



Research Paper

Impacts de l'exploitation aurifère sur les écosystèmes forestiers dans la province du Haut-Uélé

Heissen NANGAA BOMBIBAMBE^{1*}, Albert OKUNGO LOTOKOLA² & Dimanche YENGA BOMBEKU³

¹Laboratoire de physiologie végétale et nutrition des plantes, Institut facultaire des sciences agronomiques de Yangambi, BP. 1232 Kisangani, RD Congo

²Laboratoire de physiologie végétale et nutrition des plantes, Institut facultaire des sciences agronomiques de Yangambi, BP. 1232 Kisangani, RD Congo

³Laboratoire d'agroforesterie tropicale et écoagriculture, Option Eaux et forêts, Institut facultaire des sciences agronomiques de Yangambi, BP. 1232 Kisangani, RD Congo

Résumé

Depuis une certaine décennie, l'exploitation aurifère est réalisée dans les espaces naturelles de la province de Haut - Uélé par les coopératives minières et leurs partenaires étrangers dont principalement les chinois et les ougandais. La présente étude avait pour objectif d'évaluer les impacts de cette exploitation aurifère dans les écosystèmes forestiers afin d'en proposer les mesures d'atténuation ces derniers pour pérenniser les avantages d'offrent ces écosystèmes à la population riveraine voire à l'humanité. Pour mener à bien cette étude, la méthode géo-spatiale combinée à celle des enquêtes sur terrain ont été utilisées. Les résultats obtenus montrent que l'évolution du couvert végétal n'est pas statique plutôt dynamique tendant vers la réduction au fil du temps des étendues du couvert végétal des écosystèmes forestiers, accompagnée ipso-facto par leur dégradation, au profit des zones d'exploitation minière et autres. Pour les quatre Territoire étudiés, les valeurs moyennes des indices de végétations obtenues (NDVI, EVI, LAE et NDWI) régressent significativement au fil du temps qu'il s'intensifie l'exploitation minière dans la zone d'étude. Les écosystèmes forestiers de la zone d'étude présentent une importante réduction de leurs superficies au profit des zones d'exploitation aurifère qui en leur tours présentent un accroissement très significatif de ses superficies.

Mots-clés : Exploitation aurifère, dégradation, écosystèmes forestiers, Haut-Uélé, RDC

Abstract

For the past decade, gold mining has been carried out in the natural areas of Haut-Uélé province by mining cooperatives and their foreign partners, primarily Chinese and Ugandan. The objective of this study was to assess the impacts of this gold mining on forest ecosystems in order to propose mitigation measures to sustain the benefits these ecosystems offer to the local population and even to humanity. To conduct this study, a geospatial method combined with field surveys was used. The results obtained show that the evolution of vegetation cover is not static but rather dynamic, tending towards a reduction over time in the extent of vegetation cover in forest ecosystems, ipso facto accompanied by their degradation, to the benefit of mining and other areas. For the four study areas, the average values of the vegetation indices obtained (NDVI, EVI, LAE, and NDWI) declined significantly over time as mining intensified in the study area. Forest ecosystems in the study area showed a significant reduction in their surface area, in favor of gold mining areas, which in turn showed a very significant increase in their surface area.

Keywords: Gold mining, degradation, forest ecosystems, Haut-Uélé, DRC

Received 21 Oct., 2025; Revised 02 Nov., 2025; Accepted 04 Nov., 2025 © The author(s) 2025. Published with open access at www.questjournas.org

I. INTRODUCTION

La République Démocratique du Congo compte une superficie forestière évaluée à 125 millions d'hectares, soit près de 52% du territoire national. Elle possède un réseau hydrographique très dense. Les cours d'eau représentés par l'immense réseau fluvial, les plaines inondées et les lacs couvrent environ 86.080Km² (3,5% de la superficie nationale) et ont un potentiel halieutique considérable (Baudouin-Gilbert, 2017)

Les écosystèmes forestiers jouent plusieurs rôles primordiaux par le fait qu'ils offrent un habitat et un lieu propice de reproduction pour de nombreuses espèces animales et aviaires, fournissent une gamme diversifiée des nourritures bio aux animaux et aux humains. Ils sont complexes et interconnectés, véritables puits de carbones naturels. Ils absorbent le dioxyde de carbone de l'atmosphère et stockent le carbone. Cela aide à réguler le climat en réduisant la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ce qui contribue à ralentir le réchauffement climatique. Les écosystèmes forestiers sont donc essentiels pour maintenir un équilibre climatique stable sur notre planète (Guillaume de Buren, 2014).

En ce qui concerne les ressources minérales, point n'est besoin de rappeler que la RDC est connue pour ses grandes réserves en nombreux minéraux, allant de l'uranium à l'or, en passant par les diamants et la cassitérite, etc. Toutefois, jusqu'en 1982, ce secteur était le monopole de l'exploitation industrielle (Tshimanga Mulangala et Tshibanza Monji, 1985 in Kyale et *al.* 2021). Ainsi, à partir de la décennie 80, l'Etat congolais (Zaïrois à l'époque) s'était confronté aux multiples défis d'ordre politique et socio-économique¹ ayant nécessité la libéralisation de l'exploitation minière sur toute l'étendue de la République (Kyale, 2021). Depuis lors, l'on a assisté à l'ouverture des foyers miniers où les minerais sont exploités de manière artisanale dans la plupart des provinces du pays. Cette politique de libéralisation était intervenue dans un contexte particulièrement marqué par la chute d'emplois et la faillite des entreprises implantées au pays.

La province du Haut – Uélé est dominée par l'or qui est un métal précieux reconnu pour sa rareté, sa durabilité et sa préciosité. S'il a toujours occupé une place de choix dans la joaillerie et l'artisanat, on constate également depuis quelques décennies qu'il est l'une des valeurs les plus sûres dans l'investissement boursier et qu'il est particulièrement prisé pour la fabrication de nouvelles technologies électroniques, médicales et aéronautiques (Bamamen, 2013)

Depuis sa découverte en 1903, l'or a fait plus de mal que de bien aux Congolais. L'administration belge a financé son conflit contre l'Allemagne coloniale avec de l'or et le diamant de la RDC, chose qui a établi le fondement historique de la notion actuelle de « minerais du conflit ». La production de l'or dans les mines de Moto dans le Haut – Uélé et dans les mines de Kilo en Ituri, a à l'époque également contribué à garder le trésor colonial en règle avec ses créanciers internationaux (Cyrille et *al.* 2015)

Il s'observe fort malheureusement, dans la pratique que l'exploitation minière dans la partie Est de la République Démocratique du Congo, s'opère sans intégrer les aspects liés à la durabilité environnementale et sociale occasionnant ainsi les dégradations et pollutions diverses du sol, des eaux, des paysages naturels, des forêts, des diverses espèces fauniques et plusieurs paramètres de vie humaine (Arbre, 2019).

Mais depuis 2018, avec l'avènement de la Loi n°18/001 du 09 mars 2018 modifiant et complétant la Loi n°007/2002 du 11 juillet 2002 précitée, qui a intégré des préoccupations socioéconomiques, la durabilité environnementale et sociale dans la chaîne d'exploitation minière en RDC, et a ouvert une brèche aux exploitants artisanaux de pouvoir développer des partenariats gagnant – gagnant avec les partenaires étrangers.

Bon nombre des investisseurs qui opèrent dans le secteur minier dans la partie Nord – Est de la RD Congo, s'associent à ces jours, aux coopératives minières pour extraire de l'or dans les sites miniers qui est ou étaient en majorité exploités de manière artisanale avec des outils et méthodes rudimentaires par les communautés riveraines. Ces derniers apportent des nouvelles méthodes et techniques d'exploitation qui ne sont, soit pas du tout connues ou, soit ne pas encadrée par les services techniques et spécialisés de l'Etat attirés. Cela suggère que ces nouveaux modes opératoires clandestins et/ou informels, sont à la source des nombreux impacts négatifs dont le niveau de nuisance n'est pas encore évalué tant sur le plan social qu'environnemental (Arbre, op.cit.).

La dégradation des eaux et des terres arables continue d'être une inquiétude mondiale, en raison de la menace qu'elle représente à la fois pour le fonctionnement des écosystèmes et le bien-être des communautés humaines (Bemy, 2008). Par ailleurs, les risques de dégradation de l'environnement, notamment l'écosystème forestier sont croissants du fait de l'intensité élevée de l'orpaillage dans certaines régions de l'Afrique (Bemy, 2008).

Au Burkina Faso par exemple, l'exploitation artisanale de l'or s'accompagne en général d'ouverture de tranchées, de puits, du grattage et du retournement des sols, avec pour corolaire ; la fragilisation des sols, la destruction progressive des terres arables et la détérioration de divers écosystèmes (Maradan et *al.*, 2011). Ce mode d'exploitation n'est pas exclu en République Démocratique du Congo, voire même les conséquences y afférentes ne l'épargnent non plus.

En ces jours, l'exploitation minière, telle qu'elle s'exerce dans la partie Nord – Est de la RDC en général et en Province du Haut-Uélé en particulier, crée de nouveaux défis qui exacerbent les challenges environnementaux, sanitaires et même sécuritaires du fait de la non observance des prescrits légaux en la matière. En effet, l'utilisation des produits chimiques toxiques tels que le mercure et le cyanure pour le traitement de l'or, avec les matériels, les engins, les techniques et méthodes d'exploitation minière non adaptées conduisent à la dégradation de la biodiversité, à la pollution des eaux et des sols, à la dévastation des grands espaces des écosystèmes forestiers et à leur dégradation, etc.

Pendant que la déforestation et la dégradation des écosystèmes forestiers entraînent, dans la plupart de cas, la disparition de nombreuses espèces animales et végétales, la diminution des fonctions socio-écologiques et environnementaux des forêts, l'apparition des nouvelles espèces, occasionnent différents types des pathologies chez les plantes (Schwerdtfeger., 2019).

Pour ce faire, il s'avère indispensable qu'on évalue les impacts de l'exploitation artisanale de l'or et de la petite mine, sur les composantes biologiques de l'environnement, spécialement les écosystèmes forestiers. Ces études doivent intégrer la dimension de l'analyse des mécanismes appliqués par les exploitants pour la protection des écosystèmes forestiers afin de proposer les mesures d'atténuation des impacts et de réhabilitation des zones dégradées suite à ces exploitations aurifères.

Le présent travail vise à évaluer les impacts de l'exploitation aurifère dans les écosystèmes forestiers de la Province du Haut-Uélé, afin de proposer les mécanismes efficaces de prévention et d'atténuation des impacts négatifs ainsi que le mécanisme de réhabilitation des sites dégradés.

II. MATERIEL ET METHODE

2.1. Milieu d'étude

La présente étude s'est réalisée dans **78** agglomérations et sites miniers réparties dans 9 ETD et dans 4 Territoires de la Province du Haut – Uélé dans la partie Nord - Est de la République Démocratique du Congo. Ces territoires constituent une excellente zone pilote pour ce type de recherche, étant donné que cette zone regroupe plusieurs caractéristiques plus aux moins communes (zones forestières, savanicoles, galeries forestières, forêts des montagnes malgré à des faibles altitudes que celles de Nord-Kivu, etc.) aux autres zones minières de la partie Nord – Est de la RD Congo où l'exploitation artisanale de l'or est prépondérante. Le tableau 1 liste les entités territoriales décentralisées concernées par la présente étude.

Tableau 1 : Liste des entités territoriales décentralisées et nombre d'agglomérations et sites miniers concernés par la présente étude.

N°	Nom de l'entité	Statut juridique	Territoire	Nombre d'agglomération et site minier concerné
1	Wando	Chefferie	Dungu	12
2	Logo – Bagela	Chefferie	Faradje	6
3	Logo – Doka	Chefferie	Faradje	13
4	Mabudu-Malika-Baberu	Secteur	Wamba	18
5	Malika – Toriko	Chefferie	Wamba	3
6	Kibali	Secteur	Watsa	10
7	Mangbutu	Chefferie	Watsa	3
8	Marie – Minza	Chefferie	Watsa	12
9	Isiro	Ville	Isiro/Ville	1
Total				78

Source : données de terrain.

La Province du Haut – Uélé est comprise entre 1°15' et 5°30' de latitude Nord et 26°20' et 30°40' de longitude Est. Au nord, elle est limitée par le Sud-Soudan et la République centrafricaine ; à l'Est, par l'Ituri ; au Sud, par l'Ituri et la Tshopo ; à l'Ouest, par le Bas-Uélé. Avec une superficie d'environ 91.624 km². Elle couvre en totalité ou en partie 14 cartes planimétriques régulières à 1/200.000 (degrés carrés). Elle comprend 6 Territoires dont Dungu, Faradje, Niangara, Rungu, Wamba et Watsa (Omasombo, 2011).

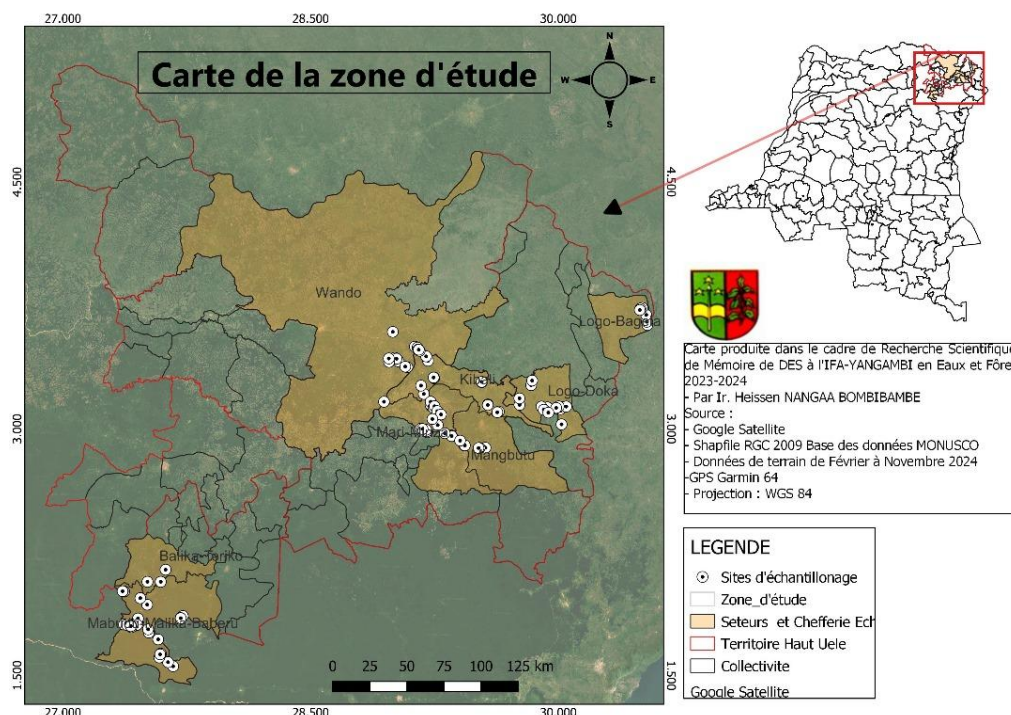


Figure 1 : Carte de la zone d'étude.

2.2. Matériels

Pour la collecte des données de terrain, nous nous sommes servi des tablettes marque Tecno incorporant l'application Kobo Collect, des questionnaires d'enquête, note book et crayon pour noter les informations complémentaires de terrain, un Téléphone marque iPhone 12 pro max pour la prise des vues des données observées sur terrain et un GPS Garmin 64 pour les prélèvements des coordonnées géographiques.

Logiciel Sphinx pour l'encodage de questionnaire ; Logiciel Q gis et Arc gis pour l'analyse et les traitements des images Landsats et la production des cartes géo-référencées ; Google Eath pour l'analyse, les traitement et production des orthophotos des sites miniers ;

2.3. Méthodes

2.3.1. Prospection de la zone d'étude

Pour décider de la méthodologie appropriée à cette étude, une prospection sur terrain a été effectué au mois de Juin 2023. Après la prospection, nous nous sommes référés au choix de méthode hybride basée sur les analyses géo-spatiale et les enquêtes de terrain qu'avait utiliser Green et al., 1994 et Rossi, 2014, afin d'évaluer les impacts de l'exploitation aurifère sur les écosystèmes forestiers dans la zone d'étude.

2.3.2. Méthode géo-spatiale

Le recours aux données géo-spatiales a permis de faire une étude rétrospective sur l'évolution du couvert végétal pour la période allant de 2014 à 2024, de quantifier les changements observés et d'analyser les impacts environnementaux de l'exploitation aurifère dans les écosystèmes forestiers de la zone d'étude. Cela a été rendu possible à l'aide des indices de végétation dont **NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index ou Indice de végétation différentiel normalisé) : cet indice nous a servi à évaluer et comparer la santé/valeur de la végétation pour la période allant de 2014 à 2024 ; **EVI** (Enhanced Vegetation Index ou Indice de Végétation Améliorée) : nous a permis d'évaluer les effets du sol et de l'humidité de l'air, c'est qui a facilité l'analyse précise de la végétation dans les zones dégradées et enfin **LAI** (Indice de surface foliaire) : nous a servi à estimer la densité de la couverture végétale, qui permet de suivre les changements dans la structure forestière. Cela permet de quantifier la couverture foliaire en utilisant le NDVI comme indicateur.

2.3.3. Obtention et traitement des images satellitaires

Pour obtenir les images, nous avons recouru à deux sources des données géo-spatiale dont notamment : les images Landsat (8 et 9) et les images Google Eath (orthophoto). Pour acquérir les images Landsat un compte a été créé sur le site USGS, qui nous a facilité le téléchargement des images satellitaires des années 2014, 2015, 2016, 27, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 23 et 2024.

Pour les traitements des images Landsat téléchargées, nous avons commencé par l'assemblage des bandes spectrales, cela consiste à combiner les différentes bandes spectrales en une seule image composée de plusieurs bandes (image multi spectrale) ce qui a rendu la manipulation plus facile et a permis à ce que le traitement se fassent simultanément sur l'ensemble des bandes regroupées (Tabopda and Fotsing, 2010). Ainsi les bandes 5, 4 et 3 ont été combinées pour les années 2016, 2018 et 2024 à l'aide des capteurs ETM et ETM+ ; tandis que les bandes 6, 5 et 4 pour l'année 2022 ont été combinées à l'aide des capteurs OLI et TIRS.

Après l'assemblage, nous avons fait le découpage des images : les images satellitaires téléchargées dans le cadre de cette étude couvraient des superficies qui dépassent de loin la zone d'étude. A l'aide du logiciel ERDAS 14 et ArcGIS, les zones concernées ont été délimitée et découpée.

Le traitement proprement dit s'est basé à la classification des images découpées à l'aide des logiciels ERDAS 14 et ArcGIS Pro, grâce à l'algorithme du maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood).

Cette méthode consiste à tenir compte de la probabilité pour qu'un pixel appartienne à une classe donnée plutôt qu'à une autre. Les pixels sont affectés par le logiciel à la classe pour laquelle la probabilité d'appartenance est la plus forte (Bourgoin, 2019).

La classification des images découpées a conduit à la discrimination des unités d'occupations du sol, qui a permis de déterminer les affectations en fonction de trois couleurs primaires (rouge, vert et bleu).

- La couleur rouge : donne des renseignements sur les zones d'exploitation et dégradées ainsi que sur les sols nus ;

- Couleur vert : donne des renseignements sur les différents types d'écosystème forestier (forêts denses, jachères, savanes, forêts artificielles, etc.)

- Couleur bleu : donne de renseignement sur les lacs, les rivières et les zones humides.

La superposition de coordonnées géographiques prélevées au terrain sur les images landsat a aidé à déterminer la réalité du terrain et de faire un suivi rétrospectif des zones cibles.

A l'issus de ce traitement que nous les cartes géo-référencées des paysages et des écosystèmes forestiers importants pour cette investigation ont été produit, en identifiant les zones particulièrement touchées par l'exploitation aurifère.

Google Eath

Les images obtenues sur la plateforme Google Eath, ont été soumis aussi un prétraitement avant de faire le traitement proprement dit. Ainsi voici la procédure suivie :

- Géo-référencé l'image ;
- Réglage de l'opacité ;
- Filtrage de nuage de la zone d'étude ;
- Création des polygones des zones d'intérêts ;
- Production des cartes des sites témoins de dégradation dans la zone d'étude.

2.3.4. Analyse des images géo-spatiales

Dans le cadre de cette étude, la méthode de la triangulation des informations provenant de trois sources principales a été mise en contribution à savoir les données de terrain, les images satellitaires et la revue documentaire. Nous avons calculé les indices de végétation et faire la matrice de confusion afin d'obtenir de valeurs liées aux fluctuations des écosystèmes forestiers et comparer les données du terrain et les données spatiales.

Cette approche combinée a permis d'une part de valider les informations obtenues, en croisant différentes perspectives pour en tirer des conclusions plus fiables, d'autres part, à décrire les impacts de l'exploitation aurifère sur les écosystèmes forestiers, de décrire la sensibilité des écosystèmes forestiers et de déterminer les périodes critiques de dégradation.

Pour les images Landsat, les analyses ont beaucoup porté sur les valeurs des indices de végétations obtenues sur base des formules ci-après :

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (1)$$

Où :

- NDVI : Normalized Difference Vegetation Index (Indice de végétation différentiel normalisé) ;
- NIR : Réflectance dans le proche infrarouge
- RED : Réflectance dans le rouge visible.

Il sied à noter que les valeurs trouvées varient entre -1 et 1, où des valeurs proches de 1 indiquent une végétation dense et saine, tandis que les valeurs proches de 0 ou négatives indiquent une dégradation ou une absence de végétation.

$$EVI = 2.5 \times \frac{(NIR - RED)}{(NIR + C1 + RED - C2 \times BLUE + L)} \quad (2)$$

Où :

- EVI : Enhanced Vegetation Index (Indice de Végétation Améliorée) ;
- NIR : Réflectance dans le proche infrarouge ;
- RED : Réflectance dans le rouge visible ;
- BLUE : Réflectance dans le bleu visible ;
- C1, C2 : Coefficients de correction atmosphérique (typiquement C1=6, C2=7.5) ;
- L : Facteur de correction du sol (généralement L=1).

Il sied à noter que les valeurs trouvées varient entre -1 et 1, où des valeurs positives généralement entre 0 et 1 indique la présence de la végétation, avec des valeurs plus révélées correspondant à une végétation plus dense et plus saine. Les valeurs proches de 0 peuvent indiquer des terres nues ou de la végétation clairsemée tandis que les valeurs négatives indiquent des surfaces aquatiques ou nuages.

$$LAI = \frac{1}{2} \times \ln\left(\frac{1}{NDVI}\right) \quad (3)$$

Où :

- LAI : Leaf Area Index (Indice de Surface Foliaire) ;
- NDVI : Normalized Difference Vegetation Index (Indice de végétation différentiel normalisé).

Il sied à noter que les valeurs trouvées varient entre 0 et 3, où des valeurs proches de 0 indiquent peu ou pas des végétations, les valeurs entre 1 et 3 suggère une végétation modérée, typique des prairies ou des zones boisées légères. Valeur >3 indique une densité des végétations élevées comme dans une forêt dense.

Pour la matrice de confusion, elle a été dressée afin de comparer les résultats classifiés aux réalités de terrain et ainsi mesurer la performance de la classification à l'aide des indices de performance dont Kappa et celui de précision ou de sensibilité. Elle prend la forme d'un tableau comparatif entre les catégories observées sur le terrain (vérités terrain) et les catégories prédites par la classification des images.

Pour calculer ces indices de performance, les formules ci-dessous ont été mises en contribution :

$$Kappa = \frac{Po - Pe}{1 - Pe}$$

Où :

- Po : est l'exactitude globale observée.
- Pe : est l'exactitude attendue par hasard (calculée à partir de la distribution des catégories).

$$\text{Précision de la classe} = \frac{\text{Nombre de pixel correctement classé pour cette classe}}{\text{Total des pixels observés dans cette classe}} \times 100$$

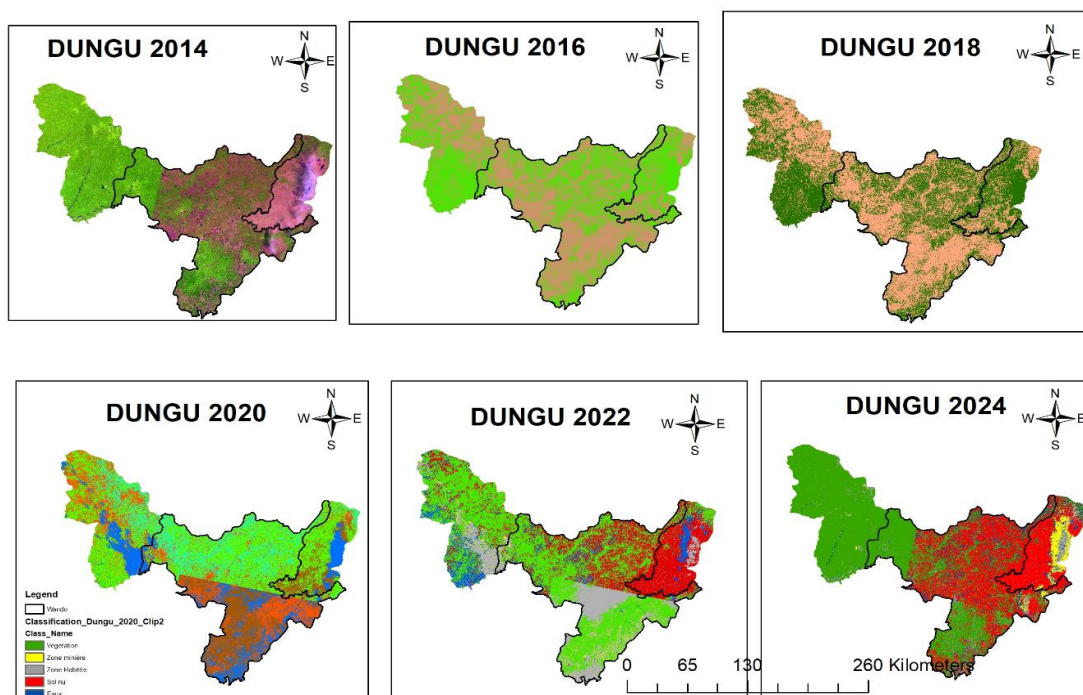
Il sied à noter que les valeurs trouvées varient entre <0,4 et > 0,8. Où des valeurs <0,4 indiquent un accord faible c'est-à-dire qu'il y a beaucoup de discordance, et la méthode de classification pourrait nécessiter des ajustements significatifs. Si les valeurs trouvées varient entre 0,4 et 0,6 cela indique un accord modéré. C'est-à-dire les résultats sont acceptables, mais une certaine révision ou amélioration de la méthode de classification peut être nécessaire. Si les valeurs varient entre 0,6 et 0,8 cela indique un accord modéré à bon. Il peut y avoir des erreurs, mais dans l'ensemble, la classification est fiable. Si les valeurs trouvées sont > 0,8 cela indique un accord très bon c'est-à-dire la classification à une très bonne précision ou fiabilité.

Pour les images spatiales obtenues à l'aide de Google Earth, les analyses ont consisté au calcul des superficies des forêts déboisées selon les années de repères disponibles sur la plateforme. Nous avons ensuite ressorti les courbes de tendances de l'évolution de la déforestation due aux activités minières et déterminer enfin les sites et les années les plus critiques après comparaison des valeurs des autres sites et années.

III. RESULTATS

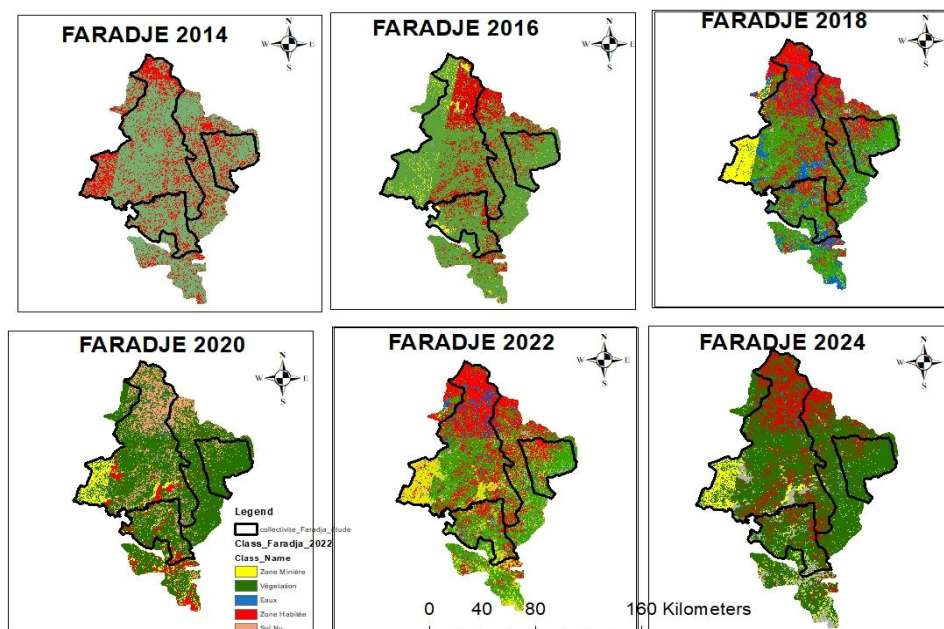
3.1. Évolution de couvert végétal des écosystèmes forestiers dans les différents territoires d'étude de 2014 à 2024

La figure 2 présente l'évolution du couvert végétal des écosystèmes forestiers de Territoire de Dungu de 2014 à 2024. L'observation comparée de ces différentes images Landsats du Territoire de Dungu, montre en général la réduction du couvert végétal au profit des autres occupations du sol telles que les zones minières, les zones d'habitation et autres. Cette réduction est accompagnée ipso-facto par la dégradation des écosystèmes forestiers.



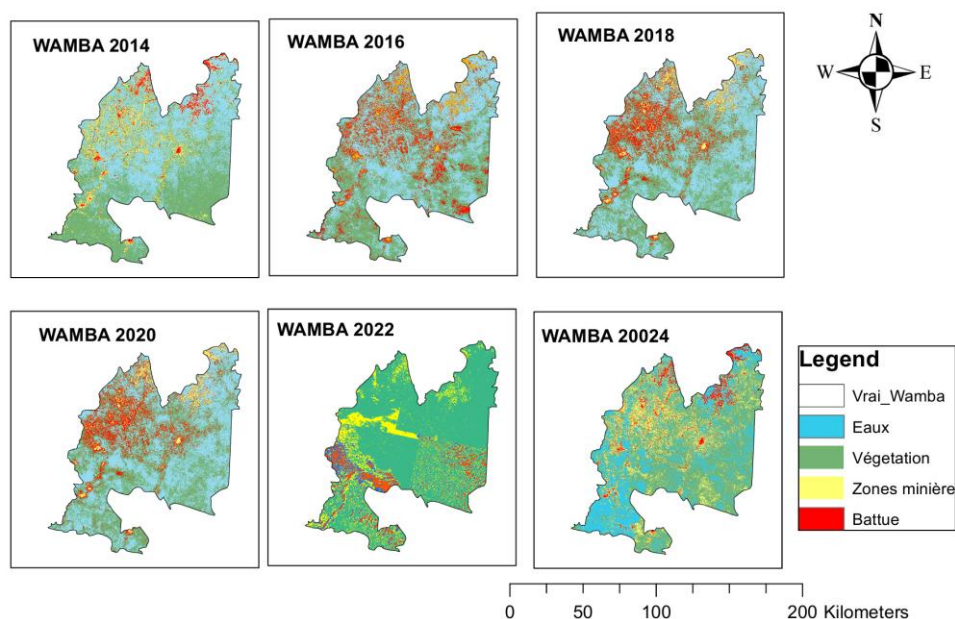
La figure 2 : l'évolution de couvert végétal des écosystèmes forestiers de Territoire de Dungu de 2014 à 2024.

La figure 3 montre l'évolution du couvert végétal des écosystèmes forestiers de Territoire de Faradje de 2014 à 2024. Il ressort de l'observation de ces images Landsats que l'évolution du couvert végétal n'est pas statique et qu'elle évolue vers la réduction des étendues du couvert végétal des écosystèmes forestiers et leur dégradation. Cependant, Il s'observe par contre un accroissement progressif des étendues exploitées au cours de temps.



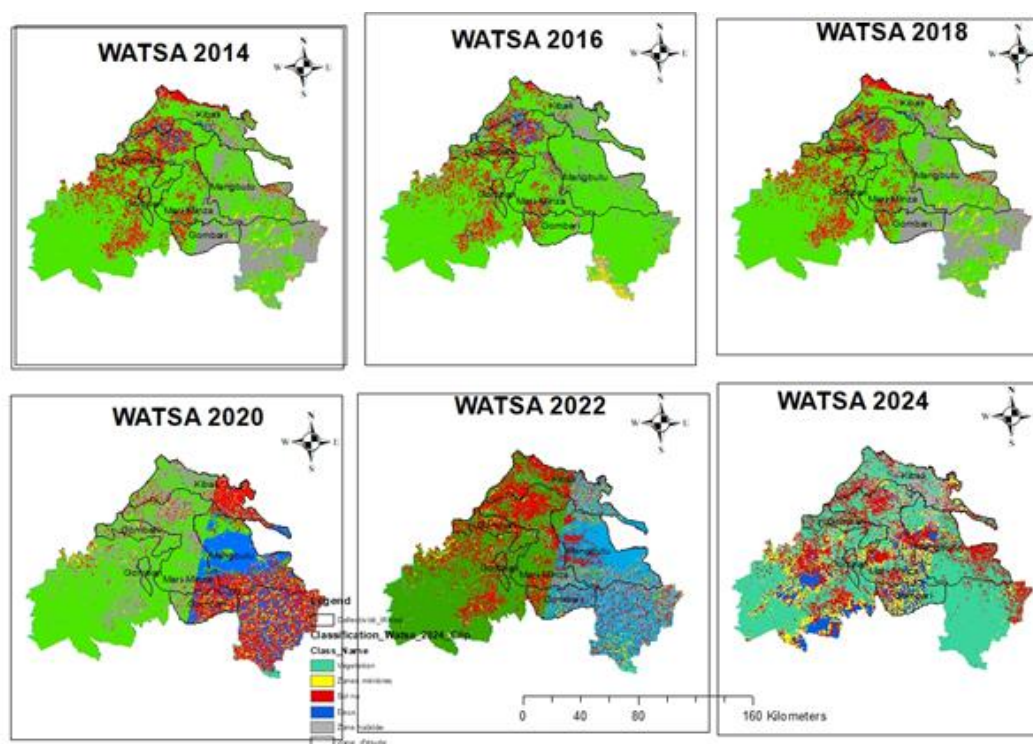
La figure 3 : Evolution du couvert végétal des écosystèmes forestiers de Territoire de Faradje de 2014 à 2024.

La figure 4 montre l'évolution du couvert végétal des écosystèmes forestiers de Territoire de Wamba entre 2014 à 2024. Il ressort de l'observation de ces images Landsats que l'évolution du couvert végétal n'est pas statique et qu'elle évolue vers la réduction des étendues du couvert végétal des écosystèmes forestiers et leur dégradation. Cependant, Il s'observe par contre un accroissement progressif des étendues exploitées au cours de temps.



La figure 4 : l'évolution de couvert végétal des écosystèmes forestiers de Territoire de Wamba de 2014 à 2024.

La figure 5 montre l'évolution du couvert végétal des écosystèmes forestiers de Territoire de Watsa entre 2014 à 2024. De l'analyse de ces images, on note que comme pour les autres territoires de la zone d'étude, celui de Watsa présente les mêmes caractéristiques d'évolution de couvert végétal et des zones minières.



La figure 5 : l'évolution du couvert végétal des écosystèmes forestiers de Territoire de Watsa entre 2014 à 2024.

3.2. Les indices de végétation de la zone d'étude

3.2.1. Les indices de végétation, coefficient Kappa et matrice de précision du Territoire de Dungu

La situation en rapport aux moyennes des indices de végétation, coefficient Kappa et matrice de confusion du Territoire de Dungu est repris dans le tableau 3 et 4.

Tableau 3 : situation en rapport aux moyennes des indices de végétation de Territoire de Dungu.

Année	NDVI	EVI	NDWI	LAI
2014	0.75	0.64	0.30	4.5
2015	0.73	0.62	0.29	4.37
2016	0.69	0.58	0.27	4.12
2017	0.66	0.56	0.26	3.95
2018	0.62	0.52	0.24	3.69
2019	0.57	0.46	0.21	3.45
2020	0.50	0.39	0.18	3.01
2021	0.46	0.32	0.15	2.76
2022	0.44	0.30	0.14	2.65
2023	0.39	0.25	0.11	2.32
2024	0.35	0.20	0.09	2.10

Les résultats des indices de végétation de Territoire de Dungu indiquent des changements significatifs dans la couverture végétale des écosystèmes forestiers, l'humidité du sol et l'état général de la végétation. De ce fait, il s'observe une baisse de valeur moyenne du NDVI, avec une réduction prononcée entre les 2018 à 2024 où les valeurs décroissent vers 0, cela témoigne la perte significative de végétation et la dégradation des écosystèmes forestiers dû principalement à l'exploitation aurifère dans la zone d'étude.

Les valeurs moyennes de EVI décroissent aussi significativement, avec des valeurs très proches de 0, particulièrement entre 2018 à 2024, ce qui suggère à une réduction intense du couvert végétal des écosystèmes de Dungu laissant des terrains nus et avec de la végétation clairsemée.

Les valeurs de NDWI baissent également au fil des années, particulièrement entre 2014 et 2024, ce qui indique une diminution de l'humidité du sol. Cela est cohérent avec les effets de l'exploitation aurifère qui perturbe les écosystèmes hydrologiques locaux. L'extraction de l'or et les techniques utilisées (notamment le dragage et l'utilisation de produits chimiques) affectent négativement la qualité de l'eau, participent à la déforestation en laissant les étendues des sols nus, cela réduit l'humidité de sol et causent des modifications importantes dans les écosystèmes aquatiques, la perte de biodiversité, l'épuisement des ressources naturelles locales.

L'analyse des valeurs de LAI nous présente une situation similaire de décroissance de ses valeurs telle que trouvées avec les autres indices de végétation. Ici il y a une particularité du fait qu'à 2014 la valeur trouvée est 4,5 c'est qui indique une densité des végétations élevées comme dans une forêt dense et saine, tandis qu'en 2024 la valeur trouvée 2,10 est entre 1 et 3 c'est qui suggère une végétation soit modérée, soit du type prairies soit encore des zones légèrement boisées. Cela témoigne de plus qu'il y a déforestation et dégradation des écosystèmes forestiers dans cette zone d'étude.

Tableau 4 : Coefficient Kappa et matrice de précision pour le Territoire de Dungu

Les années étudiées	Précision globale	Indice Kappa	Décision
2014	77.8%	0.779	Classification parfaite
2016	100%	1	Classification parfaite
2018	100%	1	Classification parfaite
2020	90.563%	0.8990	Classification excellente
2022	88,6%	0.8541	Classification Excellente
2024	80,7%	0.807	Classification Excellente

Les résultats repris dans le tableau 4, montrent deux situations : premièrement l'indices ou coefficient Kappa avec des valeurs entre 0,6 et 0,8 c'est qui indiquent un accord modéré à bon c'est-à-dire il peut y avoir des erreurs, mais dans l'ensemble. La deuxièmement les valeurs obtenues sont > 0,8 cela indiquent un accord très bon c'est-à-dire que la classification a une très bonne précision.

D'où les résultats trouvés liés d'une part à l'évolution du couvert végétal des écosystèmes forestiers, au dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des superficies des zones minières et d'autres part sur les indices de végétation de Territoire de Dungu sont fiable.

3.2.2. Les indices de végétation, coefficient Kappa et matrice de confusion du Territoire de Faradje

La situation en rapport aux moyennes des indices de végétation, de précision et de Kappa du Territoire de Faradje est repris dans le tableau 5 et 6.

Tableau 5 : situation en rapport aux moyennes des indices de végétation du Territoire de Faradje

Année	NDVI	EVI	NDWI	LAI
2014	0.85	0.68	0.40	5.5
2015	0.84	0.67	0.38	5.3
2016	0.82	0.65	0.35	5.0
2017	0.79	0.62	0.32	4.6
2018	0.68	0.52	0.24	3.2
2019	0.65	0.49	0.21	2.8
2020	0.58	0.43	0.17	2.0
2021	0.55	0.40	0.15	1.8
2022	0.50	0.36	0.12	1.5
2023	0.48	0.34	0.10	1.3
2024	0.35	0.25	0.04	0.6

De l'analyse des résultats repris dans le tableau 5 il s'observe un décroissement prononcé des valeurs moyennes des indices de végétation avec une période critique entre 2018 à 2024 où les valeurs décroissent proche de 0, cela témoigne la réduction significative de végétation et la dégradation des écosystèmes forestiers dans ce terroir.

Tableau 6 : Indices de précision, coefficient Kappa et matrice de confusion de Territoire de Faradje.

Année	Précision globale	Indice Kappa	Décision
2014	80%	0,801	Classification parfaite
2016	82%	0,801	Classification parfaite
2018	100%	1,0	Classification Excellente
2020	100%	1,0	Classification parfaite
2022	89,6%	0,8951	Classification Excellente
2024	81,7%	0,807	Classification Excellente

Les résultats obtenus en rapport au Territoire de Faradje, montrent des valeurs l'indices ou coefficient Kappa avec des valeurs entre > 0,80 c'est qui indiquent un accord très bon c'est-à-dire que la classification a une très bonne précision. Par conséquent la classification est réputée parfaite pour 2014, 2016, 2020 et excellente pour 2018, 2022 et 2024.

D'où les résultats trouvés liés d'une part à l'évolution du couvert végétal des écosystèmes forestiers, au dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des superficies des zones minières et d'autres part sur les indices de végétation de Territoire de Faradje sont très fiable.

3.2.3. Les indices de végétation, de Kappa et matrice de confusion du Territoire de Wamba

La situation en rapport aux moyennes des indices de végétation, coefficient Kappa et matrice de confusion du Territoire de Wamba est repris dans le tableau 7 et 8.

Tableau 7 : situation en rapport aux moyennes des indices de végétation, précision et Kappa de Territoire de Wamba.

Année	NDVI	EVI	NDWI	LAI
2014	0.80	0.65	0.50	4.8
2015	0.78	0.63	0.48	4.6
2016	0.76	0.60	0.45	4.3
2017	0.73	0.56	0.42	4.0
2018	0.68	0.50	0.38	3.6

Année	NDVI	EVI	NDWI	LAI
2019	0.62	0.44	0.32	3.1
2020	0.56	0.38	0.27	2.7
2021	0.51	0.33	0.23	2.3
2022	0.45	0.28	0.18	2.0
2023	0.40	0.24	0.15	1.7
2024	0.34	0.19	0.10	1.4

Il s'observe, de l'analyse des résultats du tableau 5 que les indices de végétation de Territoire de Wamba, la même situation de décroissance des valeurs moyennes des indices de végétations vers les valeurs proches à 0 avec une période critique qui varie entre 2018 à 2024. Cela témoigne qu'il y a réduction significative du couvert végétale et la dégradation des écosystèmes forestiers dans le Territoire de Wamba.

Tableau 8 : Indices ou coefficient Kappa et matrice de confusion de Territoire de Wamba.

Années	Précision globale	Indice Kappa	Décision
2014	75.8%	0.760	Classification parfaite
2016	100%	1	Classification parfaite
2018	98%	0.979	Classification parfaite
2020	90.563%	0.8990	Classification excellente
2022	100%	1	Classification parfaite
2024	80,7%	0.807	Classification Excellente

Comme dans le Territoire de Dungu, les résultats repris dans le tableau 8, montrent deux situations : premièrement l'indices ou coefficient Kappa avec des valeurs entre 0,6 et 0,8 c'est qui indiquent un accord modéré à bon c'est-à-dire il peut y avoir des erreurs, mais dans l'ensemble. La deuxièmement les valeurs obtenues sont > 0,8 cela indiquent un accord très bon c'est-à-dire que la classification a une très bonne précision.

D'où les résultats trouvés liés d'une part à l'évolution du couvert végétal des écosystèmes forestiers, au dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des superficies des zones minières et d'autres part sur les indices de végétation de Territoire de Wamba sont fiable.

3.2.4. Les indices de végétation, de Kappa et matrice de confusion du Territoire de Watsa

La situation en rapport aux moyennes des indices de végétation, coefficient Kappa et matrice de confusion du Territoire de Watsa est repris dans le tableau 9 et 10.

Tableau 6 : situation en rapport aux moyennes des indices de végétation de Territoire de Watsa.

Année	NDVI	EVI	NDWI	LAI
2014	0.82	0.65	0.38	5.2
2015	0.79	0.62	0.35	4.8
2016	0.73	0.57	0.31	4.1
2017	0.70	0.54	0.28	3.7
2018	0.65	0.49	0.24	3.0
2019	0.60	0.45	0.20	2.5
2020	0.53	0.39	0.16	1.9
2021	0.48	0.35	0.13	1.5
2022	0.46	0.33	0.12	1.3
2023	0.41	0.28	0.09	1.0
2024	0.36	0.23	0.05	0.7

Autant pour les autres Territoires de la zone d'étude, le Territoire de Watsa indique aussi la même situation de décroissance des valeurs moyennes des indices de végétation trouvées, signifiant les mêmes impacts dont la réduction du couvert végétale et dégradation des écosystèmes forestiers.

Tableau 10 : Indices ou coefficient Kappa et matrice de confusion du Territoire de Watsa.

Années	Précision globale	Indice Kappa	Décision
2014	81.8%	0.819	Classification parfaite
2016	96%	0.960	Classification excellente
2018	78.1%	0.781	Classification parfaite
2020	100%	1	Classification parfaite
2022	89,6%	0.8951	Classification Excellente
2024	81,7%	0.807	Classification Excellente

Les résultats repris dans le tableau 10, montrent deux situations : premièrement l'indices ou coefficient Kappa avec des valeurs entre 0,6 et 0,8 c'est qui indiquent un accord modéré à bon c'est-à-dire il peut y avoir des erreurs, mais dans l'ensemble. La deuxième les valeurs obtenues sont > 0,8 cela indiquent un accord très bon c'est-à-dire que la classification a une très bonne précision.

D'où les résultats trouvés liés d'une part à l'évolution du couvert végétal des écosystèmes forestiers, au dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des superficies des zones minières et d'autres part sur les indices de végétation de Territoire de Watsa sont fiable.

3.3. Dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des superficies d'exploitation minière dans la zone d'étude

La dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des zones minières est obtenue grâce à la méthode géo-spatiale (Images Lands).

3.3.1. Dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des superficies d'exploitation minière du Territoire de Dungu allant de 2014 à 2024 :

La situation de la dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des superficies des zones d'exploitation minière du Territoire de Dungu allant de 2014 à 2024 est présentée dans la figure 6.

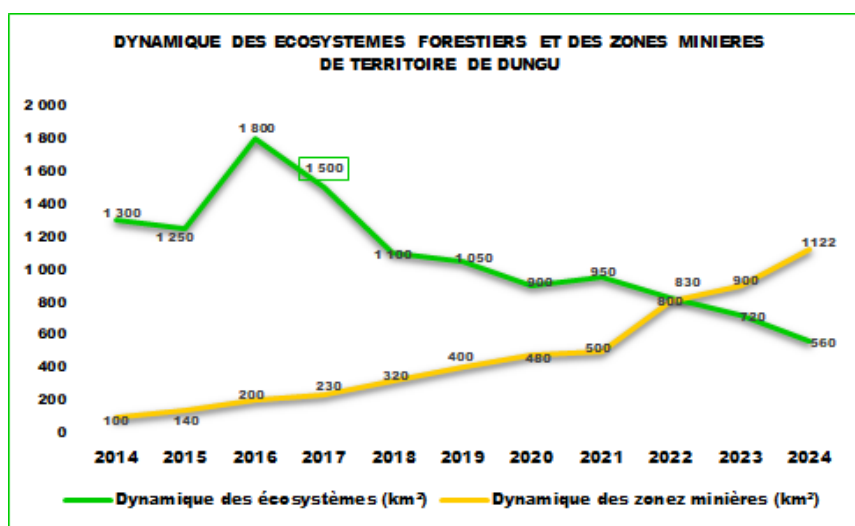


Figure 6 : situation de la dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle superficies des zones d'exploitation minière du Territoire de Dungu allant de 2014 à 2024.

De l'analyse de la figure 6, il s'observe deux tendances pour le couvert forestier : une légère augmentation des superficies d'écosystèmes forestiers entre 2014 et 2016 où la superficie d'écosystèmes forestiers a atteint le pic de son amélioration avec **1800Km²**. Et une réduction progressive et sensible de la superficie forestière entre 2016 à 2024 jusqu'à atteindre **560Km²**. Ce qui représente une perte végétale de l'ordre de **1240 Km² (soit 69%)**. Contrairement à l'évolution des superficies des écosystèmes forestiers, les zones minières présentent une croissance significative de ses superficies mais avec deux situations dont une croissance normale qui s'observe entre 2014 à 2021 et une croissance exponentielle de **622Km²** entre 2021 à 2024.

Cette croissance exponentielle des zones minières observée après 2018, année de promulgation et entrée en vigueur du nouveau Code Minier, a principalement contribué à la perte très significative du couvert végétal des écosystèmes du Territoire de Dungu au profit des zones minières et autres, ce qui témoigne que l'exploitation minière par les coopératives et leurs partenaires constitue l'un des facteurs majeurs de la déforestation des vastes étendues et dégradation des écosystèmes forestiers.

3.3.2. Dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des superficies des zones d'exploitation minière du Territoire de Faradje allant de 2014 à 2024 :

La situation de la dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des superficies des zones d'exploitation minière du Territoire de Faradje allant de 2014 à 2024 est présentée dans la figure 7 ci-dessous.

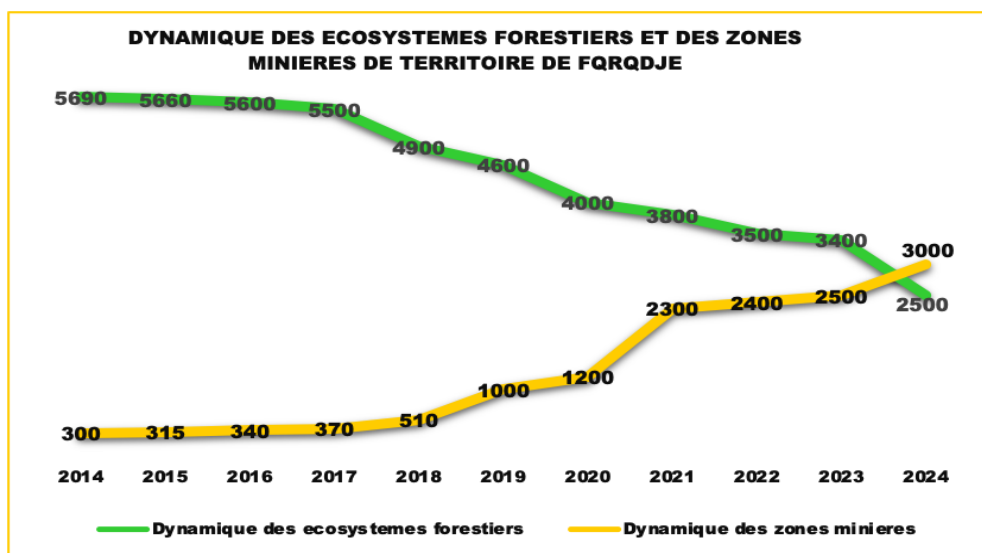


Figure 7 : dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des superficies des zones d'exploitation minière du Territoire de Faradje allant de 2014 à 2024.

L'analyse de la figure 7 présente clairement deux tendances dont la régression et l'accroissement. Les écosystèmes forestiers du Territoire de Faradje présente une importante régression de **3 190km²** équivalent à 56,06% pour la période de 2014 à 2024 avec trois années critiques dont 2024, 2020 et 2018. Par contre, pour les zones minières, il s'observe un accroissement significatif de **2 700km²**, entre 2014 à 2024, c'est qui vaut 9 fois la situation de l'année initiale 2014.

L'analyse comparative de la dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des zones d'exploitation minière, atteste que les activités minières impactent significativement sur la régression des écosystèmes forestiers du Territoire de Faradje et partant leur dégradation.

3.3.3. Dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des superficies des zones d'exploitation minière du Territoire de Wamba allant de 2014 à 2024 :

La situation de la dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des superficies des zones d'exploitation minière du Territoire de Wamba au cours de la période allant de 2014 à 2024 est présentée dans la figure 8.

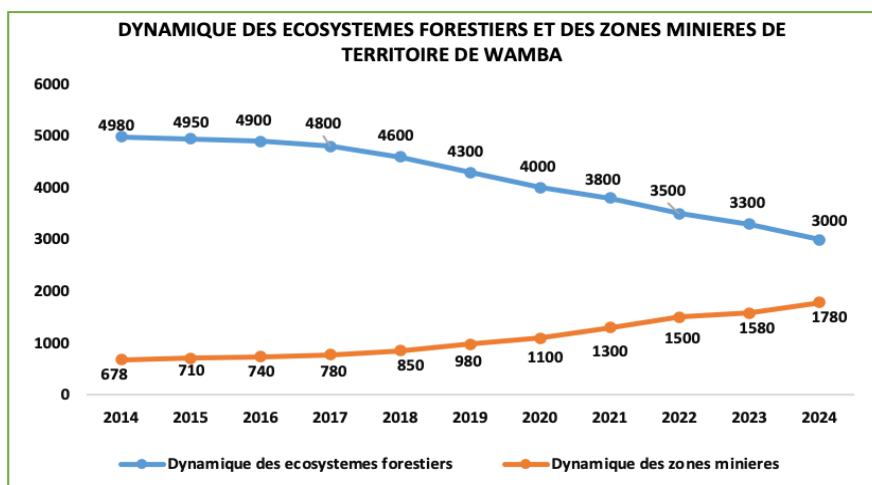


Figure 8 : dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des superficies des zones d'exploitation minière du Territoire de Wamba.

L'analyse de la figure 8 montre deux tendances dont la régression et l'accroissement. Les écosystèmes forestiers du Territoire de Wamba présente une réduction de **1 980km²** équivaut à 40% pour la période de 2014 à 2024. Par contre, pour les zones minières, il s'observe un accroissement significatif de **1 102km²**, entre 2014 à 2024, c'est qui vaut presque 2 fois la situation de l'année initiale 2014.

L'analyse comparative de la dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des zones d'exploitation minière, atteste que les activités minières participent significativement à la déforestation des vastes étendues des écosystèmes forestiers du Territoire de Wamba.

3.3.4. Dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des superficies des zones d'exploitation minière du Territoire de Watsa allant de 2014 à 2024 :

La situation de la dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des superficies des zones d'exploitation minière du Territoire de Watsa au cours de la période allant de 2014 à 2024 est présentée dans la figure 9.

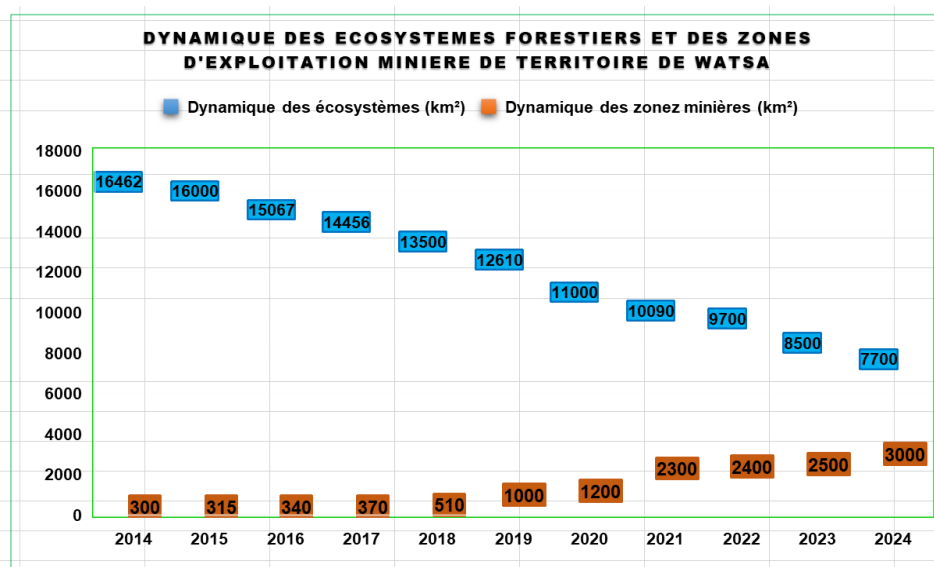


Figure 9 : Dynamique des superficies des écosystèmes forestiers et celle des superficies des zones d'exploitation minière du Territoire de Watsa.

Il ressort de l'analyse de la figure 9 que deux tendances contraires sont observées. D'une part la régression des écosystèmes forestiers et d'autre part l'accroissement des zones d'exploitation minière. C'est qui atteste que l'exploitation minière en Territoire de Watsa est l'un des principaux moteurs de déforestation et dégradation des écosystèmes forestiers.

IV. DISCUSSION

De l'analyse comparative et croisée des différentes images Landsats des Territoires de Dungu, Faradje, Wamba et Watsa, il s'observe clairement que l'évolution du couvert végétal n'est pas statique plutôt dynamique tendant vers la réduction au fil du temps des étendues du couvert végétal des écosystèmes forestiers, accompagnée ipso-facto par leur dégradation, au profit des zones d'exploitation minière et autres.

Il sied à noter que les indices de végétation telles qu'obtenues dans le cadre de cette étude confirme la thèse selon laquelle le couvert végétal des écosystèmes forestiers de la zone d'étude diminue au fil du temps suite à l'exploitation minière.

Ces résultats vont de paires à ceux trouvés par : premièrement, Bemy., (2008) dans son article sur la « dégradation des sols et résilience écologique en zones minières » pour lui les risques de dégradation de l'environnement, notamment ceux liés à la perte des écosystèmes forestiers sont croissants du fait de l'intensité élevée de l'orpaillage dans certaines régions de l'Afrique. Deuxièmement, Maradan *et al.*, (2011) dans leur publication sur « l'impacts de l'orpaillage sur les écosystèmes au Burkina Faso » pour eux, l'exploitation artisanale de l'or s'accompagne en général d'ouverture de tranchées, de puits, du grattage et du retournement des sols, avec pour corolaire : la fragilisation des sols, la destruction progressive des terres arables, la réduction et détérioration progressive des écosystèmes forestiers. Et troisièmement, Edwards *et al.*, (2014) dans leur article sur « Nature Climate Change » pour eux les dynamiques du couvert forestiers reflètent des pressions anthropiques croissantes ou non, typiques des régions riches en ressources naturelles mais fragiles sur le plan écologique.

Les valeurs moyennes d'indice différentielle normalisée autrement dit indice de santé végétale (NDVI) régressent au fil du temps qu'il s'observe l'intensification de l'exploitation minière dans la zone d'étude. Pour le Territoire de Dungu ces valeurs baissent de 0,75 pour 2014 à 0,35 en 2024 ; pour le Territoire de Faradje elles passent de 0,85 en 2014 à 0,35 en 2024 ; pour le Territoire de Wamba elles régressent de 0,80 pour 2014 à 0,34 en 2024 et pour le Territoire de Watsa de 0,82 à 0,36 pour les mêmes périodes. Pour les quatre Territoire les valeurs moyennes de NDI régressent significativement avec une coïncidence globale de période critique entre 2018 à 2024 où les valeurs tendent vers 0. C'est qui suggère à une réduction intense du couvert végétal des écosystèmes laissant des terrains nus et avec de la végétation clairsemée suite à l'exploitation minière.

Pour l'indice de surface foliaire (LAI), les valeurs moyennes régressent autant au fil du temps qu'il exerce l'exploitation minière dans la zone d'étude. En Territoire de Dungu elles décroissent de 4,5 pour 2014 à 2,10 en 2024, en Territoire de Faradje elles passent de 5,5 pour 2014 à 0,60 en 2024, le Territoire de Wamba 4,8 en 2014 à 1,4 pour 2024 et pour le Territoire de Watsa de 5,2 en 2014 à 0,7 en 2024. Les valeurs minimales varient d'une part, entre 1 et 3 c'est qui suggère une zone légèrement boisée et d'autre part, 0 et 1 c'est qui indique peu ou pas des végétations donc une réduction drastique de la biomasse et de la capacité de stockage du carbone dans les écosystèmes forestiers de la zone d'étude.

La chute progressive de valeurs moyennes d'EVI (indice de végétation amélioré) est aussi observée dans tous les Territoires étudiés entre 2014 à 2024, avec une période critique entre 2018 à 2024 où les valeurs régressent allant proches de 0. C'est qui indique des terres nues ou de la végétation clairsemée.

Les valeurs moyennes de NDWI (indice de stress hydrique) sont passées de 0,30 à 0,09 pour le Territoire de Dungu, de 0,40 à 0,04 pour le Territoire de Faradje, de 0,50 à 0,10 pour le Territoire de Wamba et de 0,38 à 0,05 pour le Territoire de Watsa. Ces résultats révèlent un assèchement des sols aggravé par le drainage des nappes phréatiques et l'imperméabilisation.

Les valeurs moyennes des différentes indices de végétation des Territoires de Dungu, Faradje, Wamba et Watsa telles qu'obtenues dans le cadre de ces recherches sont en régression au fil du temps qu'il s'observe l'intensification de l'exploitation minière dans la zone d'étude, cela se témoigne par une réduction prononcée à partir de 2018 à 2024 où les valeurs décroissent vers 0, cela témoigne la perte significative de végétation et la dégradation des écosystèmes forestiers.

Ces valeurs moyennes trouvées de NDVI et LAI, sont inférieures aux seuils critiques définis par Huete *et al.* (2002) dans leur publication sur « Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices », et par Jonckheere *et al.* (2004), dans « Review of methods for in situ leaf area index determination. Agricultural and Forest Meteorology », par conséquent elles reflètent les types d'écosystèmes forestiers en état de stress avancé suite aux activités anthropiques dans la zone.

Les résultats de EVI et NDWI coïncide à ceux trouvés par Justice *et al.*, (1998), dans son article « The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) : Land remote sensing for global change research. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing » pour eux de tels résultats ayant une décroissance progressive au fil du temps des valeur proche de 0 sont typique des zones minières indiquent une dominance de surfaces artificialisées, où la poussière et l'érosion altèrent la réflectance spectrale. Et par Asner *et T.*, (2017) dans son article sur « Accelerated losses of protected forests from gold mining in the Peruvian Amazon. Environmental Research Letters » pour eux aussi ces résultats avec des valeurs qui baissent en fonction d'une activité anthropique jusqu'aux valeurs proche de 0, indique

L'analyse des figure 6, 7, 8 et 9, il s'observe globalement deux tendances dont la régression et l'accroissement. Les écosystèmes forestiers de la zone d'étude présentent une importante réduction de leurs superficies au profit de zone d'exploitation aurifère qui présentent en son tours un accroissement très significatif de ses superficies.

Cela s'explique par le fait que les écosystèmes forestiers de Territoire de Dungu ont subis une réduction d'environ 3 190km² équivalent à 56,06% de sa situation de départ pour la période de 2014 à 2024 avec trois années critiques dont 2024, 2020 et 2018. Par contre, pour les zones minières, a subis un accroissement significatif de 2 700km², entre 2014 à 2024, c'est qui vaut 9 fois la situation de l'année initiale 2014.

Le Territoire de Faradje quant à lui présente une perte végétale de l'ordre de 1240 Km² (soit 69%) de superficies de ses écosystèmes forestiers pour la même période. Avec une croissance exponentielle de 622Km² entre 2021 à 2024 pour les zones minières.

Quant au Territoire de Wamba, il s'observe une réduction de 1 980km² équivalent à 40% pour la période de 2014 à 2024 et un accroissement significatif de 1 102km², pour la même période, c'est qui vaut presque 2 fois la situation de l'année initiale 2014. La même situation se présente pour le Territoire de Watsa.

Ces résultats vont dans le même sens que ceux trouvés par Godie et *al.*, (2018) dans sa publication sur « Human impact on the natural environment » pour eux la dynamique des écosystèmes varie dans le sens inverse des affectations de sol constituant une activité anthropique source d'impact.

V. CONCLUSION

L'évaluation des impacts de l'exploitation aurifère sur les écosystèmes forestiers du Haut – Uélé s'intègre dans un cadre global de développement durable. La présente étude révéler que l'évolution du couvert végétal n'est pas statique plutôt dynamique tendant vers la réduction au fil du temps des étendues du couvert végétal des écosystèmes forestiers, accompagnée ipso-facto par leur dégradation, au profit des zones d'exploitation minière et autres. Elle indique également que les indices de végétations (NDVI, EVI, LAE et NDWI) dans les quatre Territoires régressent significativement au fil du temps qu'il s'intensifie l'exploitation minière dans la zone d'étude, cela se témoigne par une réduction prononcée des valeurs obtenues à partir de 2018 jusqu'à 2024. Par ailleurs, les écosystèmes forestiers de la zone d'étude présentent une importante réduction de leurs superficies au profit des zones d'exploitation aurifère qui en leur tours présentent un accroissement très significatif de ses superficies.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. Amrouni, Y., 2022. Dynamique de l'occupation du sol par télédétection de la zone de transition des deux Atlas tellien et saharien dans la wilaya de Tiaret (Algérie). (PhD Thesis). Université Ibn Khaldoun-Tiaret-.
- [2]. Bourgoïn, C., 2019. A framework for evaluating forest ecological vulnerability in tropical deforestation fronts from the assessment of forest degradation in a landscape approach: Case studies from Brazil and Vietnam (PhD Thesis). Institut agronomique, vétérinaire et forestier de France.
- [3]. Bryman, A., 2016. Social research methods. Oxford university press.
- [4]. Coppin, P.R., Bauer, M.E., 1996. Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. *Remote Sensing Reviews* 13, 207–234. <https://doi.org/10.1080/02757259609532305>
- [5]. Green, K., Kempka, D., Lackey, L., 1994. Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 60, 331–337.
- [6]. Hadley, W., Garrett, G., 2016. R for data science: import, tidy, transform, visualize, and model data. O'Reilly Media, Inc.
- [7]. Hasan, A., 2019. Évaluation de la dégradation des forêts primaires par télédétection dans un espace de front pionnier consolidé d'Amazonie orientale (Paragominas) (PhD Thesis). Le Mans Université.
- [8]. Mogalakwe, M., 2006. The use of documentary research methods in social research. *African Sociological Review* 10, 221–230.
- [9]. MOLINIER[^]1, M., MIETTINEN[^]1, J., IENCO, D., Shi, Q.I.U., Zhe, Z.H.U., 2024. Analyse de séries chronologiques d'images satellitaires optiques pour des applications environnementales. Détection de changements et analyse des séries temporelles d'images 2: Méthodes supervisées 125.
- [10]. Ngadi Scarpetta, Y., 2024. From land cover to land use systems mapping: Detection and characterization of large scale agricultural investments (LsAIs) from satellite imagery. Application to Senegal (PhD Thesis). Université de Montpellier.
- [11]. Rossi, V., 2014. GuyaSim 2011-2014 : un simulateur pour explorer l'impact des scénarios de développement de la Guyane sur les services des écosystèmes forestiers. Rapport final.
- [12]. Tabopda, G.W., Fotsing, J.-M., 2010a. Vegetation cover change in the Laf-Madjam forest reserve of northern Cameroon: Quantification using remote sensing. *Science et changements planétaires/Sécheresse* 21, 169–178.
- [13]. Tabopda, G.W., Fotsing, J.-M., 2010b. Quantification de l'évolution du couvert végétal dans la réserve forestière de Laf-Madjam au nord du Cameroun par télédétection satellitale. *Science et changements planétaires/Sécheresse* 21, 169–178.