue a été évaluée à l'aide des paramètres calculés par la matrice de confusion que sont la précision globale et le coefficient de Kappa (Soro et *al.*, 2014). La matrice de confusion affiche les statistiques de la précision de classification d'une image, notamment le degré de classification erronée parmi les diverses classes. Elle est calculée avec les valeurs exprimées en pixels et en pourcentage. Les valeurs de la classification sont précisées dans le tableau N°2. La vectorisation constitue la dernière étape du traitement des images. Elle

a consisté à convertir la couche des images classifiées du mode raster en mode vecteur (polygones) dans le but de faciliter leur gestion d'analyses SIG (ArcGIS 10.4 & QGIS 3.34.4)

Tableau N°2 : Appréciation du coefficient de Kappa

Kappa	Accord
0,81 à 1	Excellent
0,61 à 0,80	Bon
0,21 à 0,60	Modéré
0,00 à 0,20	Mauvais
< 0,00	Très mauvais

Source : J.R. Landis et G.G. Koch (1977)

2.3 Analyse de la dynamique de l'occupation du sol

L'analyse de l'évolution des unités d'utilisation et d'occupation des terres permet de mettre en évidence l'impact des activités anthropiques sur le milieu (Ouedraogo et *al.*, 2024). Les changements survenus sur toute la période d'études ont permis de faire une comparaison post-classification. Elle produit une matrice de détection des changements issue de la comparaison entre les pixels de deux classifications entre deux dates (Girard et Girard, 1999) cités par Maïga et *al.*, (2020). A partir de cette situation, le taux de changement global (Tg) et le taux moyen annuel d'expansion spatiale (Tc) ont été calculés. Les changements à l'échelle globale ont été déterminés en obtenant les superficies des différentes classes d'occupation du sol pour chaque année. Les changements ont été déterminés sur la période 2000 à 2020. Cela a consisté à effectuer le rapport entre la différence des superficies et les superficies initiales pour chaque période. Après cette phase des statistiques des unités d'occupation, nous sommes passés à une analyse approfondie, en évaluant les changements intervenus au sein de chaque unité d'occupation du sol prise isolément. Cette analyse se fait par le calcul du taux de changement (Tc) ou taux moyen annuel d'expansion spatiale, couramment utilisé dans les études sur le changement d'occupation du sol (Hadjadj, 2011) cités par Maïga et *al.*, (2020). Ce taux de changement est évalué en utilisant la formule suivante :

$$T_c = \frac{\ln S_2 - \ln S_1}{(t_2 - t_1) \times \ln e} \times 100 \quad (1) \quad \text{et} \quad T_g = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \times 100 \quad (2)$$

Avec

T_c : taux moyen annuel d'expansion spatiale ; **T_g** : taux de changement global

S_1 la superficie d'une classe d'unité de surface à la date t_1 ; S_2 la superficie de la même classe d'unité de surface à la date t_2 ; $\ln$ le logarithme népérien ; e la base des logarithmes népériens ($e = 2,71828$)

Les valeurs positives représentent la progression de la superficie entre deux années, les valeurs négatives indiquent la période de la perte de la superficie et les valeurs proches de 0 indiquent la stabilité de la classe.

2.3 Evaluation de l'indice de capacité de rétention des classes de l'OS

Afin d'évaluer l'impact de la dynamique de l'occupation du sol sur les écoulements, un indice représentant la capacité de rétention en eau au niveau de chaque classe d'occupation du sol pour l'année considérée a été calculée (Soro *et al.*, 2014). Ainsi, si l'on appelle P_i le pourcentage en superficie de la zone d'étude occupée par la classe d'occupation du sol i et a_i un coefficient de pondération représentant la capacité de rétention en eau effective de la classe i , alors, Cr est obtenu par (Cecchi *et al.*, 2009) dont la formule est la suivante :

$$Cr = \sum_i P_i \times a_i \quad (3)$$

Les a_i ont été définis pour chaque classe entre 0 et 2 (rétentions nulle et maximale, respectivement) comme l'indique le tableau 3. Partant de cette définition, le coefficient Cr , compris entre 0 et 200, est utilisable sur des bassins de taille suffisante pour discriminer avec efficacité les différentes classes d'occupation des sols par télédétection ($> 25 \text{ km}^2$). Dans ce cas, les valeurs (> 100) correspondraient alors à des bassins encore sauvages dotés d'une importance couverture végétale, d'une forte capacité de rétention et donc peu propices à l'intensification des écoulements, tandis que les valeurs faibles correspondraient à des bassins anthropisés, voire dégradés, dotés d'une faible capacité de rétention et donc, à l'inverse des précédents, propices à d'importants écoulements.

Tableau N°3 : coefficients de capacité de rétention pour chacune des classes OS

Classe d'occupation du sol	a_i
Habitat	0
Sols nus ou dégradés	0
Cultures	1
Savanes faiblement cultivées	1
Savanes arbustives	1
Savanes arborées	2
Cultures irriguées	2
Forêts	2

Source : P. Cecchi ; F. Gourdin ; S. Koné *et al.*, 2009, p. 120)

2.4 Observations du milieu et évaluation des impacts géomorphologiques

La dégradation du milieu par l'érosion hydrique constitue le principal impact géomorphologique analysé dans cet article. L'évaluation de cet impact a porté principalement sur la quantification des ravinements par la méthode de cubage qui a permis d'évaluer l'ampleur du phénomène à travers le volume des vides créés et les pertes en terre engendrées. Neuf ravins sélectionnés ont été cubés. Cette méthode consiste à mesurer sur le terrain pour chaque forme sélectionnée, la longueur, la largeur moyenne et de la profondeur moyenne à calculer à partir des données obtenues, les aires puis les volumes en tenant compte de leur morphologie en trapèze (4) et en V (5) qui sont les deux formes présentes dans la zone d'étude. Les formules classiques de calcul des aires des sections des ravinements utilisées sont les suivantes :

$$A = \frac{(w_1 + w_2) \times d}{2} \quad (4) \quad \& \quad A = \frac{w \times d}{2} \quad (5)$$

W_1 : largeur moyenne supérieure (m) ; w_2 : largeur moyenne de la base (m) ; d : profondeur ;
 A : aire (m^2)

L'évaluation maximale des volumes totaux des ravinements, a constitué à incorporer le coefficient (β) en fonction de la morphologie générale du ravinement, à partir du modèle de H.L. Katz, M. Daniels et S. Ryan (2013), schématisé ci-dessous dans la Figure N°3

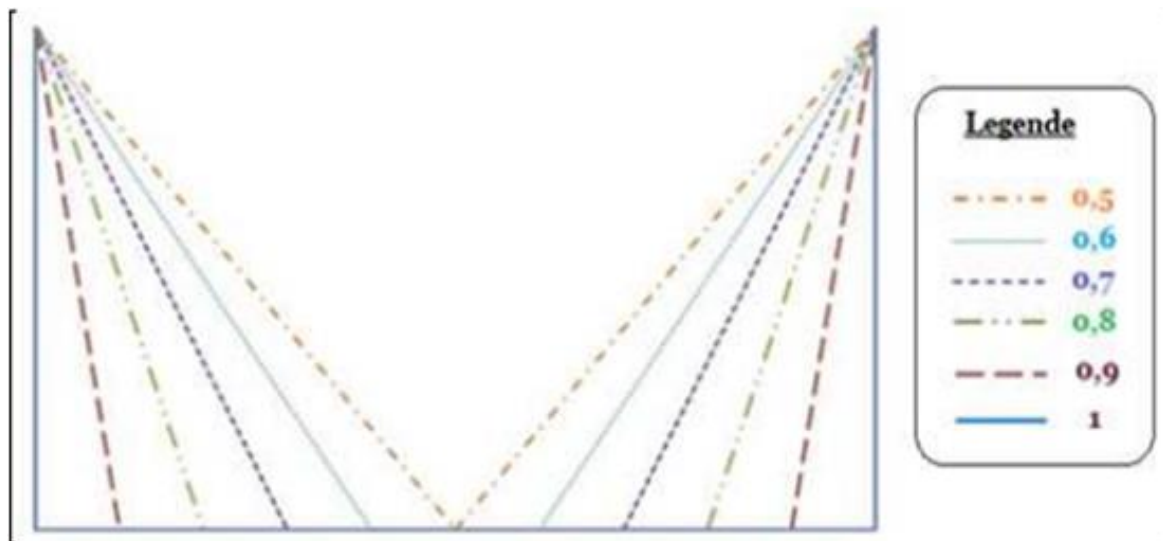


Figure N°3 : Morphologies des sections transversales des ravinements avec les coefficients (β) associés

Source : Katz & al., (2013)

$$V = \beta \times \sum A \times L \text{ ou } V = \beta \times (A_1 + A_2 + A_3 + \dots A_n) \quad (2)$$

V : volume de chaque forme (m^3) ; β : coefficient morphologique du ravinement ; $A_1 + A_2 + A_3 + \dots A_n$: aire des sections de chaque forme (m^2) ; L : longueur totale e chaque forme

L'objectif de ce travail étant de faire l'état des lieux, de la dégradation au moment de l'étude, l'évaluation des pertes en terre n'a porté que sur l'échantillon de 9 ravins sélectionnés dans la zone d'étude. La formule suivante a été utilisée pour chaque ravin :

$$P_t = V \times \rho$$

La densité apparente (ρ_a) a été assimilée au poids spécifique du sol noté ρ (poids spécifique du sol) et converti de g/cm^3 en t/m^3 ; V : volume de ravinement (m^3) ; P_t : poids (tonne)

3. Résultat

3.1 Classification

La classification supervisée appliquée aux images Landsat 7 ETM+ & Sentinel-2 MSI a permis de réaliser les cartes d'occupation du sol. L'analyse des images nous a permis d'identifier quatre (4) classes d'occupation du sol : eau, forêt, savane et habitat/sol nu. Une classification est fiable si et seulement si le pourcentage de la précision globale et du coefficient de Kappa est supérieur à 80% ; ces valeurs traduisent, d'une part, de la bonne qualité des échantillons et d'autre part, de la bonne correspondance entre le résultat de la classification et la réalité spatiale dans les images (Maïga et *al.*, 2020, & Koffi et *al.*, 2015). La classification est évaluée par la matrice de confusion. Les tableaux de matrice de confusion affichent dans la diagonale les pixels bien classés et les pixels non bien placés en hors diagonale.

▪ Précision de la classification de l'image ETM+ 2000

Les résultats de l'analyse de fiabilité sont présentés dans le tableau N°4, qui montre pour chacune des classes, le niveau de fiabilité moyen et les principales confusions observées. La précision globale est de 99% pour l'image de 2000 et le coefficient de Kappa est de 0,98. Le même tableau affiche dans la diagonale les pixels bien placés et les pixels non bien placés en hors diagonale. Ce tableau montre pour chacune des classes, le niveau de fiabilité moyen et les principales confusions observées.

Tableau N°4 : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2000

Classes OS	Cartographie 2000					
	Eau	Forêt	Savane	Habitat / sol nu	Nuage	Pourcentage
Eau	4538	0	0	0	0	20%
Forêt	0	7603	12	1	0	38%
Savane	0	39	39668	352	0	32%
Habitat/sol nu	0	1	72	2017	0	9%
Nuage	0	0	0	0	1165	1%
Précision globale = 99%						
Indice de Kappa = 0,98						

Source : traitement de l'image 2000

Le tableau N°4 montre que la matrice de confusion prouve une bonne classification des différentes classes, en dehors de quelques confusions des pixels entre certaines classes. Ainsi, 39 et 1 pixel de la classe des forêts sont confondus aux classes de savane et habitat/sol nu ; 12 et 72 pixels de la classe de savane sont confondus aux classes de forêt et habitat/sol nu ; 1 et 352 pixels de la classe habitat/sol nu sont confondus aux classes de forêt et savane. Cependant, nous avons deux classes (eau & nuage) où il n'y a pas eu confusion des pixels. Par ailleurs, les confusions les plus élevées sont observées entre les classes de forêt et savane (39 pixels) et entre les classes de habitat/sol nu et savane (72 & 352 pixels). Ces confusions peuvent s'expliquer par le fait que deux entités se comportent du point de vue radiométrique de la même manière, c'est-à-dire qu'elles ont la même réflectance. Tout de même, l'analyse du tableau N°4 montre que la classe de forêt présente un pourcentage plus élevé par rapport aux autres classes soit 38% de la zone d'étude tant dis que le plus petit pourcentage est présenté par la classe de nuage soit 1%.

▪ *Précision de la classification de l'image MSI 2020*

Les résultats de la classification sont validés par la matrice de confusion. La précision globale est de 98% et le coefficient de Kappa est de 0,96. Les valeurs de la matrice de confusion sont consignées dans le tableau N°5.

Tableau N°5 : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2020

Classes OS	Cartographie 2020				
	Eau	Forêt	Savane	Habitat/sol nu	Pourcentage
Eau	22	0	0	0	12%
Foret	2	12	0	0	8%
Savane	0	2	115	0	64%
Habitat/sol nu	0	0	0	30	16%
Précision globale = 98%					
Indice de Kappa = 0,96					

Source : traitement de l'image 2020

D'une manière générale, la matrice de confusion permet de conclure que les classes d'occupation du sol identifiées sont bien classées car la matrice globale dépasse les 80%. Les classes de savane et habitat/sol nu sont parfaitement bien classées sans confusion de pixels. Malgré la fiabilité de la matrice de confusion, quelques confusions existent entre les classes : 2 pixels de la classe eau sont confondus à la classe de forêt ; 2 pixels de la classe de forêt sont confondus à la classe de savane.

Le pourcentage de classification de chaque classe est bien représenté sauf pour la classe de forêt qui est moins représentée avec 8%, suivi de la classe eau avec 12%, tandis que la classe de savane reste la plus élevée avec 64%. Le pourcentage des classes par rapport à la superficie de la zone d'étude est différent d'une classe à une autre, le plus élevé est présenté par la classe de savane soit 64% de la superficie de la zone d'étude. Le plus petit pourcentage est indiqué par la classe de forêt soit 12% comme c'est le cas pour la classe de nuage pour l'année 2000. Les valeurs de la matrice de confusion des différentes classes témoignent la concordance entre les résultats de la classification et la réalité spatiale observée sur les images. Les valeurs des différents indicateurs de classification témoignent d'une bonne correspondance entre le résultat de la classification et la réalité spatiale contenue dans les images. Les classifications obtenues sont donc valides. Après l'évaluation de la classification supervisée, nous pouvons observer la tendance générale de l'occupation du sol de la zone d'étude à travers l'étude diachronique réalisée.

3.2 Évaluation de la dynamique de l'OS à Ignié de 2000 à 2020

L'évaluation qualitative de la dynamique de l'occupation du sol passe par la présentation des cartes d'occupation des années 2000 et 2020. Une comparaison visuelle des deux cartes (Figure N°4 : e et f) ainsi que les superficies et le taux d'expansion spatiale annuelle (Tableau N°6) de différentes classes permettent d'observer les modifications spatio-temporelles qui ont eu lieu dans la Sous-préfecture d'Igné sur la période 2000 à 2020.

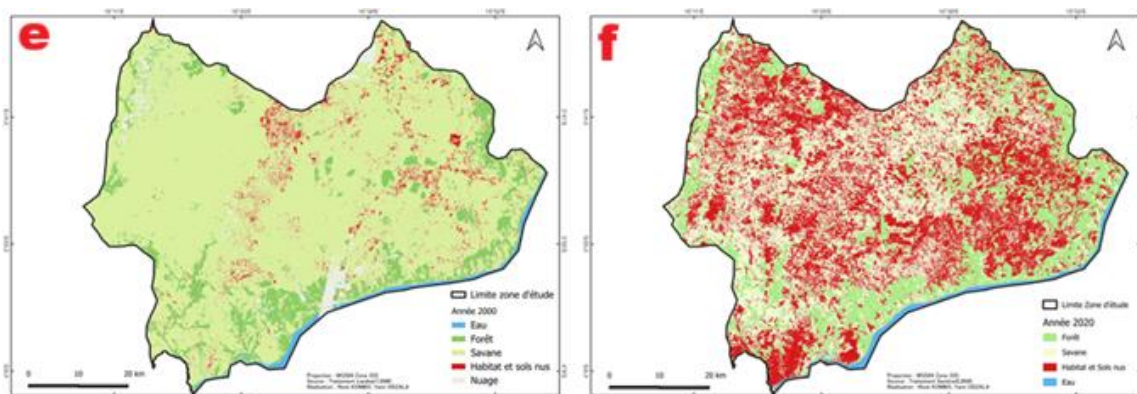


Figure N°4 : Cartes d'occupation du sol de la zone d'étude entre 2000 (a) et 2020 (b)

Source : traitement de l'image 2000 (e) et 2020 (f)

Ainsi, l'analyse des valeurs du taux de changement montre que les valeurs positives indiquent la **“progression”** et les valeurs négatives, une **“régression”**. Les valeurs proches de zéro indiquent que la classe est relativement **“stable”**. Le tableau de calcul du taux de changement

montre que les formations naturelles ont subi des transformations significatives. La valeur de la superficie du taux de changement global (Tg) et du taux d'expansion spatial (Tc) des différentes classes sur la période 2000 à 2020 est consignée dans le tableau N°6. Pendant une période de 20 ans, il y a eu des régressions d'une part et des progressions d'autres part dans les différentes classes.

Tableau N°6 : Analyse de la dynamique de l'OS à Ignié entre 2000 à 2020

Classes OS	Année 2000		Année 2020		Variation	Taux d'évolution	
	Sup (km ²)	%	Sup (km ²)	%	%	Tc	Tg
Eau	62,03	1,5	68,42	1,7	0,2	0,5	10,3
Ft	508,66	12,6	1005,22	24,8	12,2	3,4	97,6
Sn	3180,51	78,5	1565,73	38,7	-39,8	-3,5	-50,8
H/Sn	217,07	5,4	1410,52	34,8	29,4	9,4	549,8
Ng	81,62	2					
Total	4049,89	100	4049,89	100			

Source : Travaux de laboratoire, 2025

Ft : Forêt ; Sn : Savane ; H/Sn : Habitat / Sol nu ; Ng : Nuage

La variation entre les proportions correspond aux taux d'évolution. L'analyse des résultats du tableau N°5 montre une progression sur trois (3) classes : la classe eau a légèrement progressée, elle est passée de 62,03 km² en 2000 à 68,42 km² en 2020 avec un taux de changement global de 10,3 et un taux d'expansion annuel de 0,5 ; la classe de forêt est passée de 508,66 km² en 2000 à 1005,22 km² en 2020 avec un taux de changement global de 97,6 et un taux d'expansion annuel de 3,4 ; la classe habitat/sol nu a largement progressé, elle est passée de 217,07 km² en 2000 à 1410,52 km² avec un taux de changement global de 549,8 et un taux d'expansion annuel de 9,4. La régression est observée au niveau de la classe de savane qui est passée de 3180,51 km² en 2000 à 1565,73 km² avec un taux de changement global de -50,8 et un taux d'expansion annuel de -3,5. Cette classe a régressé au profit de vastes superficies autour des centres urbains qui comportent plus des sols nus et cultivés. Par ailleurs, le graphique ci-dessous (Figure N°5) combiné aux cartes d'occupation du sol (Figure N°4), montre les tendances entre les classes d'occupation du sol, d'une part, pour les classes en progression, et de l'autre part, la classe en régression dans la période de 2000 à 2020. Les classes eau, forêt et habitat/sol nu ont progressé en espace respectivement de 0,2% ; 12,2% et 29,4% par rapport à la superficie globale de la zone d'étude. Cependant, la classe de savane a très largement régressé avec -39,8% de superficies perdues. Enfin, il y a globalement un glissement des zones naturelles vers les zones

anthropisées, dû probablement en grande partie à l'augmentation de la pression due à la croissance démographique dans une zone déjà sensible.

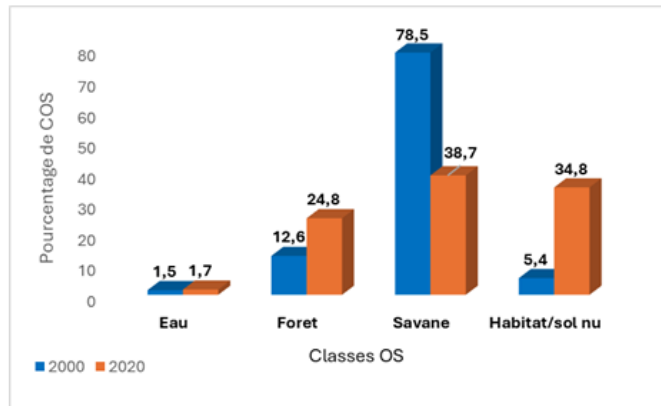


Figure N°5 : Évolution spatiale des classes d'OS entre 2000 et 2020

Source : Travaux de laboratoire, 2025

3.3

Dans le but de quantifier l'impact de l'anthropisation sur les écoulements de surface dans la zone d'étude, les coefficients de rétention ont été évalués et sont présentés dans le tableau N°7. L'analyse des résultats montre que presque tous les coefficients de rétention sont inférieurs à 100 pour toutes les classes retenues en dehors de la savane en 2000. C'est donc une zone propice aux écoulements de surface rendant possible le développement intense de l'érosion. Ainsi, ces faibles valeurs témoignent d'une transformation marquée du milieu naturel en un milieu anthropisé, voire d'une dégradation de celui-ci. Cette prépondérance à l'anthropisation a déjà été relevée au niveau de l'étude de la dynamique et du taux d'évolution de l'occupation du sol. La zone d'étude connaît donc une tendance à l'anthropisation. C'est pourquoi, les zones naturelles font place aux sols nus ou dégradés et habitats. Cet état de fait a pour conséquence directe une augmentation des écoulements de surface avec probablement une forte dégradation du milieu qui se traduit par une intensification de l'érosion des sols. Nonobstant ce constat, on note aussi une tendance à la régénérescence de la forêt qui semble prendre de la place contrairement à la savane.

Tableau N°7 : Evolution des coefficients de rétention (Cr) de l'OS à Ignié de 2000 à 2020

Classes OS	Année 2000	Année 2020
	Cr	Cr
Forêt	26	50
Savane	158	78
Habitat/sol nu	0	0

Source : Travaux de laboratoire, 2025

3.4. Impacts géomorphologiques

Le ravinement observé dans la zone d'étude constitue le principal impact géomorphologique qui a fait l'objet d'une quantification dans cette étude. Le tableau N°8 ci-dessous montre les dimensions de neuf (9) ravins que nous avons étudiés.

Tableau N°8 : Caractéristiques des ravins de la zone d'étude

Code	P(m)	L(m)	Lg(m)	β	$\int$	P(m2)	S(m2)	V(m3)	Q_t	F	Alt(m)	Coordonnée géographique
Rav1000Lg	19	40	159	0,5	1,6	1141	13858	6929	11086	V	340	15°21'06,12"E,4°07'04,81"S
RavCimGrce	53	219	2099	0,5	1,6	4872	444892	222446	355914	V	708	15°21'24,03"E,4°00'23,23"S
RavNGKB	42	76	491	0,5	1,6	1274	33557	16779	26846	V	705	15°24'50,66"E,3°59'00,70"S
RavSIPAM1	54	48	2131	0,5	1,6	3258	49012	24506	39210	V	716	15°22'06,15"E,3°57'03,81"S
RavSIPAM2	13	44	258	0,7	1,6	356	5694	3985,8	6377,3	U	650	15°21'40,87"E,3°56'51,74"S
RavZIMLK	69	127	452	0,5	1,6	1224	44499	22250	35599	V	670	15°35'54,56"E,3°58'40,35"S
RavEucalyp2	2	13	184	0,5	1,6	357	1562	781	1249,6	V	332	15°20'44,25"E,4°08'06,93"S
RavUDSN	13	35	424	0,5	1,6	1179	16252	8126	13002	V	350	15°21'42,14"E,4°08'32,84"S
RavEucalyp1	5	17	70	0,7	1,6	694	4554	3187,8	5100,5	U	330	15°20'40,39"E,4°08'16,09"S
Total						14355	613880	308990	494383			

Source : travaux de terrain et de laboratoire, 2025

P : Profondeur ; L : Longueur ; Lg : Largeur ; Périmètre ; S : Surface ; V : Volume ; Q_t : Quantité totale de terres perdues ; F : Forme ; Alt : Altitude

Les résultats montrent l'ampleur de l'érosion hydrique qui se développe dans la sous-préfecture d'Ignié. En effet, plusieurs ravins ont vu le jour et ont atteint pour la plupart plusieurs dizaines voire des centaines de mètres de long et de large avec des périmètres dépassant 1000 mètres (tableau N°8). Le volume moyen de perte en terre par ravin est estimé 34332 m³, mais le total du volume de vide laissé par les 9 ravins est estimé à 308990 m³, ce qui est équivalent de 494383 tonnes des terres perdues (Photos 1 ; 2 ; 3 et 4).



Photo 1 : Ravinement des rues et avenues disposées dans le sens de la pente au quartier Issouli aux 1000 logements à Kintélé ;

Photo 2 : Ravinement transversale à la route Mati vers Pk-45 ;

Photo 3 : Ravinement derrière l'Université D.S. N'GUESSO disposé dans le sens de la pente vers le Fleuve Congo

Photo 4 : Ravinement régressif à la carrière au village Ngakouba en direction de la zone économique de Maloukou

© Rock KOMBO & Léonard SITOU, 2023-2024

Dans la zone d'étude, en milieu urbain, la disposition des voiries et le manque de canalisation qui s'ajoutent à certaines pratiques de populations, il y a entre autres l'évacuation systématique, par les populations, des eaux de pluies dans les voiries urbaines et le dépôt des ordures ménagères et autres déchets solides dans lesdites voiries comme l'indique (Ngtsé, et *al.*, (2017), les photos 1 & 2 illustrent cette situation. Cependant, en milieu rural, l'occupation du milieu naturel et la pression exercée par l'homme se manifeste par la destruction du couvert végétal et accentuent la vulnérabilité des sites dénudés et provoque une dégradation accélérée par le ravinement tel est le cas montré par la photo 2 & 4 qui illustrent le ravinement régressif dans des sites où des carrières d'exploitation du granulat avait été installé sans mesure d'accompagnement. C'est aussi le cas pour la photo 4 qui présente le ravinement transversal à la route de Mati, ce ravin est né après l'installation sans mesure du site de la base vie de SIPAM, société des travaux publics.

4. Discussion

La discussion des résultats porte essentiellement sur l'analyse de l'occupation des sols dont la méthodologie utilisée était basée par le traitement numérique des images satellitaires. L'étude de la dynamique de l'occupation du sol résulte de l'analyse des images Landsat 7 ETM+ et Sentinel-2 MSI qui a permis d'obtenir pour chaque image des précisions globales respectivement de 99% et 98%. Elle est basée sur la classification supervisée d'images, à partir des algorithmes de « *maximum de vraisemblance* » pour Landsat 7 et « *Random Forest* » pour Sentinel-2. L'indice de Kappa obtenu présente des valeurs de 0,98 et 0,96 respectivement de l'année 2000 et 2020. En tenant compte des résultats d'analyse d'une image dont la catégorisation du coefficient de Kappa (Landis et Koch, 1977) consigné dans le tableau N°2, ces valeurs se situent dans la catégorie où l'accord est excellent, puisqu'elles sont supérieures à 0,81 et elles témoignent que la concordance est d'autant plus importante où les coefficients sont proches de 1. Ces valeurs sont également proches de celles obtenues par (Soro et *al.*, 2014). Ainsi, la présente classification qui compte quatre (4) classes est acceptable et a permis d'évaluer la tendance du changement de l'occupation du sol pendant une période de 20 années. Les résultats montrent que l'habitat/sol nu ou dégradé et la forêt ont augmenté en superficies

de façon significative et le plan d'eau qui connaît légèrement une progression, contrairement à la savane qui régresse nettement (-39,8%). Il est important de noter que les observations faites sur le terrain montrent une substitution de la forêt initiale par une forêt secondaire mais aussi par des champs de cultures vivrières et des plantations de vergers. Ces transformations expliquent la croissance constatée du couvert forestier. Le même constat a été fait dans la commune urbaine de Kintélé par (Mayima et *al.*, (2017) et dans le centre de la Côte d'Ivoire par (Soro et *al.*, 2014). Le recours aux images Landsat a déjà été fait par d'autres auteurs. Il a permis à (Enonzan Folohouncho, 2010), cité par (Hokili et Sitou, 2024) de suivre l'occupation des terres et la gestion durable des forêts classées de Dogo-Ketou du Bénin. Cependant, cette étude montre la diminution, voire la disparition des forêts tropicales qu'elle justifie par les feux de forêt, l'exploitation abusive et anarchique des ressources forestières. Les travaux de (Arouna, 2012) ont montré que les forêts denses sèches, de la Commune de Djidja au Bénin, ont été complètement converties en d'autres unités d'occupation du sol, aux pressions diverses exercées ou engendrées par la croissance urbaine. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour l'évaluation de la dynamique de l'occupation du sol, parmi lesquelles, l'analyse diachronique et multi-date de l'occupation du sol, est l'une des plus utilisées, comme c'est une méthode qui prend également en compte la répartition spatiale des changements (Franklin et *al.*, 2002 & Griffith, 2003) cités par (Mamadou, 2009).

L'analyse de l'impact de l'anthropisation du milieu sur les écoulements de surface a permis d'évaluer les coefficients de rétention (Cr) des classes de l'occupation du sol. Ainsi, le tableau N°7 indique pour les années 2000 et 2020 des Cr de 26 et 50 pour la forêt, 158 et 78 pour la savane. On observe que ces coefficients de rétention sont inférieurs à 100 en dehors de la savane pour l'année 2000. De même, la valeur de la classe habitat/sol nu ou dégradé est nulle avec un Cr de 0. En tenant compte de la définition du coefficient de rétention (Cr) sur la capacité de rétention des écoulements des classes de l'occupation du sol de (Cecchi et *al.*, 2009), la valeur de la savane (158) pour l'année 2000 est supérieure à 100, ce qui correspond à un bassin encore sauvage doté d'une forte capacité de rétention et donc peu propice à l'intensification des écoulements, tandis que pour le reste des classes obtenues, comme l'indique le tableau N°6, ces valeurs sont faibles et correspondent à des bassins anthropisés, voire dégradés, dotés d'une faible capacité de rétention et donc, à l'inverse des précédents, propice à d'importants écoulements. C'est donc une zone propice aux écoulements de surface qui ont pour effet le développement de l'érosion hydrique. Ces résultats et cette analyse rejoignent ceux de (Cecchi

et *al.*, 2009) et de (Soro et *al.*, (2014) respectivement au nord et au centre de Côte d'Ivoire. Quant aux résultats des impacts géomorphologiques, le tableau N°8 montre l'ampleur à travers les 9 ravins représentatifs dans la zone d'étude. Les résultats énumérés sont proches de ceux trouvés par (Moueba, 2020 et Ngatsé et *al.*, 2017).

Conclusion

Une analyse diachronique d'images satellitaires Landsat 7 ETM+ et Sentinel-2 MSI sur une période de 20 ans, soit de 2000 à 2020 a été réalisée pour évaluer la dynamique de l'occupation du sol et ses impacts géomorphologiques dans la zone d'étude. La méthode de classification supervisée a permis d'identifier 4 classes d'occupation du sol dans la zone d'étude : eau, forêt, savane et habitat/ sol nu. Les précisions globales obtenues sont de 99% (2000) et de 98% (2020). L'indice de Kappa de la matrice de confusion est de 0,98 pour l'année 2000 et 0,96 pour l'année 2020. Les cartes d'occupation du sol réalisées pour l'année 2000 et 2020 permettent d'identifier une évolution temporelle et spatiale de l'occupation du sol dans la zone d'étude. Les taux d'évolution moyens annuels évalués montrent une régression de la savane (-3,5). Cependant, on remarque une tendance à l'évolution pour la forêt (3,4), habitat/sol nu (9,4) et légèrement le plan d'eau (0,5). De même, on observe de très faibles coefficients de rétention avec des valeurs en dessous de 100 pour les deux années (2000 et 2020) d'étude en dehors de la savane (158) en 2000 qui correspond à des bassins encore sauvages dotés d'une importance couverture végétale, d'une forte capacité de rétention et donc peu propice à l'intensification des écoulements pouvant être capable de dégrader le milieu tout en laissant des impacts géomorphologiques très significatifs. Cette analyse est importante dans la mesure où elle a permis de comprendre les divers changements intervenus dans l'occupation du sol durant cette période, d'une part, et les causes qui sont à l'origine d'autre part. En tenant compte des résultats cités plus haut, on peut donc conclure que la dégradation est due à la pression humaine exercée vis-à-vis du milieu naturel. Cette hypothèse paraît plausible dans la mesure où on constate une augmentation des superficies au profit des classes habitat/sol nu ou dégradé et de forêt. Enfin, la zone d'étude est marquée par une forte anthropisation et une dégradation avec effet des ravinements qui pour la plupart sont à l'origine après implantation des infrastructures et/ou l'installation des sites d'exploitations des carrières. Cette étude montre également l'importance de la cartographie par télédétection dans la compréhension des modifications profondes de l'occupation du sol et de ses conséquences sur l'environnement dans la zone d'étude.

Références bibliographiques

- Akognongbé, A., Abdoulaye, D., Vissin, E., & Boko, M. (2014, 1 mai). *Dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou, au Bénin*. *Afrique Science*, 10(2). <http://www.afriquescience.info/document.php?id=3450>
- Cecchi, P., Gourdin, F., Koné, S., Corbin, D., Jackie, E., & Casenave, A. (2009). *Les petits barrages du nord de la Côte d'Ivoire : Inventaire et potentialités hydrologiques*. *Sécheresse*, 20(1), 112–122.
- Chalifoux, S., Nastev, M., Lamontagne, C., Latifovic, R., & Fernandes, R. (2006). *Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire Landsat en hydrogéologie*. *Centre canadien de télédétection, Ressources naturelles Canada, Contemporary Publishing International*, 6(1), 9–17.
- Hokili, Y. M., & Sitou, L. (2024). *Perceptions locales de l'érosion hydrique dans la sous-préfecture de Gamboma (Département des Plateaux au Nord-Congo, République du Congo)*. *Revue Francophone*, 2(3), 180–199.
- Guillot, B., & Peyrot, B. (1979). *Étude du fonctionnement des vallées sèches du Plateau de Mbé (Congo) : Problèmes hydrologiques et morphologiques*. *Sciences Humaines*, 16(3), 205–231.
- Katz, H. A., Daniels, M., & Ryan, S. (2013). Slope–area thresholds of road-induced gully erosion and consequent hillslope–channel interactions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(3), 285–295. <https://doi.org/10.1002/esp.3443>
- Khiari, H., Hannachi, H., Mallekh, F., Hsairi, M., & Réseau Maghrébin PRP2S. (n.d.). *Série des fiches méthodologiques en recherches et en rédaction scientifique – Fiche n°8 : Comment évaluer la concordance entre deux mesures qualitatives par le test de Kappa*. Réseau Maghrébin PRP2S, 1–8.
- Koné, I. Z., Adja, M. G., Kouassi, K. D., Bindoudou, I. A. K., Salihou Djari, M. M., & Jourda, J. P. (2022). *Classification orientée-objet d'une image Sentinel-2A pour la cartographie de l'occupation du sol via eCognition : Cas de la zone urbaine et périurbaine de Boundiali dans la région de la Bagoué (Nord de la Côte d'Ivoire)*. *International Journal of Engineering Science Invention (IJESI)*, 11(4/1), 44–56. <http://www.ijesi.org>
- Kpedenou, D. K., Drabo, O., Ouoba, P. A., & Da, C. E. (2017). *Analyse de l'occupation du sol pour le suivi de l'évolution du paysage du territoire Ouatchi au sud-est du Togo entre 1958 et 2015*. *Cahiers du Cerleshs*, 31(55), 203–228.
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159–174.
- Mayima, B. A., M'Bouka Milandou, I. A. W., & Sitou, L. (2019). *Occupation des sols et dégradation environnementale par l'érosion hydrique dans la commune urbaine de Kintélé (République du Congo) : Diagnostic et proposition de solutions de lutte*. *Revue Marocaine de Géomorphologie*, 3, 93–111.
- M'Bouka Milandou, I., & Mayima, B. A. (2022). *Occupation des sols et stagnation des eaux pluviales à Nanga, dans l'arrondissement 6 Ngoyo à Pointe-Noire (République du Congo)*. *Revue Scientifique en Géographie*, 2, 97–117.
- Méréga, O., Emererio, J.-L. S., Fall, A., & Andrieu, J. (2021). *Cartographie par télédétection des variations spatio-temporelles de la couverture végétale spontanée face à la variabilité pluviométrique au Sahel : Approche multiscalaire*. *Physio-Géo*, 16, 1–28. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.12345> (à remplacer par DOI réel si disponible)

Mamadou, A. S. (2009). *Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat*. [Mémoire de master non publié].

Moueba, G. R. (2020). *Étude de la dégradation du site de la commune urbaine de Kintélé par l'érosion hydrique (République du Congo)*. [Mémoire de master, Université Marien Ngouabi].

Ngatse, R., Sitou, L., & M'Bouka Milandou, I. (2017). *L'érosion hydrique dans le bassin versant de la Djiri au nord de Brazzaville (République du Congo) : Analyse et quantification*. *Revue Marocaine de Géomorphologie*, 1, 95–112.

Ouedraogo, H., Zoungrana, B. J.-B., Rouamba, J., & Zongo, G. (2024). *Influence de la dynamique de l'utilisation des terres sur le fleuve Mouhoun au Burkina Faso*. *Revue Internationale du Chercheur*, 5(1), 849–867.

Soro, G., Ahoussi, E. K., Kouadio, E. K., Soro, T. D., Oularé, S., Saley, M. B., Soro, N., & Biemi, J. (2014). *Apport de la télédétection à la cartographie de l'évolution spatio-temporelle de la dynamique de l'occupation du sol dans la région des Lacs (Centre de la Côte d'Ivoire)*. *Afrique Science*, 10(3), 146–160. ISSN 1813-548X