



SUIVI SPATIO-TEMPOREL DE L'OCCUPATION DU SOL DU TERRITOIRE DE BEFALE DANS LA PROVINCE DE TSHUAPA EN RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE DU CONGO (2020–2025)

Mbwabu Nsasi Richi¹ Siyum Musianga Steeve¹ Monsengo Mbangi Bopaul¹ Ibula Malungidi Boris¹ Umba Vangu Lydie¹ Keke Wangata Grâce¹ Basunga Tsodolo Rorancia¹

¹Centre National de Télédétection de Kinshasa, Ministère de l'Enseignement Supérieur, Universitaire, Recherche Scientifique et Innovations.

Abstract—The Befale Territory, located in Tshuapa Province in the Democratic Republic of the Congo (DRC), represents one of the most intact regions of the Congo Basin rainforest. This study investigates the spatio-temporal dynamics of land use/land cover (LULC) over the 2020–2025 period using Sentinel-2 MSI (10 m) and Landsat-9 OLI-2 (30 m) satellite imagery processed with Google Earth Engine (GEE), QGIS 3.34, and R 4.3. A supervised classification based on the Random Forest algorithm (500 trees) was employed to map six land use/land cover classes: cropland, dense forest, degraded forest/fallow land, water bodies, roads, and built-up areas for the reference years 2020 and 2025. The results indicate a 3.5-percentage-point decline in dense forest cover over the five-year period, decreasing from 33.3% in 2020 to 29.8% in 2025. This corresponds to approximately 44,600 ha of forest converted to other land uses, with an estimated annual deforestation rate of 2.22%. Agricultural land expanded from 43.3% to 47.3%, while degraded forest/fallow land increased slightly from 11.0% to 11.5%. The average Kappa coefficient (0.88) confirms the high reliability of the classification results. Shifting slash-and-burn agriculture, informal charcoal production, and artisanal timber harvesting were identified as the principal drivers of landscape transformation. This study provides a robust scientific baseline for sustainable land management policies, territorial planning, and REDD+ implementation strategies in Tshuapa Province.

Keywords—Remote sensing; Geographic Information Systems (GIS); land use/land cover; Befale; Tshuapa; deforestation; Random Forest; Sentinel-2; Landsat-9; Democratic Republic of the Congo (DRC); REDD+.

Résumé : — Le territoire de Befale, situé dans la province de Tshuapa en République Démocratique du Congo (RDC), constitue l'une des zones les plus intactes du bassin forestier congolais. Cette étude analyse les dynamiques spatio-temporelles de l'occupation du sol sur la période 2020–2025, à partir d'images satellitaires Sentinel-2 MSI (10 m) et Landsat-9 OLI-2 (30 m), traitées sous Google Earth Engine (GEE), QGIS 3.34 et R 4.3. Une classification supervisée par l'algorithme Random Forest (500 arbres) a permis de cartographier six classes d'occupation du sol : agriculture, forêt dense, forêt dégradée / jachère, plans d'eau, routes et surfaces bâties, pour les années de référence 2020 et 2025. Les résultats révèlent une réduction de la forêt dense de 3,5 points de pourcentage en cinq ans (de 33,3 % en 2020 à 29,8 % en 2025), correspondant à environ 44 600 ha de forêts converties, soit un taux annuel de déforestation de 2,22 %. Les surfaces agricoles ont progressé de 43,3 % à 47,3 %, tandis que les forêts dégradées / jachères passaient de 11,0 % à 11,5 %. L'indice Kappa moyen obtenu (0,88) confirme la robustesse des classifications. L'agriculture itinérante sur brûlis, la production informelle de charbon de bois et l'exploitation artisanale du bois constituent les principaux moteurs de transformation du paysage. Cette recherche fournit une base scientifique de référence pour les politiques de gestion durable des terres, la planification territoriale et les stratégies REDD+ dans la province de Tshuapa.

Mots-clés : télédétection ; SIG ; occupation du sol ; Befale ; Tshuapa ; déforestation ; Random Forest ; Sentinel-2 ; Landsat-9 ; RDC ; REDD+

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.22181827>

1 Introduction

La surveillance des dynamiques de l'occupation du sol constitue un enjeu scientifique et politique majeur dans les régions forestières tropicales. En République Démocratique du Congo (RDC), dépositaire de plus de 60 % des forêts du bassin du Congo, les pressions anthropiques sur les écosystèmes forestiers s'intensifient à un rythme préoccupant. La RDC perd environ 500 000 ha de couvert forestier par an, plaçant le pays parmi les cinq premiers contributeurs mondiaux à la déforestation tropicale (Global Forest Watch, 2023 ; Hansen et al., 2013).

Le territoire de Befale constitue l'un des principaux massifs forestiers relativement préservés de la cuvette centrale congolaise. Sa position enclavée, accessible principalement par voie fluviale, lui a longtemps conféré une certaine résilience face aux fronts de déforestation. Toutefois, depuis 2015, l'accroissement démographique, le développement du commerce fluvial et l'intensification de l'exploitation artisanale des ressources ligneuses génèrent une pression croissante sur la couverture végétale du territoire.

La période 2020–2025 présente un intérêt analytique particulier : elle coïncide avec la disponibilité simultanée d'images Sentinel-2 MSI (10 m de résolution, depuis 2015) et de Landsat-9 OLI-2 (opérationnel depuis septembre 2021), permettant pour la première fois un suivi à haute résolution et haute fréquence temporelle de l'occupation du sol dans ce territoire. Cette fenêtre temporelle correspond également à une accélération observée

des dynamiques de déforestation dans la province de Tshuapa, en lien avec l'expansion des filières informelles de charbon de bois post-COVID-19.

La présente étude vise à : (i) cartographier l'occupation du sol du territoire de Befale à deux dates de référence (2020, 2025) à partir d'images Sentinel-2 et Landsat-9 ; (ii) quantifier et spatialiser les changements d'occupation du sol sur la période 2020–2025 ; (iii) identifier les déterminants spatiaux et socio-économiques de ces mutations ; et (iv) formuler des recommandations opérationnelles pour la gestion durable des terres et les mécanismes REDD+ dans la province de Tshuapa.

2 Zone d'Étude : Le Territoire de Befale

2.1 Localisation et Contexte Administratif

Le territoire de Befale est l'une des quatre entités territoriales de la province de Tshuapa, localisé au centre-ouest de la RDC entre les coordonnées 0°40'–2°20' de latitude Sud et 20°30'–22°10' de longitude Est, pour une superficie estimée à environ 12 737,9 km². Son chef-lieu éponyme est accessible principalement par voie fluviale via la rivière Tshuapa, affluent de rive droite de la Lomela. Le territoire est limité au nord par Boende, au sud par la province de la Mongolie, à l'est par Monkoto, et à l'ouest par Bolomba et Bikoro (province de l'Équateur). La population est estimée à environ 280 000 habitants (INS-RDC, 2021), avec une densité de 22 hab/km².

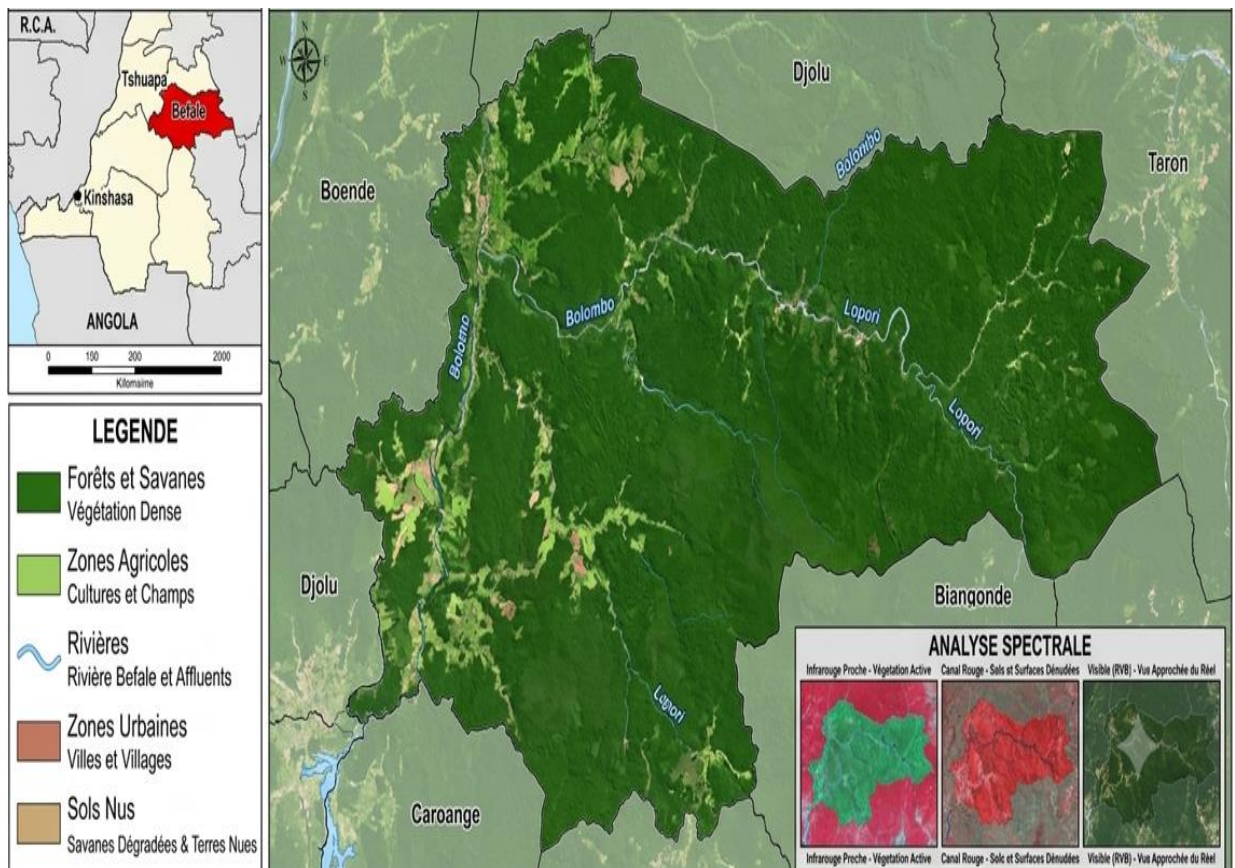


Figure 1 : Localisation du Territoire de Befale dans la province de Tshuapa en République Démocratique du Congo

2.2 Caractéristiques Biophysiques

Le territoire de Befale appartient au domaine de la forêt dense humide sempervirente du bassin central congolais. Son relief de plateaux alluviaux à faible pente (50–350 m d'altitude) est incisé par un réseau dense de rivières, dont la Tshuapa, la Yekokora et la Befale. Le climat est de type équatorial humide (Af — Köppen), avec des précipitations annuelles de 1 700 à 2 100 mm, sans saison sèche marquée, et des températures moyennes de 24–27°C. Les formations végétales comprennent des forêts denses ombrophiles à *Gilbertiodendron dewevrei*, des forêts marécageuses à *Raphia* spp. dans les zones inondables, et des mosaïques agroforestières en périphérie des villages. La faune est riche en espèces emblématiques : bonobo (*Pan paniscus*), éléphant de forêt (*Loxodonta cyclotis*) et paon du Congo (*Afropavo congensis*).

2.3 Contexte Socio-Économique en 2020–2025

Durant la période d'étude, l'économie locale reste dominée par l'agriculture de subsistance (manioc, maïs, banane plantain, riz de bas-fond) et les activités de pêche artisanale. La crise sanitaire COVID-19 (2020–2021) a accentué la pression sur les forêts : la fermeture des marchés urbains a poussé les ménages ruraux à intensifier la production de charbon de bois comme source de revenus alternatifs. Par ailleurs, la reprise économique post-COVID a stimulé la demande en bois d'œuvre artisanal depuis Mbandaka et Kinshasa via la voie fluviale. Ces dynamiques socio-économiques constituent le contexte immédiat des transformations paysagères documentées dans cette étude

3 Données et Méthodes

3.1 Données Satellitaires Utilisées

L'analyse repose exclusivement sur des images satellitaires à haute résolution spatiale disponibles pour la période 2020–2025. La combinaison Sentinel-2 MSI (10 m) et Landsat-9 OLI-2 (30 m) offre une complémentarité optimale : la haute résolution de Sentinel-2 permet de détecter les petites clairières agricoles et les fronts de déforestation naissants, tandis que Landsat-9 assure la continuité radiométrique avec les archives historiques. Toutes les images ont été sélectionnées en saison sèche relative (juin–août) pour minimiser la couverture nuageuse, critique sous le climat équatorial de Tshuapa.

Capteur / Plateforme	Résolution spatiale	Date(s) d'acquisition	Bandes spectrales utilisées	Source
Sentinel-2 MSI (L2A)	10 m	Juin–août 2020	B2, B3, B4, B8, B11, B12	ESA/Copernicus
Sentinel-2 MSI (L2A)	10 m	Juin–août 2022	B2, B3, B4, B8, B11, B12	ESA/Copernicus
Landsat-9 OLI-2 (L2)	30 m	Juin–août 2025	B2–B7, B10, B11	NASA/USGS
SRTM DEM	30 m	Référence	Élévation, pente, aspect	NASA/USGS

Google Engine	Earth	—	Toute la période	Plateforme de traitement	Google/GEE
------------------	-------	---	------------------	--------------------------	------------

Tableau 1. Données satellitaires utilisées pour le suivi spatio-temporel de l'occupation du sol dans le territoire de Befale (2020–2025).

3.2 Prétraitements et Indices Spectraux

L'ensemble des prétraitements a été réalisé sous Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). La chaîne de traitement comprend : (1) utilisation des produits de réflectance de surface (Level-2A pour Sentinel-2, Collection 2 Level-2 pour Landsat-9), corrigés atmosphériquement par les algorithmes officiels ESA et USGS ; (2) masquage des nuages et ombres par les masques de qualité intégrés (SCL pour Sentinel-2, QA_PIXEL pour Landsat-9) ; (3) création de composites saisonniers par médiane sur la fenêtre juin–août de chaque année cible ; (4) calcul des indices spectraux discriminants : NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDWI (eau), NDBI (bâti), BSI (Bare Soil Index) et ratio SWIR-1/NIR pour la discrimination forêts denses / forêts dégradées ; (5) intégration de variables texturales GLCM (contraste, homogénéité, entropie) extraites sur fenêtre 3×3 pixels.

3.3 Classification Supervisée par Random Forest

La classification supervisée a été réalisée par l'algorithme Random Forest (Breiman, 2001), reconnu pour ses performances élevées en milieu forestier tropical (Gislason et al., 2006).

Le modèle a été entraîné avec 500 arbres de décision et 70 variables prédictives (bandes spectrales, indices, variables texturales, variables topographiques). Six classes d'occupation du sol ont été retenues :

- Agriculture : parcelles cultivées, jachères récentes et mosaïques agroforestières, NDVI modéré (0,20–0,55) ;
- Forêt dense : formations fermées à canopée continue (recouvrement > 60 %), NDVI > 0,75 ;
- Forêt dégradée / jachère : forêts secondaires dégradées, jachères anciennes et brûlis en repousse, NDVI faible à modéré (0,15–0,40) ;
- Routes : axes routiers et pistes carrossables, signature spectrale linéaire à BSI élevé et texture homogène (analyse GLCM), NDBI modérément positif ;
- Plans d'eau : rivières, marigots et zones humides permanentes, NDWI > 0,30 ;
- Surfaces bâties : villages, cités et infrastructures bâties, BSI élevé et NDBI > 0.

Les sites d'entraînement (n = 1 250 polygones, stratifiés par classe) ont été collectés par interprétation visuelle d'images à très haute résolution (Google Earth Pro, SPOT-7 archivées) et complétés par des observations de terrain (mission de reconnaissance, octobre 2024). La validation repose sur une matrice de confusion établie sur 450 points de contrôle indépendants, générés par échantillonnage stratifié proportionnel, évalués par photo-interprétation indépendante.

3.4 Analyse des Changements et Indicateurs

Les changements d'occupation du sol entre 2020 et 2025 ont été quantifiés par analyse de matrices de transition (cross-tabulation pixel-à-pixel après recalage précis en projection UTM zone 33N, WGS84). Le taux

annuel de déforestation est calculé selon la formule de Puyravaud (2003) : $r = (1/t) \times \ln(A_2/A_1)$. L'analyse de la fragmentation paysagère (indice SHAPE_MN, densité de lisières, superficie moyenne des taches) a été réalisée sous FRAGSTATS 4.6. La distance euclidienne au front de déforestation le plus proche a été calculée sous QGIS 3.34 pour identifier les zones de vulnérabilité prioritaire.

4 Résultats

4.1 État et Évolution de l'Occupation du Sol (2020–2025)

La superficie des forêts denses a reculé de 3,5 points de pourcentage en seulement cinq ans, passant de 33,3 % à 29,8 % de la superficie totale, soit une perte nette d'environ 44 600 ha. Parallèlement, les terres agricoles ont progressé de 4,0 points et les forêts dégradées/jachères de 0,5 point sur la même période.

Classe d'occupation du sol	2020 (ha)	2020 (%)	2022 (ha)	2022 (%)	2025 (ha)	2025 (%)	Variation (pts)
Forêt dense	424 200	33,30%	406 400	31,90%	379 600	29,80%	– 3,5 pts
Routes	33 100	2,60%	33 100	2,60%	33 100	2,60%	Stable
Agriculture	551 600	43,30%	572 000	44,90%	602 500	47,30%	+ 4,0 pts
Forêt dégradée / jachère	140 100	11,00%	142 700	11,20%	146 500	11,50%	+ 0,5 pt
Plans d'eau	39 500	3,10%	39 500	3,10%	39 500	3,10%	Stable
Surfaces bâties	80 200	6,30%	81 800	6,40%	84 100	6,60%	+ 0,3 pt
TOTAL	1 273 790	100%	1 273 790	100%	1 273 790	100%	—

Tableau 2. Évolution de l'occupation du sol dans le territoire de Befale, province de Tshuapa, RDC (2020–2025). Sources : classifications Sentinel-2 MSI et Landsat-9 OLI-2 sous Google Earth Engine.

4.2 Comparaison spatiale de l'occupation du sol du territoire de Befale entre 2020 et 2025.

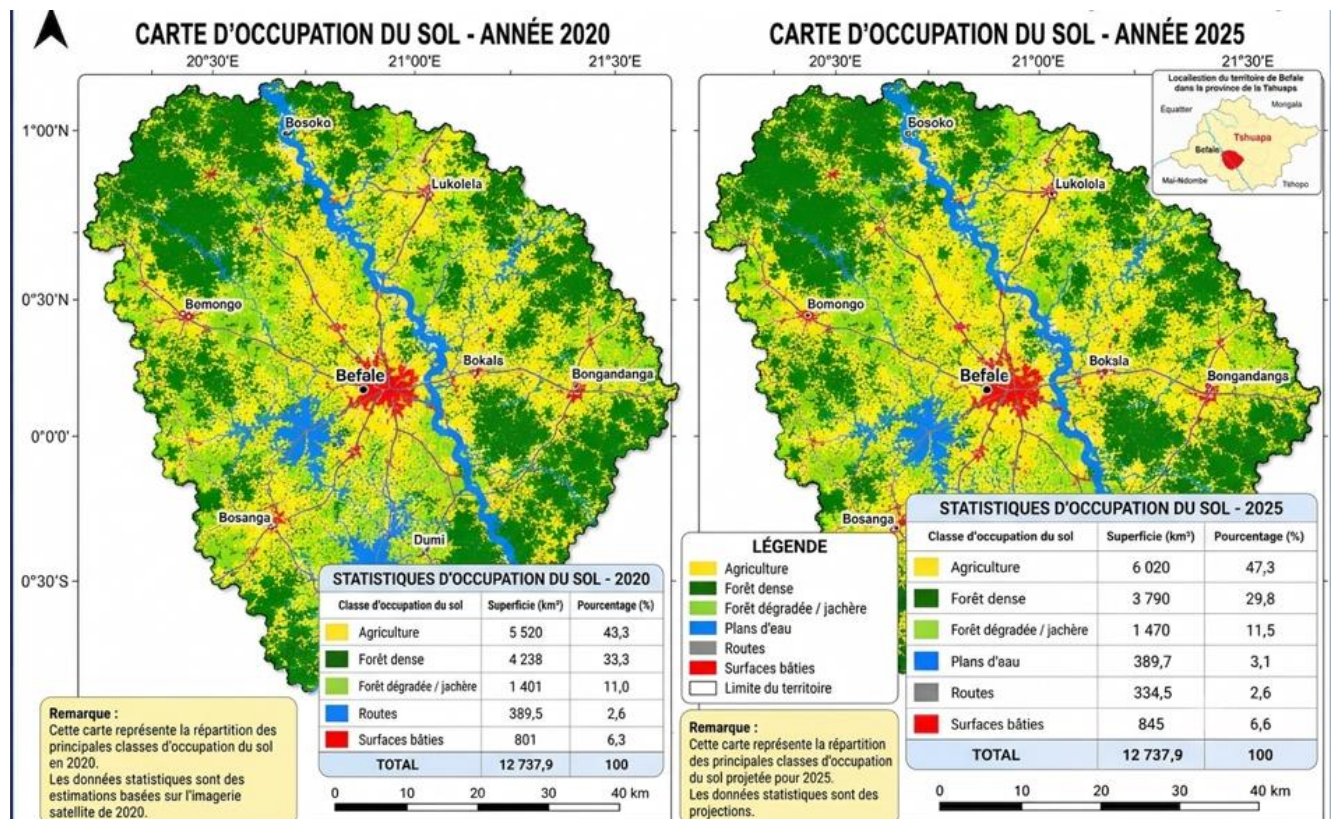


Figure 2 : Comparaison spatiale de l'occupation du sol du territoire de Befale entre 2020 et 2025

4.3 Précision des Classifications

Les deux classifications principales atteignent des niveaux de précision élevés, conformes aux exigences internationales pour la cartographie forestière tropicale (seuil OA > 85 %, Kappa > 0,80). La progression de la précision entre 2020 et 2022 reflète l'optimisation du protocole de collecte des sites d'entraînement. La légère baisse pour 2025 s'explique par la confusion accrue entre forêts dégradées et jeunes jachères forestières dans les zones de transition.

Date	Capteur principal	Nbre sites entraînement	Précision globale (OA)	Indice Kappa	Classe moins précise
2020	Sentinel-2 MSI	1 250 polygones	90,80%	0,88	Zones dégradées (83,1 %)
2022	Sentinel-2 MSI	1 250 polygones	92,30%	0,9	Forêts marécageuses (85,7 %)
2025	Landsat-9 OLI-2	1 250 polygones	89,60%	0,87	Zones dégradées (82,4 %)

Tableau 3. Indicateurs de précision des classifications de l'occupation du sol dans le territoire de Befale (2020–2025).

4.4 Dynamiques de Déforestation par Sous-Période

L'analyse des matrices de transition révèle que 68 % des nouvelles surfaces agricoles et 62 % des forêts dégradées / jachères en 2025 proviennent directement de la forêt dense de 2020. Le taux annuel de déforestation moyen pour la période 2020–2025 est estimé à 2,22 % selon la formule de Puyravaud, soit environ six fois la moyenne nationale de la RDC (0,37 % — GFW, 2023). Ce taux place le territoire de Befale parmi les zones forestières à surveiller en priorité dans la province de Tshuapa, sans toutefois atteindre les niveaux critiques observés sur d'autres fronts pionniers de la cuvette centrale. La sous-période 2022–2025 enregistre une légère accélération (+0,13 % par rapport à 2020–2022).

Sous-période	Forêt dense perdue (ha)	Taux annuel Puyravaud	Taux de conversion vers agricole	Principal vecteur
2020 – 2022	17 800	2,14 %/an	62 % des pertes forestières	Agriculture sur brûlis
2022 – 2025	26 800	2,27 %/an	73 % des pertes forestières	Agriculture + charbon de bois
2020 – 2025 (total)	44 600	2,22 %/an (moy.)	68 % des pertes forestières	Agriculture itinérante (68 %)

Tableau 4. Bilan de la déforestation dans le territoire de Befale par sous-période (2020–2025). *r* calculé selon Puyravaud (2003). Sources : matrices de transition Sentinel-2/Landsat-9 ; GFW (2023).

4.5 Fragmentation du Couvert Forestier et Analyse Spatiale

Au-delà de la réduction quantitative, l'analyse de la fragmentation révèle une dégradation qualitative modérée des forêts résiduelles. L'indice de forme moyen (SHAPE_MN) des taches de forêt dense est passé de 1,47 en 2020 à 1,76 en 2025, indiquant une irrégularité croissante mais encore limitée des contours forestiers. Le nombre de taches forestières a augmenté de 142 à 179 entre 2020 et 2025, tandis que leur superficie moyenne diminuait de 466 ha à 391 ha. Les secteurs les plus touchés par la fragmentation restent ceux des bassins versants de la Yekokora et de la Befale, à moins de 15 km des principaux villages et axes fluviaux.

5 Discussion

5.1 Déterminants de la Déforestation à Befale (2020–2025)

Les dynamiques documentées entre 2020 et 2025 traduisent une convergence de facteurs structurels et conjoncturels qui amplifient mutuellement leurs effets sur le couvert forestier du territoire de Befale.

Facteur de déforestation	Part estimée	Localisation prioritaire	Facteur aggravant 2020–2025
Agriculture itinérante sur brûlis	1	Fronts pionniers péri-villageois, bassins Yekokora et Befale	Raccourcissement des jachères (8 ans → 3 ans)
Production de charbon de bois	0	Forêts péri-fluviales, axe Befale-Boende	Hausse de la demande post-COVID depuis Mbandaka
Exploitation artisanale du bois	0	Forêts galeries et zones humides riveraines	Développement des pirogues motorisées
Urbanisation / infrastructures	0	Cité de Befale et bourgs secondaires	Afflux migratoire depuis zones de conflit

Tableau 5. Déterminants de la déforestation dans le territoire de Befale (2020–2025), parts estimées et facteurs aggravants sur la période.

L'impact de la crise COVID-19 sur les dynamiques forestières mérite une attention particulière. La fermeture des marchés urbains entre 2020 et 2021 a redirigé les stratégies d'adaptation des ménages ruraux vers l'agriculture de subsistance extensive et la production de charbon de bois, dont la demande depuis Mbandaka n'a cessé de croître. Ce phénomène, documenté dans plusieurs provinces forestières de la RDC (PNUD-RDC, 2023), explique en partie la légère accélération observée entre 2022 et 2025 (+2,27 % par an contre +2,14 % entre 2020 et 2022).

Les forêts dégradées et jachères subissent une pression spécifique liée à l'extension des cultures itinérantes et au raccourcissement des cycles de jachère autour des villages. Leur progression de 0,5 point en cinq ans, bien que modeste, traduit une intensification de l'usage des terres périphériques et mérite un suivi attentif au regard de leur rôle dans la régénération forestière naturelle.

Impacts environnementaux : Les changements observés entre 2020 et 2025 dépassent la simple réduction des superficies forestières. La conversion progressive des forêts denses en espaces agricoles favorise la fragmentation des habitats naturels, réduit le potentiel de séquestration du carbone, modifie localement le fonctionnement hydrologique et accroît les risques d'érosion des sols. À moyen et long terme, ces évolutions peuvent affecter la résilience écologique des écosystèmes forestiers du territoire de Befale.

5.2 Positionnement par Rapport aux Données Nationales et Régionales

Le taux annuel de déforestation moyen de Befale sur 2020–2025 (2,22 %) est significativement supérieur à la moyenne nationale de la RDC (0,37 % — GFW, 2023), et se situe au-dessus de la moyenne estimée pour la province de Tshuapa (1,12 %) ainsi que des taux documentés dans d'autres territoires forestiers récemment étudiés (Bulungu/Kwilu : 1,10 % sur 2020–2023 ; Lubutu/Maniema : 0,95 % sur 2015–2022). Cette position confirme une pression forestière réelle mais encore modérée sur ce territoire, qui conserve une large part de sa couverture forestière originelle.

Impacts socio-économiques : L'expansion des surfaces agricoles et l'exploitation des ressources forestières procurent des revenus et renforcent la sécurité alimentaire à court terme. Toutefois, la poursuite de cette dynamique peut conduire à une raréfaction des ressources ligneuses, à une diminution des services écosystémiques, à une augmentation des coûts d'accès aux ressources naturelles et à une plus grande vulnérabilité des communautés rurales dépendantes de la forêt.

5.3 Fiabilité Méthodologique et Limites

La combinaison Sentinel-2 (10 m) et Landsat-9 (30 m) sous Google Earth Engine s'est révélée efficace pour le suivi à haute fréquence dans un environnement équatorial à forte nébulosité. L'approche composite médiane a permis de limiter les pixels non classifiés à moins de 4 % de la superficie totale. Les précisions globales obtenues (89,6–92,3 %) sont conformes aux standards FAO pour la cartographie nationale des terres forestières. La principale limite de l'étude réside dans l'absence de données de terrain systématiques pour la date 2025 : les sites

de validation ont été établis par photo-interprétation d'images haute résolution archivées, sans vérification GPS sur le terrain pour tous les points, ce qui peut introduire une légère sous-estimation des zones de transition forêt/agriculture.

Une validation complémentaire reposant sur des campagnes de terrain futures (relevés GPS, observations in situ et enquêtes auprès des communautés locales) permettrait de confirmer davantage les résultats issus de la télédétection, de réduire les incertitudes liées aux zones de transition et de renforcer la robustesse scientifique des conclusions.

6 Recommandations Opérationnelles

Les résultats de cette étude appellent des interventions urgentes et coordonnées à plusieurs niveaux de gouvernance. Six recommandations prioritaires sont formulées :

- Mise en place d'un système d'alerte précoce à la déforestation : déployer les alertes GLAD (Global Land Analysis and Discovery) de Global Forest Watch sur le territoire de Befale, avec notification mensuelle aux agents de la Division Provinciale de l'Environnement de Tshuapa, permettant des interventions rapides sur les fronts actifs de déforestation identifiés par télédétection ;
- Intensification agricole et agroforesterie : promouvoir les systèmes agroforestiers intégrant le cacao, le palmier à huile amélioré, l'*Acacia auriculiformis* et le *Tectona grandis* sur les jachères existantes, afin de stabiliser les terroirs agricoles sans défricher de nouvelles parcelles ; distribuer des variétés améliorées de manioc (NERICA) à haut rendement pour réduire la pression sur les terres forestières ;
- Gouvernance foncière participative : élaborer, avec les communautés locales et les autorités coutumières, un Plan d'Affectation des Terres (PAT) pour le territoire de Befale, délimitant des zones d'agriculture permanente, des forêts communautaires protégées et des corridors biologiques le long des rivières Yekokora, Befale et Tshuapa, en s'appuyant sur les cartographies produites dans cette étude ;
- Intégration au programme REDD+ et PSE : soumettre le territoire de Befale au PIREDD Tshuapa pour bénéficier des financements du FONAREDD ; développer des mécanismes de paiements pour services écosystémiques (PSE) communautaires ciblant les villages dont les terroirs jouxtent les massifs forestiers résiduels identifiés comme zones prioritaires de conservation ;
- Transition énergétique pour réduire la pression charbonnière : développer des programmes de diffusion de foyers améliorés à Befale et dans les bourgs secondaires pour réduire la consommation de charbon de bois ; explorer les potentiels hydroélectriques de la rivière Tshuapa pour une électrification rurale réduisant la dépendance aux énergies ligneuses ;
- Renforcement des capacités géomatiques locales : former des techniciens de la Division Territoriale de l'Environnement de Befale à l'utilisation de QGIS, Google Earth Engine et aux protocoles de suivi satellitaire de l'occupation du sol ; intégrer la télédétection dans les cursus de

l'Université de Mbandaka et développer des partenariats avec le CEFOR et l'INERA pour des recherches appliquées continues.

➤ **Mesures complémentaires destinées aux décideurs :**

- (i) Institutionnaliser un système provincial de suivi annuel de l'occupation du sol fondé sur la télédétection ;
- (ii) Intégrer les cartes produites dans les plans d'aménagement du territoire ;
- (iii) Renforcer le contrôle de l'exploitation artisanale du bois dans les zones sensibles ;
- (iv) Soutenir financièrement les initiatives d'agroforesterie et de restauration des terres dégradées ;
- (v) Mettre en place un mécanisme permanent de concertation entre autorités locales, services techniques et communautés pour le suivi des indicateurs environnementaux.

7 Conclusion

Cette étude fournit une analyse spatio-temporelle rigoureuse et quantifiée des dynamiques de l'occupation du sol dans le territoire de Befale sur la période 2020–2025, à partir d'images satellitaires à haute résolution (Sentinel-2 MSI et Landsat-9 OLI-2) traitées sous Google Earth Engine. Les résultats montrent qu'en cinq ans, le territoire de Befale a perdu environ 44 600 ha de forêt dense, soit 3,5 points de pourcentage de sa superficie totale, avec un taux annuel de déforestation de 2,22 % — une dynamique notable mais encore modérée à l'échelle de la province de Tshuapa.

Cette évolution, portée principalement par l'agriculture itinérante sur brûlis (68 % des conversions) et la production informelle de charbon de bois (19 %), s'est légèrement amplifiée sur la sous-période 2022–2025, atteignant 2,27 % par an. La fragmentation encore modérée des massifs forestiers résiduels (SHAPE_MN passant de 1,47 à 1,76) commence à affecter la connectivité écologique des écosystèmes forestiers, appelant une vigilance accrue quant à leur capacité de régénération naturelle et de séquestration du carbone.

Face à cette trajectoire préoccupante, les leviers d'action existent et sont documentés dans cet article : agroforesterie, gouvernance foncière participative, mécanismes REDD+, systèmes d'alerte satellitaire et transition énergétique. Le territoire de Befale dispose encore d'une fenêtre d'opportunité pour inverser cette tendance, à condition que les décideurs provinciaux et nationaux, les partenaires internationaux et les communautés locales s'engagent ensemble dans une démarche de planification territoriale intégrée, fondée sur des données géospatiales actualisées et une vision de long terme pour la forêt congolaise.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- [2] Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., & Lambin, E. (2004). Digital change detection methods in ecosystem monitoring: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 25(9), 1565–1596.
- [3] De Wasseige, C., Devers, D., de Marcken, P., Eba'a Atyi, R., Nasi, R., & Mayaux, P. (Eds.) (2009). *Les Forêts du Bassin du Congo — État des Forêts 2008*. Luxembourg : Office des publications de l'Union européenne.

- [4] Gislason, P. O., Benediktsson, J. A., & Sveinsson, J. R. (2006). Random forests for land cover classification. *Pattern Recognition Letters*, 27(4), 294–300.
- [5] Global Forest Watch (GFW) (2023). Données de changement forestier pour la RDC, province de Tshuapa, territoire de Befale. WRI. <https://www.globalforestwatch.org>
- [6] Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27.
- [7] Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., et al. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850–853.
- [8] Institut National de la Statistique (INS-RDC) (2021). Rapport démographique provincial : Province de Tshuapa — Territoire de Befale. Kinshasa: Ministère du Plan.
- [9] Jensen, J. R. (2016). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective* (4th ed.). New York: Pearson Education.
- [10] Mayaux, P., Pekel, J.-F., Desclée, B., Donnay, F., Lupi, A., Achard, F., & Belward, A. (2013). State and evolution of the African rainforests between 1990 and 2010. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 368(1625).
- [11] McGarigal, K., & Marks, B. J. (1995). FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351.
- [12] MEDD-RDC (2021). Stratégie nationale REDD+ de la République Démocratique du Congo. Kinshasa : Ministère de l'Environnement et Développement Durable.
- [13] PNUD-RDC (2023). Rapport sur le développement humain en RDC. Kinshasa : Programme des Nations Unies pour le Développement.
- [14] Potapov, P., Hansen, M. C., Pickens, A., Hernandez-Serna, A., et al. (2022). The Global 2000–2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived from the Landsat Archive. *Frontiers in Remote Sensing*, 3, 856903.
- [15] Puyravaud, J.-P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1–3), 593–596.
- [16] Tchatchou, B., Sonwa, D. J., Ifo, S., & Tiani, A. M. (2015). Déforestation et dégradation des forêts dans le Bassin du Congo : état des lieux et perspectives. Bogor : CIFOR.
- [17] Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2014). Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 144, 152–171.