ARCHIVE OUVERTE

ACADEMIC PUBLICATION

RESEARCH ARTICLE

Dynamique de l'occupation du sol et climat a Lubero (RDC)

AUTHORS

Mumbere Franck Kakirania
Kasereka Odilon Kataomba
Maombi Mbusa Masinda

ILMIN LIBRARY • ACADEMIC FREE ACCESS

https://ilminlibrary.com

RCSI
Revue des Carrefours des Sciences et de l'Innovation
https://rcsi.uor.ac

Occupation et utilisation du sol et perception sur le changement climatique en territoire de Lubero, de 1987 *à* 2024

Kakirania, Mumbere Franck ; Kataomba, Kasereka Odilon ; Maombi, Mbusa Masinda*

Département de gestion de l'Environnement, Université Officielle de Ruwenzori (UOR), Butembo, Democratic Republic of Congo

**Auteur correspondant : mmasinda@uor.ac ; Tel : +243816101903*

Résumé

La dégradation de la végétation et/ou la déforestation sont étroitement liées à l'émergence de la civilisation humaine. Celles-ci ont pour conséquences, la baisse de la biodiversité et la perturbation des conditions climatiques, principalement, les précipitations, la température et l'humidité du sol. Cela étant, cette étude s'est assignée comme objectifs (i) d'évaluer l'impact des activités anthropiques sur l'occupation et l'utilisation du Territoire de Lubero et (ii) d'explorer et analyser la relation entre les séries temporelles de températures et le changement du couvert végétal. Une analyse de données satellites (Landsat TM4, TM5 et Landsat 9 OLI) a été menée entre 1987 et 2024. Par ailleurs, la variation de la température, pour la même période, a été observée en vue de s'imprégner de la probable relation entre la disparition du couvert végétal et le changement de celle-ci. Les résultats obtenus présentent une forte dégradation dans la partie-Est du Territoire de Lubero en termes de 1,22 % en fonction du NDVI entre 1987 et 2024. Ensuite, la zone en faible dégradation a représenté 7,84 % du territoire alors que les zones en stabilité représentent 45,35 % de l'ensemble. Une faible amélioration a été manifeste en termes de l'ordre de 43,86 % alors qu'une forte amélioration s'est manifestée sur 1,66 % (à l'Ouest) du territoire suite à l'état sécuritaire précaire de la région. Le test *t de Student* a révélé des différences significatives pour certaines classes de NDVI (1987, 2010 et 2024), à l'exception de la faible amélioration. L'analyse de la variance a montré une différence de surfaces significative entre les classes NDVI (1987, 2010 et 2024). Il n'a pas été observé de corrélation linéaire significative entre la végétation et les températures, bien que l'effet ait été proche du seuil de signification statistique (*p-value* > 0,05).

Mots-clés : Dynamique, végétation, température, colinéarité, Territoire de Lubero.

Abstract

The degradation of vegetation and/or deforestation is closely tied to the emergence of human civilization. These phenomena result in decreased biodiversity and disruptions to climatic conditions, particularly precipitation, temperature, and soil moisture. Accordingly, this study aims to: (i) evaluate the impact of anthropogenic activities on land use and land cover in the Lubero Territory and (ii) explore and analyze the relationship between temperature time series and changes in vegetation cover. To achieve these objectives, satellite data analysis (Landsat TM4, TM5, and Landsat 9 OLI) was conducted for the period 1987 to 2024. Additionally, temperature variations over the same period were observed to assess the potential relationship between vegetation cover loss and temperature changes. The results reveal significant degradation in the eastern part of Lubero Territory, accounting for 1.22 % NDVI reduction between 1987 and 2024. Areas experiencing mild degradation represent 7.84 % of the territory, while stable zones cover 45.35 % of the area. Mild improvements in vegetation cover were observed over 43.86% of the territory, whereas significant improvements were identified in 1.66 % of the territory (notably in the western region), attributed to the region's precarious security conditions. Student's t-test revealed significant differences in certain NDVI classes (1987, 2010, and 2024), except for areas with mild improvements. Analysis of variance demonstrated significant differences in surface areas across NDVI classes (1987, 2010, and 2024). However, no statistically significant linear correlation was observed between vegetation cover and temperature, although the effect approached the threshold of statistical significance (p-value > 0.05).

Keywords: Dynamics, Vegetation, Temperature, Collinearity, Lubero Territory.

1. Introduction

L'occupation et l'utilisation des sols, interviennent dans le maintien de l'équilibre des écosystèmes et dans la régulation du climat. L'occupation du sol désigne ici la couverture physique de la surface terrestre (forêts, zones agricoles, zones urbaines, etc.), et l'utilisation du sol fait référence aux activités humaines qui exploitent ces surfaces (agriculture, urbanisation, exploitation forestière, etc.). La modification de la couverture du sol en Territoire de Lubero par les activités humaines crée des rétroactions qui amplifient les changements climatiques avec des effets sur l'albédo, la transpiration et le cycle de l'eau, le stockage du carbone, la modification des régimes de température, … (Alexander et al. 2017 ; Akbar et al., 2023).

Les changements d'utilisation des sols sont identifiés parmi les principaux moteurs du changement climatique. D'une part, la déforestation et/ou la conversion des écosystèmes naturels en terres agricoles ou urbaines contribuent à l'augmentation des émissions des gaz à effet de serre et à la réduction de la capacité des écosystèmes à stocker du carbone (Liu et al., 2020). D'autre part, ces changements modifient l'albédo de la surface terrestre et les flux énergétiques, impactant ainsi la température et les régimes de précipitations à l'échelle locale et globale (Laguë et al., 2019).

En outre, les changements dans l'occupation des sols peuvent se produire en réponse à des facteurs humains et climatiques. Par exemple, la demande de nouvelles implantations d'infrastructures entraîne souvent la perte permanente de terres naturelles et de terres cultivables, ce qui peut se traduire par des

changements localisés en termes de régimes climatiques, de température et de précipitations (Abramowitz et al. 2008 ; Ackerly et al. 2015 ; Allen et al. 2010 ; Syphard et al. 2019). Agrégés sur de vastes zones, ces changements peuvent influencer le climat de la Terre en modifiant les régimes de circulation régionaux et mondiaux, en changeant l'albédo (réflectivité) de la surface de la Terre et en modifiant la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère (Allen et al., 2010 ; Bauer et al., 2016). Inversement, le changement climatique peut également influencer la couverture terrestre, entraînant une perte de la couverture forestière en raison de l'augmentation des perturbations liées au climat, l'expansion de la végétation ligneuse dans les prairies, et la perte des zones humides côtières et des plages en raison de l'augmentation de l'inondation et de l'érosion côtière amplifiée par l'élévation du niveau de la mer (Betts et al. 2013 ; Bounoua et al. 2015). À l'échelle mondiale, l'augmentation des températures de surface résulte principalement des activités humaines qui influent sur l'occupation et l'utilisation des sols (Gogoi et al. 2019).

Le Centre de Recherche Forestière Internationale (CIFOR) rapporte que le bassin du Congo affiche des niveaux de déforestation et de dégradation relativement bas en comparaison avec d'autres régions du globe. Toutefois, Tchatchou et al. (2015), dans l'étude effectuée dans la même région, révèle une augmentation du taux de déforestation nette, passant de 0,09 % entre 1990 et 2000 à 0,17 % entre 2000 et 2005. Cette augmentation est principalement attribuée à la RDC, où le taux de déforestation a doublé, passant de 0,11 % entre 1990 et 2000 à 0,22 % entre 2000 et 2005.

En effet, en RDC, la dépendance des populations aux ressources forestières alimentaires et énergétiques exacerbe la pression sur les écosystèmes. Entre 2000 et 2010, le taux de déforestation est passé de 1,09 % à 1,25 %, principalement en raison de l'expansion urbaine et de l'agriculture (Lobanga et al. 2021 ; OSFAC, 2010). Face à cette réalité, des stratégies de gestion territoriale s'imposent pour concilier les besoins socioéconomiques à la conservation de l'environnement (Balomba et al. 2018 ; Filippa et al. 2018 ; Shit et al., 2021).

La région montagneuse de l'Est de la RDCen général, et le Territoire de Lubero en particulier, connaît une forte dégradation des sols et des crises liées à l'utilisation de l'espace. Des études dans le bassin versant de la rivière Talihya ont montré une diminution des forêts au profit des terres cultivées, avec un taux de déforestation de 1,60 % entre 1987 et 2020 (Moïse et al. 2022). Ainsi, la présente étude se propose d'examiner la dynamique du couvert végétal en territoire de Lubero entre 1987 et 2024, en s'intéressant particulièrement à ses effets sur le changement climatique. Elle cadre avec les études spécifiques d'aménagement sur le patrimoine forestier national en vue de mieux comprendre les dynamiques d'affectation et des usages des espaces forestiers (MINAT_RDC, 2018).

Cette étude avance les hypothèses suivantes : (1) la variation du couvert végétal en Territoire de Lubero est principalement causée par l'agriculture, et (2) la dégradation du couvert végétal influence significativement l'augmentation de la température. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'impact des activités humaines et des facteurs climatiques sur la végétation dans cette région. En contribuant à une meilleure compréhension des interactions entre l'occupation des sols et le climat, cette recherche pourra guider les stratégies d'aménagement et de conservation des écosystèmes en RDC.

2. Matériel et méthodes

2.1. Milieu d'étude

Ces recherches ont été menées dans le territoire de Lubero, l'un des six territoires composant la province du Nord-Kivu, à l'est de la RDC. Ce territoire est délimité au nord par la latitude 0°41'55,50"N, au sud par la latitude 0°48'41,26"S, à l'est par la longitude 29°45'44,80"E et à l'ouest par la longitude 27°48'00,07"E

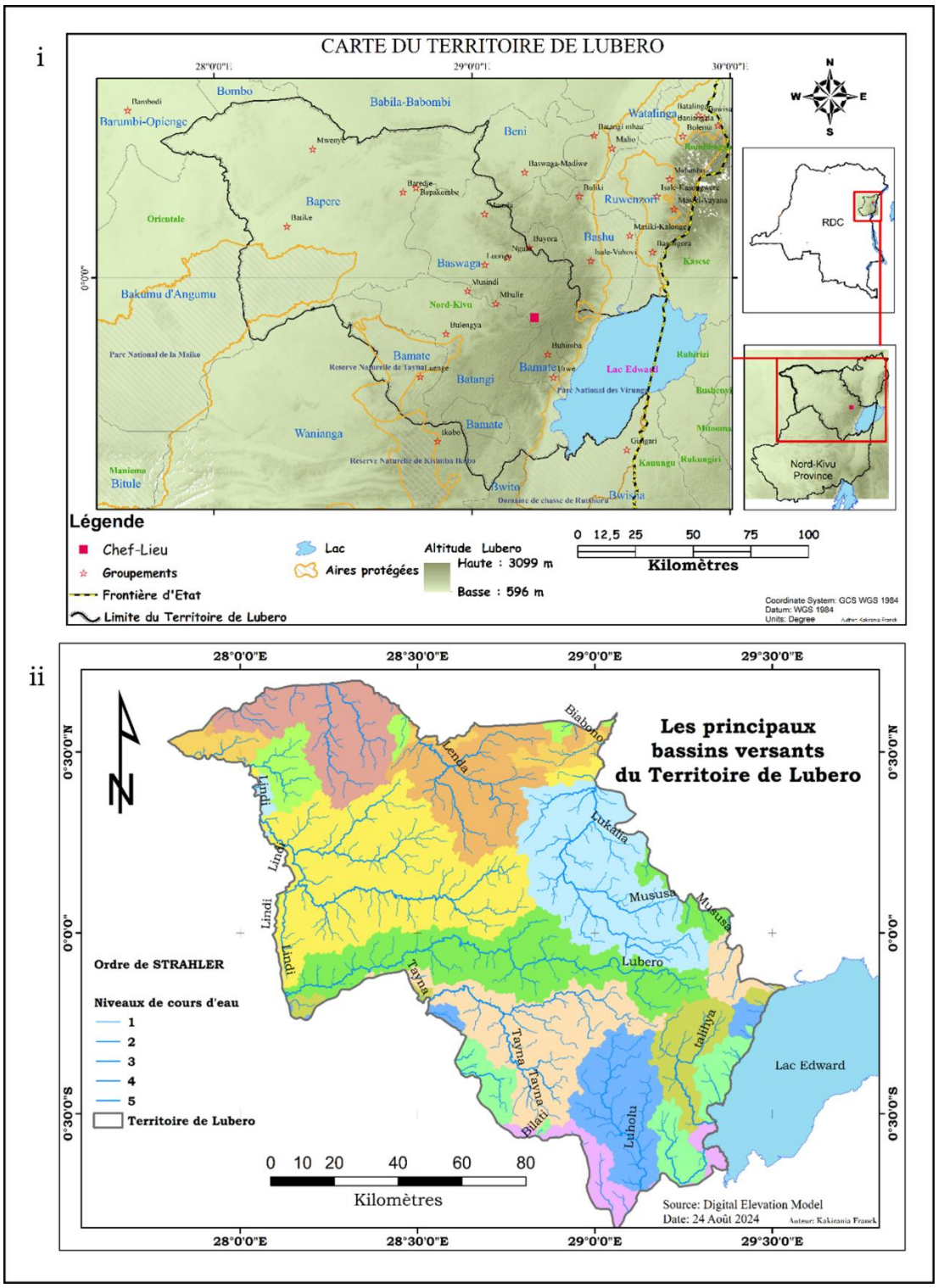


Figure 1: (i) Carte du territoire de Lubero réalisée avec le fichier vecteur des territoires de la RDC, (ii) les bassins versants du territoire de Lubero

Le territoire de Lubero présente une végétation diversifiée due à ses variations altitudinales et un climat équatorial de type Af selon la classification de Koppen. En territoire de Lubero, les forêts tropicales couvrent une grande partie de la région, en particulier dans les zones montagneuses et quelques vallées. Ces forêts sont denses et abritent une riche biodiversité, incluant de nombreuses espèces endémiques. Cependant, certaines forêts sont artificielles car après maintes sensibilisations sur le reboisement, des vastes étendues sont couvertes d'espèces exotiques comme les espèces d'*Eucalyptus* et le *Grevillea robusta* (Geert et al. 2013).

Les savanes sont parsemées de petits arbustes, et les zones agricoles sont dominées par des cultures vivrières à l'instar du maïs, le manioc, les haricots et les bananes. Les forêts longent les cours d'eau, et constituent des habitats essentiels pour la faune locale et jouent un rôle important dans la régulation hydrologique du territoire. Le territoire de Lubero est drainé par plusieurs cours d'eau, dont les principaux figurent sur la figure 1.

Le fichier vecteur du territoire de Lubero provenant du référentiel géographique commun (www.rgc.cd) utilisé dans ce travail est une fusion des entités qui constituent ce territoire notamment la chefferie de Bamate, la chefferie de Batangi, la chefferie de Baswagha et enfin le secteur de Bapere. La carte administrative réalisée par CAID (Centre d'Analyse d'Indicateurs du Développement) intègre toute la partie des eaux congolaises du lac Edouard en territoire de Lubero (CAID, 2016). Cette étude ne s'est focalisée que sur la dynamique de végétation et n'a intégré aucun pixel du lac Edouard dans le calcul. Le calcul de la superficie a donc été de 15 425 km^2.

2.2. Collecte des données sur la végétation.

Pour évaluer les changements de couverture végétale au fil du temps entre 1987 et 2024, des images ont été tirées sur *USGS Earth Explorer* (http://earthexplorer.usgs.gov) en explorant des scènes LANDSAT. Le choix de ces images a permis de reculer suffisamment dans le temps pour mieux définir et comprendre les dynamiques d'occupation des sols (Boulogne, 2016). Mais aussi, les données fournies par LANDSAT/MSS facilitent une analyse évolutive sur une période dépassant une décennie (Bonn, 1994). Enfin, ces images comme celles de Landsat 7 sont formées de neuf bandes spectrales : (i) trois dans le domaine visible, (ii) une bande dans le proche infrarouge (NIR), (iii) deux dans le SWIR (Infrarouge à courtes longueur d'onde), (iv) deux dans le TIR (Infrarouge thermique) et (v) une bande panchromatique qui est le domaine du visible entier (Bersi, 2018).

Tableau 1 : Scènes Landsat des mosaïques étudiées

	Scènes ID mosaïque 1987	**Scènes ID mosaïque 2010**	**Scènes ID mosaïque 2024**
Est	LT51730601987219XXX01 Du 07 Aout 1987	LT51730602010042MLK00 Du 11 Fév. 2010	LC91730602024073LGN00 Du 13 Mars 2024
Ouest	LT41740601987362XXX01 Du 28 déc. 1987	LT51740602010033MLK00 Du 02 fév. 2010	LC91740602024128LGN00 Du 07 Mai 2024
Sud	LT51730611987219XXX05 Du 07 Aout 1987	LT51730612010026MLK00 Du 26 Janv. 2010	LC91730612024195LGN01 Du 28 Mars 2024

Pour couvrir la zone d'étude, les mosaïques d'images, d'une résolution spatiale de 30 m chacune, ont été utilisés. Chaque mosaïque était constituée de 3 scènes Landsat. Les scènes utilisées à cet effet sont décrites dans le tableau 1.

De ce fait, les images de 3 capteurs notamment les images LANDSAT-4 TM, Landsat-5 TM et le plus récent LANDSAT-9 OLI ont été utilisées. Ces 9 images ont été sélectionnées pour deux raisons principales : la première est la clarté de celles-ci, avec la nébulosité quasi-nulle ; la seconde est la disponibilité de celles-ci sur une période donnée (Ndavaro, K N., Dramani R., Mulondi K.G., Sahani, M W., 2021).

2.3. Collecte de données de température

Les irrégularités des données des stations de climatologie dans la zone d'étude ont amené à recourir aux données publiées sur le site internet de la NASA via https://power.larc.nasa.gov. Les analyses portant sur la variation de la température se sont étendues sur la période allant de 1984 à 2022, les données au-delà de cette période n'ont pas été disponibles. Comparativement aux données pluviométriques qui n'ont pas été satisfaisantes pour être analysées dans la cette étude suite aux valeurs manquantes, les données de température ont été satisfaisantes. La figure 2 présente les points de prélèvements des données de cette plateforme en territoire de Lubero.

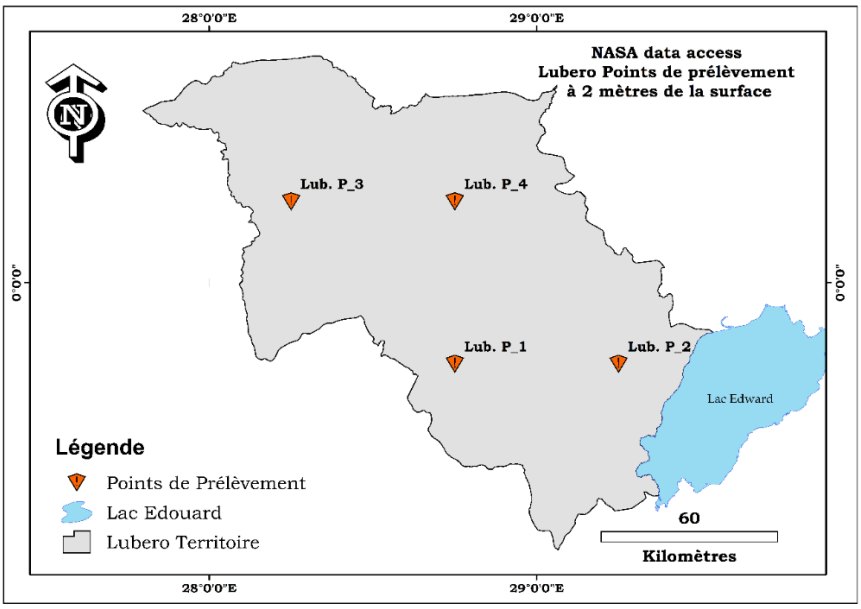


Figure 2 : Lubero points de prélèvement des températures de la plateforme Nasa data access

Les températures obtenues à ces 4 points internes et à 16 points externes équidistants, ont ensuite été interpolées sur toute l'étendue du territoire de Lubero par la méthode d'interpolation de *Kriging*. Il sied de noter que le krigeage offre une solution au problème de l'estimation basée sur un modèle continu de variation spatiale stochastique. Aussi, faut-il rappeler qu'il optimise l'utilisation des connaissances existantes en prenant en compte la manière dont une propriété varie dans l'espace à travers le modèle de variogramme. Dans sa formulation originale, une estimation krigée à un endroit donné est simplement une somme linéaire ou une moyenne pondérée des données dans son voisinage (Webster and Oliver, 2007).

2.3. Collecte des informations des entretiens directifs et focus group

Dans l'objectif de recueillir certaines connaissances de la population du territoire de Lubero, des entretiens directifs ainsi que des focus-group ont été organisés avec des personnes âgées de plus de 50 ans en vue d'élucider certains aspects sociaux liés à la dynamique de la végétation en territoire de Lubero. Les personnes sélectionnées sont celles vivant ou ayant vécu plus de 30 ans en territoire de Lubero. Les résultats issus de ces entretiens en groupe, ont fortement contribué à l'interprétation et à la compréhension des données recueillies par imagerie Landsat.

2.4. Traitement des images de télédétection

1° Traitement radiométrique des images

Le but d'une correction radiométrique basée sur la scène est de dériver des mesures de réflectance spectrale internement cohérentes dans chaque bande à partir des luminances observées dans la partie optique du spectre (Smith and Milton, 1999). Ainsi, les outils du logiciel ENVI 5.3 (*Environment for Visualizing Images*) ont été utilisés pour effectuer la correction radiométrique en appliquant les coefficients de calibration du fichier MTL en vue de convertir les valeurs numériques brutes en réflectance de surface.

2° Traitement géométrique des images

Les images Landsat sont mises en ligne après application de la correction géométrique consistant au géoréférencement des images avec les *Ground Control Points* (GCPs) - cf. les métadonnées du fichier MTL des images -, c'est pourquoi ce traitement n'était plus appliqué.

3° Corrections atmosphériques

Les corrections atmosphériques ont été principalement effectuées dans le but de diminuer l'influence du taux de nébulosité des images qui occupait certains espaces des images. Pour ce faire, le logiciel ENVI 5.3 dans son module appelé FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) a servi pour corriger les effets atmosphériques. Avant l'application du module FLAASH, qui traite la réflectance des pixels, la calibration atmosphérique de la radiance était d'abord appliquée.

2.5. Classification des images

La méthode de classification non supervisée a été utilisée car ne disposant pas suffisamment des connaissances préalables de toute l'étendue du territoire de Lubero et seulement peu d'informations sur les comportements spectraux des objets sont connues. C'est sur base du calcul d'indices de végétation NDVI que les pixels présentant la même réflectance ont été regroupés en classes pour mettre en évidence des étendues fortement et moyennement végétalisées en les différenciant de celles n'ayant pas de couverture végétale, les surfaces de classes NDVI ont ensuite été mesurées en termes de pourcentage. La superficie en kilomètres carrés des classes a été calculée par la formule suivante :

$$Sup\ km^2 = \frac{Nbre\ des\ pixels\ \times 30 \times 30}{1000000}$$

Les résultats de la classification des images satellites ont été confrontées aux données de terrain et aux images d'archives de haute résolution spatiale, disponibles sur Google Earth Pro afin d'évaluer le

niveau de précision à l'aide de la matrice de confusion -table de contingence- (Tungi Tungi et al., 2021). Le logiciel ArcGIS 10.8 a servi pour la classification des données et la réalisation de la matrice de confusion avec pour objectif de vérifier la classification non supervisée du logiciel par comparaison aux données géographiques (40 points) prélevées sur terrain, d'où 10 points par classe NDVI. Le pourcentage de l'indice de Kappa a été donné par le quotient entre la somme des points de référence (réf) dans leurs classes respectives (Ref1 pour la classe 1, Ref2, Ref3 et Ref4 pour les classes 2,3 et 4) et le total des points (40).

Les pixels ont été regroupés en 4 classes NDVI de -0,7 à 0,44 pour les sols nus, de 0,44 à 0,65 pour les terres agricoles, de 0,65 à 0, 76 pour les brousses et enfin la végétation ligneuse dense dans la classe de 0,76 à 01. Par comparaison de cette classification à celle de (Hashim et al., 2019), les auteurs indiquent que la classe NDVI de -1 à 0,199 constitue le sol sans végétation comme le réseau routier, maisons, sol nu, etc. La classe allant de 0,2 à 0,5 constitue les brousses, végétation tropicale, buissons et plantes herbacées et enfin la classe de 0,5 à 1 est celle constituée d'une végétation dense (forêt), un espace où la végétation est très importante. Les petites différences des limites d'intervalles sont dues au nombre de classes qui diffèrent (4 et 3) mais aussi (Aitouda, 2012) atteste par des études antérieures que le NDVI est tout de même relativement sensible aux positions respectives du capteur et du soleil (effets directionnels), aux variations spatiales et temporelles de composition de l'atmosphère (effets atmosphériques) et à la couleur de la strate sous-jacente comme le sol et la litière.

Concernant la détection des changements des valeurs NDVI, elle a été calculée grâce au calcul des différences des valeurs pondérées de chaque pixel, selon la formule suivante :

$$\Delta(\boldsymbol{p}) = [\boldsymbol{V}(\boldsymbol{p})_{\mathbf{2024}} - \boldsymbol{V}(\boldsymbol{p})_{\mathbf{1987}}]$$

$$\Delta(\boldsymbol{p}) = [\boldsymbol{V}(\boldsymbol{p})_{\mathbf{2024}} - \boldsymbol{V}(\boldsymbol{p})_{\mathbf{2010}}]$$

$$\Delta(\boldsymbol{p}) = [\boldsymbol{V}(\boldsymbol{p})_{\mathbf{2010}} - \boldsymbol{V}(\boldsymbol{p})_{\mathbf{1987}}]$$

Où V(p) représente la valeur NDVI de chaque pixel, et l'indice numérique correspond à l'année de la prise de l'image. Les valeurs négatives de cette formule constituent des pixels qui ont connu une dégradation de la végétation et les valeurs positives des pixels constituent des étendues où la végétation s'est améliorée (adapté de Hountondji, 2008).

2.6. Traitement statistique

Une analyse de la normalité des données (Test de Kolmogorov Smirnov) a été effectuée sur les données des valeurs des pixels avant de passer au test t de Student pour échantillon unique des surfaces des classes NDVI mais également avant l'analyse de la variance à deux facteurs (ANOVA II) prenant les surfaces comme variable dépendante, les années et les classes NDVI comme variables indépendantes. Tous ces tests ont apporté la clarté dans la décision de comparaison des images en termes de dynamique du couvert végétal.

Les données chronologiques de température ont été analysées sous le logiciel KhronoStat 1.01 qui est performant dans l'analyse des données chronologiques suite aux différents tests de rupture. Le test de rupture a permis d'analyser les séries de température avec le test de Pettitt. Ce test est un test non-paramétrique qui dérive du test de MannWhitney (PATUREL et al. 1998). La valeur de U du test de (Pettitt, 1979) est trouvée en procédant par des calculs de différences pour chaque paire de valeurs (x_i,

x_j) dans la série chronologique, on calcule la différence $x_i - x_j$. La variable $U_{1,N}$ est ensuite calculée en sommant les signes des différences pour chaque paire (i, j) dans la série par la formule :

$$U_{1,N} = \sum_{i=1}^{i} \sum_{j=i+1}^{N} Dij$$

D'où *Dij* = sgn(X_i - X_j) avec sgn(Z) = 1 si Z > 0, 0 si Z = 0 et -1 si Z < 0. Sgn est une fonction (PATUREL et al. 1998). Enfin, la colinéarité a été vérifiée entre les données spatiales de surfaces NDVI et les températures moyennant le logiciel SPSS_20. Voilà en bref, ce qui a constitué l'ossature de notre approche méthodologique.

3. Résultats

3.1. Analyse des différences visuelles

La figure 3 présente des valeurs chronologiques du NDVI du territoire de Lubero en 1987, 2010 et 2024.

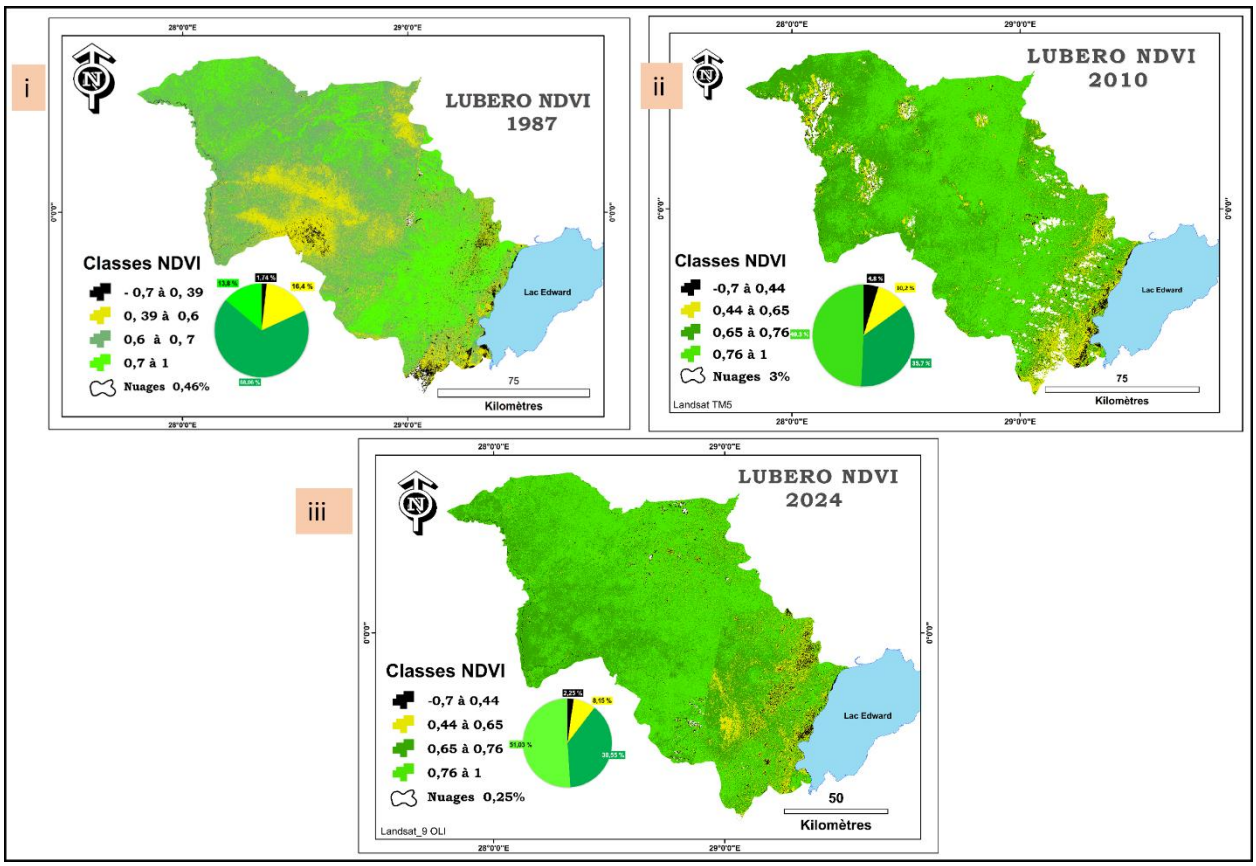


Figure 3 : (i) NDVI du territoire de Lubero 1987 ; (ii) NDVI du territoire de Lubero 2010 ; (iii) NDVI du territoire de Lubero 2024

L'analyse de télédétection présentée sur la figure 3 en territoire de Lubero (15 425 km²) révèle une certaine variation du NDVI (Indice de Végétation par Différence Normalisée) au cours des années 1987, 2010 et 2024.

En 1987, les zones sans végétation (NDVI entre -0,7 et 0,44) représentaient 1,74 % du territoire, soit 195,8 km² sans prendre en considération la partie couverte par les nuages (0,46 % du territoire était couvert de nuages). Les terres agricoles prédominaient avec un NDVI entre 0,44 et 0,65 couvrant 16,4 % (2 530,7 km²). La majorité du territoire (68,06 % soit 10 499,3 km²) présentait une végétation modérée (NDVI entre 0,65 et 0,76), tandis que 13,8 % (2 125,1 km²) montraient une végétation dense (NDVI entre 0,76 et 1). Les variations des classes du NDVI n'étaient pas statistiquement significatives (p = 0,191 test t pour échantillon unique).

En 2010, les zones sans végétation sont passées à 4,8 %, bien que la proportion réelle sans les nuages soit de 1,8 % (277,7 km²). Les terres agricoles ont diminué, représentant 10,2 % (1 577,1 km²), tandis que les zones à végétation modérée ont également diminué à 35,7 % (5 514,3 km²). Cependant, les zones à végétation dense ont augmenté à 49,3 % (7 598,2 km²). Toutefois, les différences observées n'étaient pas significatives (p = 0,115).

En 2024, les zones sans végétation ont légèrement augmenté, atteignant 2 % (309,5 km² sans les nuages), tandis que les terres agricoles ont diminué à 8,15 % (1 257,7 km²). Les zones à végétation modérée ont augmenté à 38,55 % (5 946,5 km²), et la végétation dense a continué à croître, atteignant 51,03 % (7 872,3 km²). Les résultats de 2024 montrent que les différences ne sont pas significatives (p = 0,125), mais reflètent une tendance à l'augmentation des zones de végétation dense, probablement en raison des améliorations technologiques des capteurs Landsat.

Tableau 2 : Synthèse des Surfaces en Km2 de nos différentes classes

Années	***Classes NDVI***				*Nuages*
	[-07 ; 0,44[	[0,44 ; 0,65[	[0,65 ; 0,76[	[0,76 ; 1]	
1987	195,8km^2	2530,75 km^2	10499,27 km^2	2125,094 km^2	72 km^2
2010	277,65 km^2	1577,07 km^2	5514,33 km^2	7598,18 km^2	462,75 km^2
2024	309,5 km^2	1257,74 km^2	5946,5 km^2	7872,3 km^2	38,3 km^2

3.2. Les entretiens directifs et focus group

Les résultats des entretiens suggèrent en grande partie que l'année 1987 connait cette différence car en territoire de Lubero à cette époque il y avait de très grandes surfaces de pâturages pour l'élevage de gros et petits bétails (les bovins, les caprins et les ovins). Les milices armées ont occasionné de l'insécurité et les bêtes ont étés emportées. Suite à cet appauvrissement des propriétaires des pâturages, pour relancer l'économie, les pâturages ont été transformés en champs de culture du quinquina, améliorant ainsi le NDVI.

3.3. Evaluation de la précision de la classification

En guise de vérification de la classification, nous avons comparé 40 observations des points de terrain en termes de 10 points par classe NDVI. Ci-dessous la matrice de confusion pour l'an 2024. La vérification de la classification pour l'an 2010 s'est faite grâce aux images GoogleEarth.

Tableau 3 : Matrice de confusion

Codes		Classes	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4
Ref1	Surfaces sans végétation	1	10	1	0	0
Ref2	Terres agricoles	2	0	6	0	0
Ref3	Les brousses et pâturages	3	0	3	7	2
Ref4	Végétation ligneuse dense	4	0	0	3	8

Sur les 10 points d'observation sans végétation, tous appartiennent à la première classe NDVI (-0,7 à 0,44). Pour les terres agricoles avec faible végétation, 6 points de référence apparaissent dans la classe NDVI (0,44 à 0,65). Les troisième et quatrième classe regroupent respectivement 7 et 8 points. L'indice de Kappa est de 77,5 % (31/40) en 2024. En 2010, l'observation faite sur des images archives de Google Earth Pro, le calcul de cet indice a donné 72,5 %.

3.4. Analyses des changements

Le résultat de la détection des changements faite par le calcul de la variation des valeurs pondérées de chaque pixel entre 1987 et 2024, sont présentés sur la figure 4.

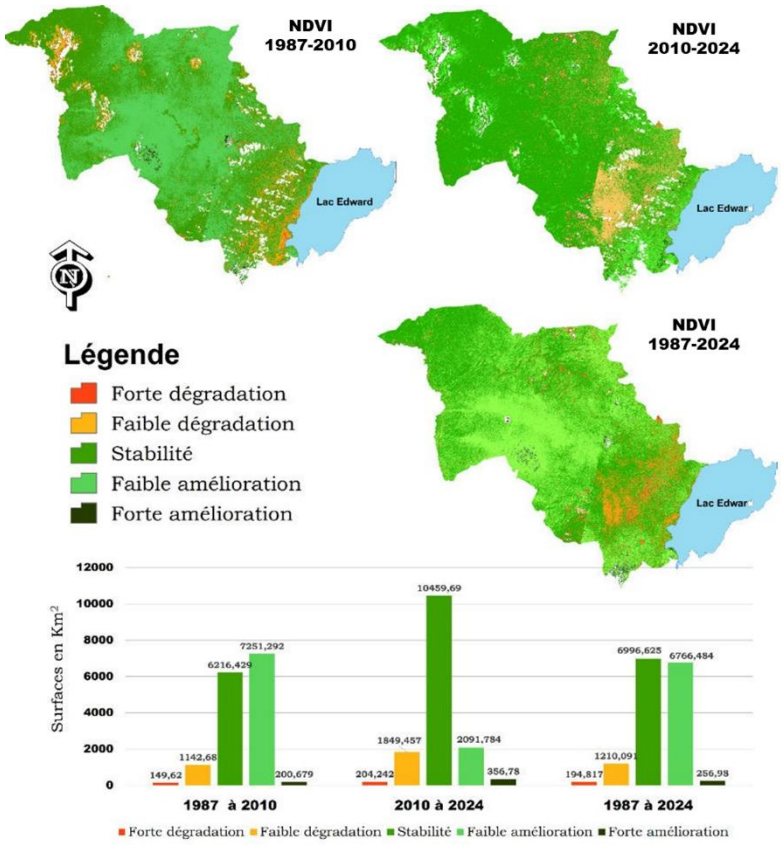


Figure 4 : Carte de tendances spatio-temporelle de la végétation de Lubero entre 1987-2024

Entre 1987 et 2010, 0,96 % du territoire de Lubero ont subi une forte dégradation de la végétation, une proportion qui a augmenté à 1,32 % (204,2 km²) entre 2010 et 2024. La faible dégradation a concerné 7,40 % du territoire entre 1987 et 2010, puis 11,9 % (1 849,4 km²) entre 2010 et 2024. Les zones de stabilité du NDVI ont augmenté, passant de 40,3 % entre 1987 et 2010 à 67,8 % entre 2010 et 2024.

La faible amélioration du NDVI, qui représentait 47,1 % du territoire entre 1987 et 2010, est tombée à 13,5 % entre 2010 et 2024, tandis que la forte amélioration a atteint 2,3 % du territoire dans cette même période.

Prenant en compte la période allant de 1987 à 2024, les proportions globales sont les suivantes : forte dégradation (1,26 %), faible dégradation (7,84 %), stabilité (45,35 %), faible amélioration (43,86 %) et forte amélioration (1,66 %). La forte dégradation se concentre principalement à l'Est, tandis que la forte amélioration est plus marquée au centre et à l'Ouest du territoire de Lubero. Le test t de Student a révélé des différences significatives (p-value < 0,05) pour les différents aspects du NDVI, a seuil de confiance de 95 %. Cependant, les zones de faible amélioration n'ont pas montré de différences significatives (p-value = 0,082).

3.5. Analyse de la variance entre les années 1987, 2010 et 2024

Pour une meilleure compréhension de l'évolution du couvert végétal en territoire de Lubero, une analyse de la variance à deux facteurs a été effectuée dont le condensé des résultats est présenté dans le tableau 4.

Tableau 4 : Analyse de la variation du couvert végétal en fonction du temps et des classes de NDVI

Source		Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
Intercept	Hypothèse	174032599,014	1	174032599,014	5,236	0,106
	Erreur	99715532,772	3	33238510,924		
Année	Hypothèse	27913,169	2	13956,585	0,002	0,998
	Erreur	37130720,202	6	6188453,367		
Classes NDVI	Hypothèse	99715532,772	3	33238510,924	5,371	0,039
	Erreur	37130720,202	6	6188453,367		
Année * Classes	Hypothèse	37130720,202	6	6188453,367	.	.
	Erreur	0,000	0	.		

Ce tableau indique que les pixels (surfaces) ne présentent pas de différence significative entre les années (p-value = 0.998), avec une marge d'erreur de 5 %. En revanche, une différence significative est observée entre les classes de pixels (p-value = 0.039) en considérant la même marge d'erreur. La figure 5 explicite les différences graphiques des classes selon les années.

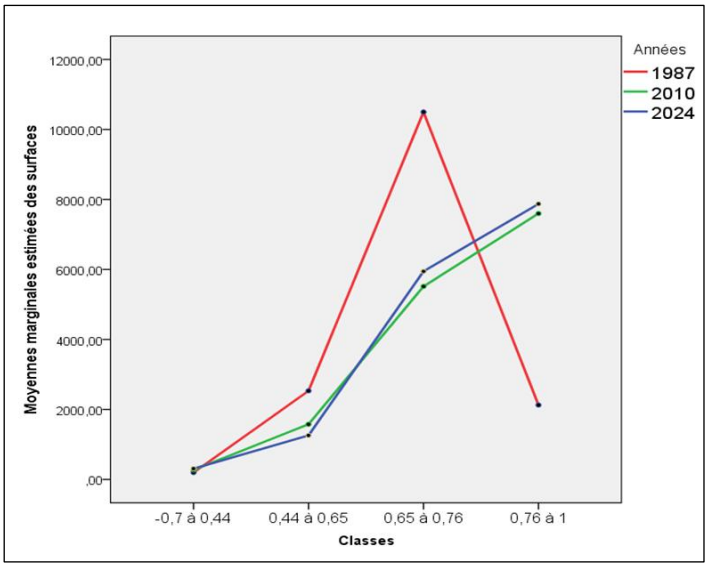


Figure 5 : Moyennes marginales estimées des surfaces des pixels en fonction des classes NDVI

Les années 2010 et 2024 montrent une tendance similaire dans la dynamique de la végétation, tandis que 1987 se distingue par une augmentation de la surface dans la classe NDVI (0,65 à 0,76) et une baisse dans la classe NDVI (0,76 à 1).

3.6. Analyse des données climatiques

La répartition spatiale en 1987, 2010 et 2022 de la température est présentée sur la figure 6.

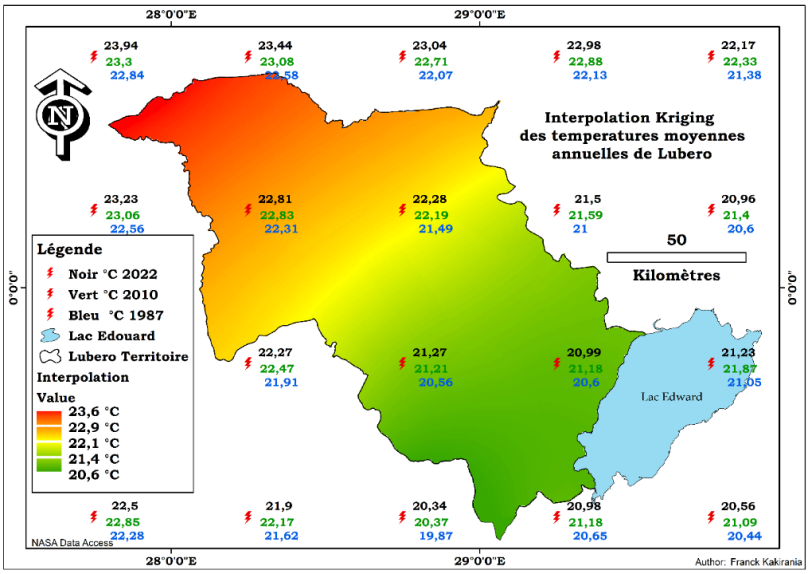


Figure 6 : Répartitions spatiales des températures par interpolation Kriging du territoire de Lubero entre 1987 et 2022

Sur cette figure, il ressort que la distribution spatiale des températures emprunte les mêmes intervalles spatiaux avec une légère modification des valeurs au fil du temps. L'évolution graphique des températures est présentée à la figure 7 conformément aux points de prélèvement indiqués sur la figure 3.

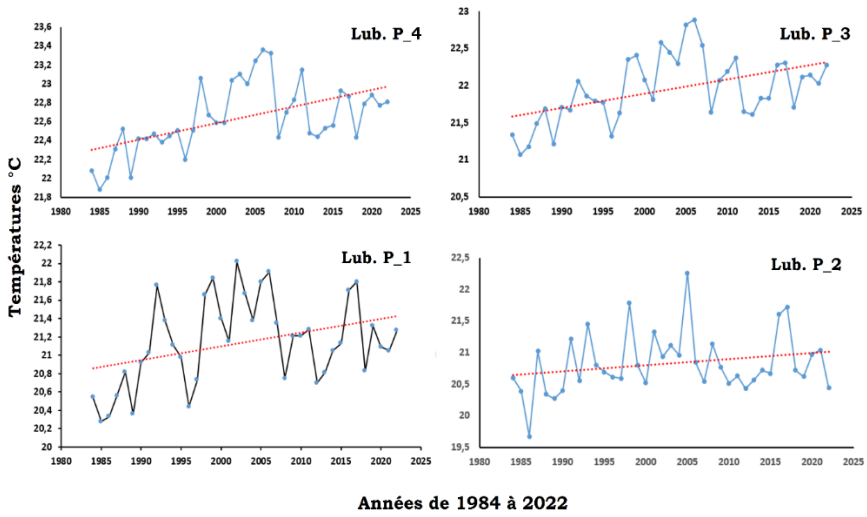


Figure 7 : Evolution temporelle des températures aux 4 points de prélèvements en territoire de Lubero. (Source : Data NASA Access)

Cette succession des données de températures révèle d'une tendance de hausse au fil du temps. Ces 4 séries de température ont toutes été soumises au test non paramétrique de Pettitt pour déceler l'absence ou la présence d'une rupture dans la série.

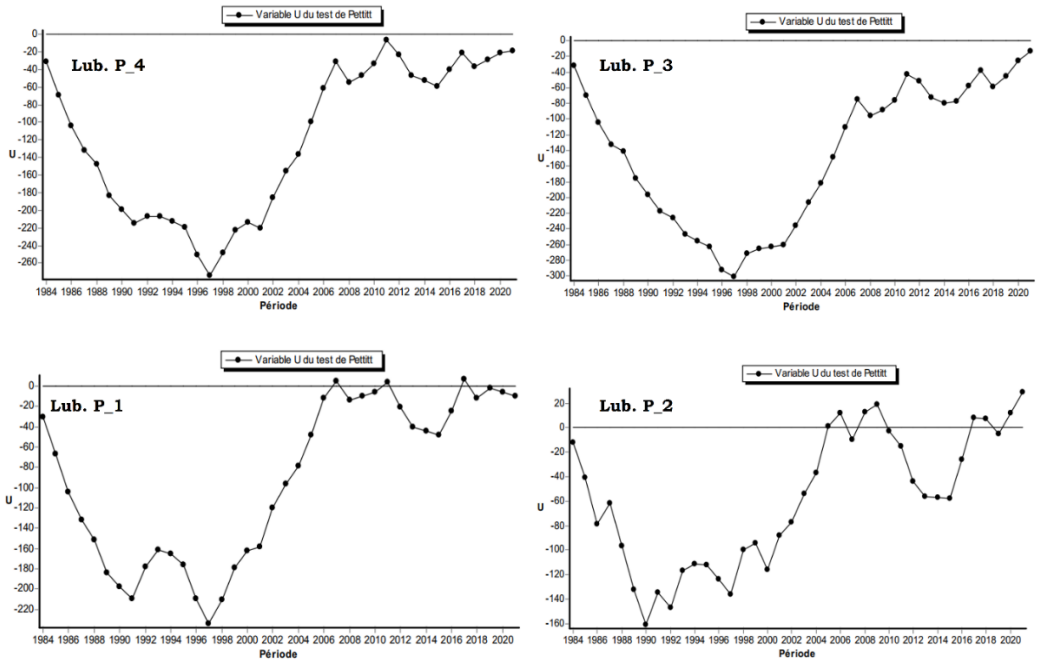


Figure 8 : Variable U du test de Pettitt de différentes séries de température en territoire de Lubero

Après vérification du test de corrélation des rangs, ce test a vérifié si les données suivent une tendance particulière ou sont simplement aléatoires ; les séries Lub. P_1, Lub. P_3 et Lub. P_4, l'hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) a été rejetée au seuil de confiance de 99 %, par contre la série Lub. P_2, l'hypothèse nulle a été acceptée au seuil de confiance de 99 % et de 95 %. Ici, le point de rupture est l'année 1997 où U atteint son minimum avant de remonter.

Pour le cas de la série Lub. P_2, il y a absence de rupture significative car le test de corrélation des rangs a montré que les données ne suivent pas une tendance particulière soutenant l'idée que les variations de U ne sont pas dues à des ruptures mais à des fluctuations naturelles.

3.6. Analyse de la colinéarité des surfaces des classes NDVI et les températures

Pour ce qui concerne la colinéarité entre les facteurs faisant l'objet de cette étude, le tableau 5 donne les valeurs de significativité de cette analyse.

Tableau 5 : Colinéarité des surfaces des classes NDVI et les températures

Modèle	**Coefficients non standardisés**		**Coefficients standardisés**	**t**	**Sig.**	**Collinearity Statistics**	
	B	Std. Error	Beta			Tolérance	VIF
(Constant)	-47342,830	20320,318		-2,330	0,048		
Température	2278,527	1010,511	0,568	2,255	0,054	0,545	1,835
Année	-400,255	789,941	-0,097	-0,507	0,626	0,948	1,054
Classes	1115,424	749,770	0,369	1,488	0,175	0,561	1,781

Les résultats indiquent que les années et les températures ne présentent pas de corrélation linéaire significative avec les surfaces NDVI ($p > 0,05$), bien que l'effet de ces dernières soit proche du seuil de significativité ($p = 0,054$). Les valeurs de VIF (< 10) et les tolérances élevées confirment l'absence de colinéarité entre les variables.

4. Discussion

4.1. Classification des images

Les images multi spectrales Landsat ont permis d'effectuer des calculs du NDVI permettant ainsi l'analyse des réponses spectrales qui correspondent à l'infrarouge proche (λ=0.8 µm) et au rouge (λ=0.66 µm) permet de mettre en évidence la végétation active, également de quantifier l'activité photosynthétique. Son évolution dans le temps reflète la phénologie des types de végétation. Le NDVI permet donc ici de différencier facilement la végétation comparativement aux ouvrages (maisons) et au sol. Les ouvrages étant constitués des surfaces sans végétation et ayant par conséquent des longueurs d'onde très similaires avec le sol nu (Crutzen, 2017; Milesi, 2023). Et (Aitouda, 2012) ajoute que le NDVI est souvent le seul indice présent dans de nombreuses bases de données multi temporelles, il montre de raisonnables corrélations avec des paramètres écologiques et continue à être utilisé comme indicateur des paramètres de végétation.

La classification non supervisée de nos images a été segmenté en 4 classes allant de -0,7 à 1 ; c'est une étape importante dans le traitement et analyse des images de télédétection car elle permet de calculer les superficies des pixels regroupés dans des classes suivant une certaine similarité de signature spectrale (Nintarakit, 1989). Cette classification a été vérifiée par le calcul de l'indice de Kappa qui a été de 77,5 % en 2024 et 72,5 % en 2010. Cet indice s'est révélé un meilleur indicateur d'une excellente classification. Les valeurs de cet indice figurent dans le seuil minimum tolérable (0,50 à 0,75) pour une classification acceptable des images satellitaires définies par (Pontius Jr, 2000).

4.3. Variation de l'occupation du sol

Nos résultats présentés à la figure 4 ont indiqué que la distribution des classes NDVI dans l'espace, au fil du temps, présente des différences comme indiquées dans le tableau 2.

En termes de pourcentage, la classe NDVI de -0,7 à 0,44 est partie de 1,27 %, 1,8 % et 2 % respectivement pour les années 1987, 2010 et 2024, cette tendance à la hausse (tableau 2), confirme notre hypothèse selon laquelle la dynamique de la végétation dans le territoire de Lubero serait susceptible d'être compromise sous l'impact des pressions environnementales croissantes car l'expansion des zones d'infrastructures humaines haussent les superficies des sols nus au fil du temps. La figure 4 a montré que cette dégradation est importante uniquement à l'Est du territoire, les études antérieures menées dans cette région affirment qu'il y a une dégradation forestière plus élevée et des changements d'occupation du sol dans cette région sur une période de trente-deux ans (1987 à 2019) d'où 70,4 % des étendues couvertes de forêts ont subi des changements d'occupation du sol créant ainsi des perturbations dues à l'homme, notamment les champs, les jachères, les prairies artificielles et les sols nus et bâtis (Ndavaro, K N., Dramani R. , Mulondi K.G. , Sahani, M W., 2021). Moïse et al. (2022) relate que le taux annuel de déforestation calculé pour les zones forestières du bassin versant de Talihya Nord entre 1987 et 2020 était de 1,60 %. Cette situation serait due à la forte expansion démographique du territoire de Lubero dans cette zone qui favorise ainsi des fortes pressions anthropiques sur les écosystèmes forestiers tropicaux (Kakule Vyakuno, 2006 ; Ndavaro, K N., Dramani R., Mulondi K.G., Sahani, M W., 2021). Mêmement, Jean-claude (2019), dans étude menée sur la cartographie du paysage autour du PNVi, il montre que la forte déforestation a un effet sur les changements climatiques alors que le paysage du PNVI est toujours victime d'un taux de déforestation estimé à 3,29 % sur la côte ouest du lac Edouard et à 5,2 % dans l'ensemble du Parc National des Virunga.

Il ressort dans plusieurs études que cette tendance de perte de la couverture forestière au détriment des champs et des sols nus est liée aux activités humaines (Badesire and Mukotanyi, 2021 ; Maréchal, 2012).

Concernant la classe NDVI de 0, 44 à 0,65 partant de 16, 4% en 1987, 10,2% en 2010 et 8,15% en 2024, il se fait constater une régression significative des valeurs (p Value 0,043) au seuil de confiance de 95 %. La classe NDVI de 0,65 à 0,76 connait presque la même tendance 68,06 %, 35,7 % ; 38,55 % respectivement pour les années 1987, 2010 et 2024 (p value 0,44). La classe NDVI entre les valeurs 0,76 et 1 est partie de 13,8 % en 1987, 49,3 % en 2010 et 51,03 % en 2024. Ces valeurs montrent une progression apparente même si cette augmentation des valeurs de surface n'est pas significative (*p-value* = 0.089) au seuil de confiance de 95 %. La tendance est celle de l'amélioration de la végétation de ces classes, au regard de la figure 4 montrant les tendances spatio-temporelles de l'évolution de la végétation. La végétation s'est améliorée principalement au centre du territoire, premièrement, cette amélioration est due à la création d'une aire protégée selon l'arrêté ministériel n°012/CAB/MIN/ECN-EF/2006 du 03 avril 2006 portant création d'une réserve naturelle dénommée Réserve des Primates de Tayna, en abrégé « RNT ». Cette réserve ainsi créée en chefferie de Batangi, Bamate et une partie en territoire de Walikale, a contribué à cette cause ; du titre I de l'objet du contrat et du domaine de partenariat, l'article 1 stipule que le contrat a pour objet de préserver de manière durable l'intégrité de l'écosystème de cette réserve et assurer une bonne gestion et à l'article 3 l'ICCN (Institut Congolais pour la Conservation de la Nature) s'engage à contribuer à la sécurité de la RNT (Journal_Officiel, 2007).

La deuxième raison de l'amélioration du NDVI est celle liée à l'insécurité, (GADHOP, 2012) montre que le Territoire de Lubero au Nord Kivu, a connu les crises sécuritaires dues à la présence de la milice des FDLR (Forces Démocratiques pour la Libération du Rwanda) et des Mai-Mai qui avaient le contrôle de la quasi-totalité des zones minières d'or, de Coltan, et de Platine à l'Ouest et au centre du territoire de Lubero. (Kasereka et al. 2021) ajoutent que ces enjeux de la guerre situent la province du Nord-Kivu au carrefour de diverses influences ; il est transformé en un terrain d'expérimentation de stratégies divergentes de nouvelles élites de la région, tout en s'imprégnant de la perception locale vis-à-vis des maquis armés actifs dans la région.

(Kujirakwinja et al., 2007) montrent que cette situation d'insécurité avait incité les populations à des déplacements massifs ; par ailleurs, (Mararo, 2000) exprime cette situation avec des mots mélancoliques selon lesquelles: « *Différents abus commis par l'administration foncière et les chefs coutumiers ont fait que les populations autochtones et immigrées se sont retrouvées petit à petit à l'abandon des terres qu'elles considéraient comme leurs, être contraintes à l'immigration vers les nouvelles terres ou vers la ville ».* Cette situation n'a pas laissé indifférent le secteur de l'agriculture et de l'élevage. En effet, entre 1973 et 1993, l'économie du Nord-Kivu a subi de profonds bouleversements. Ce processus a été déclenché à une époque où Mobutu proclamait l'agriculture comme « priorité des priorités ». Cela a conduit à une réduction excessive des terres de cultures vivrières au profit de grands ranchs (Mararo, 2000).

(Kessler and Geerling, 1994) affirment que le surpâturage entraîne une diminution de la régénération naturelle des ligneux, une baisse de la couverture herbacée, l'exposition du sol et son durcissement. Les herbacées sont des indicateurs des changements environnementaux d'un site à court terme (Bangirinama et al. 2010). Selon nos entretiens directifs, l'arrivée des groupes rebelles a conduit à l'abandon des ranchs, ce qui a favorisé le retour d'une couverture végétale ligneuse en transformant les ranchs en plantation de quinquina (*Cinchona officinalis*). Cela serait la deuxième raison de l'amélioration du NDVI dans ces milieux en 2010 et 2024.

Ces genres de crises se font entendre jusqu'à aujourd'hui. En 2020, les affrontements des miliciens ont poussé les populations aux déplacements massifs qui provenaient de Kironge, Bushimba, Kimaka, Kyambuli, Katsinga, Katanga, Kateku Katirisa, Mirungi et Bunande. Ces ménages se sont installés dans les localités de Luofu, Miriki, Kirumba, Kayna, Bulotwa, vers l'Est du territoire (Protection, 2020).

La troisième raison de l'amélioration du NDVI à la figure 4, nous constatons une amélioration à l'extrême Sud. Celle-ci résulte des campagnes de reboisement menée par le WWF (*World Wide Fund for Nature*) autour du Parc National des Virunga (PNVi). Cette Organisation Non Gouvernementale (ONG) a lancé en 2007 le projet EcoMakala sur 5 ans, appuyée par l'Union Européenne, ce projet consistait à planter des arbres qui croissent rapidement. Les espèces choisies étaient *Eucalyptus saligna*, *Grevillea robusta*, *Eucalyptus maidenii*, *Acacia mearnsii*, *Cedrela serrulata* et *Senna siamea* pour répondre aux besoins en énergie (braise) pour la ville de Goma et ainsi réduire la déforestation au sein du PNVi (Geert et al. 2013).

4.4. Colinéarité entre surfaces NDVI et série de température

Les résultats du tableau 4 ont montré que les températures ne sont pas linéairement corrélées avec les surfaces NDVI, bien que l'effet ait été à la limite de la significativité statistique juste au-dessus du seuil

de significativité (*p-value* = 0.054) au seuil d'erreur de 5%. Bon nombre d'auteurs ont montré que la relation entre la température de surface et le NDVI est non linéaire (Yuan and Bauer, 2007). (Boulfroy et al., 2012) ajoutent que lorsque les valeurs de NDVI sont inférieures à 0,6 (moyen à faible), la relation entre le NDVI et la température de surface serait non significative. Cela signifie que les changements de température ne sont pas associés à des changements linéaires de surface des classes NDVI tout en mettant en exergue les conséquences de la colinéarité statistique énoncé par (Foucart, 2006) selon lesquelles la colinéarité statistique entre les variables explicatives peut avoir des signes contraires à l'intuition et présente la difficulté à isoler l'effet de chaque variable. En dépit de cela, nous infirmons l'hypothèse selon laquelle, les changements de la végétation seraient liés aux variations de température au fil du temps, suggérant une relation de colinéarité entre les deux.

5. Conclusion

L'étude sur la dynamique de la végétation et perception du changement climatique en territoire de Lubero a été l'objet de cette étude, elle a permis de mettre en lumière les différentes occupations végétales dans ce territoire au fil du temps entre 1987, 2010 et 2024. Les objectifs qu'avait cette étude consistaient à évaluer l'impact des pressions environnementales croissantes sur la dynamique de végétation et explorer les séries temporelles de températures et de changements de la végétation, afin de déterminer une existence d'une relation de colinéarité entre les deux.

Les résultats indiquent une augmentation des surfaces de sols nus, particulièrement marquée vers l'Est du territoire. Cette dégradation est principalement attribuée à l'intensification des activités humaines et à l'exploitation des ressources naturelles. En revanche, certaines zones à l'Ouest ont vu une amélioration de la couverture végétale.

L'étude a également exploré la colinéarité entre les séries temporelles de températures et les changements de la végétation à travers les classes NDVI. Les analyses ont démontré qu'il n'existe pas de relation de colinéarité entre les températures et les variations des classes NDVI. Cette recherche apporte des éléments pour la compréhension des dynamiques écologiques. La protection et la conservation de zones naturelles comme la réserve de Tayna se révèlent être une des mesures efficaces pour la restauration de la végétation et la résilience écologique, sans omettre la nécessité de rétablir la paix dans ce territoire pour une distribution équilibrée de la population à sa surface et ainsi permettre à désengorger les régions de l'Est où sévit une dégradation du couvert végétal.

Les prochaines recherches peuvent aborder une thématique similaire en se focalisant davantage sur la comparaison de la dynamique de végétation de Lubero à d'autres régions aux caractéristiques climatiques identiques en se servant des images ayant une résolution spatiale fine inférieure à celle des images Landsat utilisées dans cette étude.

Remerciements : Nous remercions d'avance les évaluateurs de ce manuscrit pour son amélioration. Nous remercions également ceux qui nous ont fourni d'amples informations sur terrain en vue de confirmer les observations des images satellitales.

Références Bibliographiques

Abramowitz, G., Leuning, R., Clark, M., Pitman, A., 2008. Evaluating the performance of land surface Models. J Clim 21, 5468–5481. https://doi.org/10.1175/2008JCLI2378.1

Ackerly, D.D., Cornwell, W.K., Weiss, S.B., Flint, L.E., Flint, A.L., 2015. A geographic mosaic of climate change impacts on terrestrial vegetation: Which areas are most at risk? PLoS One 10, 1–30. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130629

Aitouda, H., 2012. Estimation des variables biophysiques des cultures et étude de l'effet du changement d'échelle sur leur variabilité spatiale. Université du Québec à Chicoutimi.

Akbar, A., Zhoolideh, M., Azadi, H., Lee, J., Scheffran, J., 2023. Interactions of land-use cover and climate change at global level : How to mitigate the environmental risks and warming effects Intergovernmental Panel on Climate Change. Ecol Indic 146, 109829. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109829

Alexander, P., Prestele, R., Verburg, P.H., Arneth, A., Baranzelli, C., Batista e Silva, F., Brown, C., Butler, A., Calvin, K., Dendoncker, N., 2017. Assessing uncertainties in land cover projections. Glob Chang Biol 23, 767–781.

Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.H. (Ted), Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.H., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A., Cobb, N., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. For Ecol Manage 259, 660–684. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001

Badesire, A., Mukotanyi, S., 2021. Université Catholique de Bukavu ANNEE ACADEMIQUE 2020-2021.

Balomba, P.M., Nsakala, H.N., Bokombola, P.B., 2018. Forêts, exploitation et consommation du bois-énergie en République Démocratique du Congo: cas de provinces de Kinshasa, du Kwango et du Kongo Central. Tropicultura 36.

Bangirinama, F., Bigendako, M.J., Lejoly, J., Noret, N., De Cannière, C., Bogaert, J., 2010. Les indicateurs de la dynamique post-culturale de la végétation des jachères dans la partie savane de la réserve naturelle forestière de Kigwena (Burundi). Plant Ecol Evol 143, 138–147.

Bauer, A., Farrell, R., Goldblum, D., 2016. The geography of forest diversity and community changes under future climate conditions in the eastern United States. Ecoscience 23, 41–53.

Bersi, M., 2018. Cours de Télédétéction Principes et Applications en Géosciences 19.

Betts, R.A., Geoscientific, N.G., Gonzalez, P., Gornall, J., Kahana, R., Kay, G., Mitchell, L., Wiltshire, A., 2013. Climate and land use change impacts Earth System on ecosystems , fire , the HadGEM2-ES Earth System Model using the Representative. https://doi.org/10.5194/bgd-10-6171-2013

Bonn, F., 1994. Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone Comprend, Presses de l'université du Québec.

Boulfroy, E., Khaldoune, J., Grenon, F., Fournier, R., Talbot, B., 2012. Conservation des îlots de fraîcheur urbains. Description de la méthode suivie pour identifier et localiser les îlots de fraîcheur et de chaleur-Résumé (Rapport 2012-11a). 2012.

Boulogne, M., 2016. Vulnérabilité des paysages forestiers dans le parc de Ranomafana (Madagascar): dynamiques environnementales et trajectoires agroforestières.

Bounoua, L., Zhang, P., Mostovoy, G., Thome, K., Masek, J., Imhoff, M., Shepherd, M., Quattrochi, D., Santanello, J., Silva, J., Wolfe, R., Toure, A.M., 2015. Impact of urbanization on US surface climate. Environmental Research Letters 10. https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084010

CAID, 2016. Carte administrative du territoire de Lubero.

Crutzen, F., 2017. Approche multi-capteurs pour la cartographie par télédétection des ressources ligneuses en Wallonie : application à la commune de Paliseul.

Filippa, G., Cremonese, E., Migliavacca, M., Galvagno, M., Sonnentag, O., Humphreys, E., Hufkens, K., Ryu, Y., Verfaillie, J., di Cella, U.M., 2018. NDVI derived from near-infrared-enabled digital cameras : Applicability across different plant functional types. Agric For Meteorol 249, 275–285.

Foucart, T., 2006. Colinéarité et régression linéaire. Mathématiques et sciences humaines 2006, 5–25. https://doi.org/10.4000/msh.2963

GADHOP, 2012. Etude Socioeconomique Sur L ' Exploitation Artisanale Dans Le Territoire De Lubero, Artisanale Dans Le Territoire De Lubero, 1–161.

Geert, L., Françoise, A., Mone Van, G., Thierry, L., 2013. ECOmakala: Meeting energy needs, fighting poverty and protecting the forests of the Virunga National Park in North Kivu DRC. WWF-Communauté francophone 35.

Gogoi, P.P., Vinoj, V., Swain, D., Roberts, G., Dash, J., Tripathy, S., 2019. Land use and land cover change effect on surface temperature over Eastern India. Sci Rep 9, 1–10. https://doi.org/10.1038/s41598-019-45213-z

Hashim, H., Abd Latif, Z., Adnan, N.A., 2019. Urban vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) Pleiades imagery. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 42, 237–240.

Hountondji, Y.C., 2008. Dynamique environnementale en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest : Analyse de l'évolution et évaluation de la dégradation du couvert végétal.

Jean-claude, K.K., 2019. Contribution A L ' étude Sur La Cartographie Du Paysage Forestier Autour Du Parc National Des Virunga Et De Son Expansion Spatiale Entre 1987 Et 2017. 24, 42–58. https://doi.org/10.9790/0837-2406064258

Journal_Officiel, 2007. Arrêté ministériel n°012/CAB/MIN/ECN-EF/2006 du 03 avril 2006 portant création d'une réserve naturelle dénommée Réserve des Primates de Tayna en abrégé « RNT ». Ministère de l'environnement, conservation de la nature, eaux et foret, RDC.

Kakule Vyakuno, E., 2006. Pression anthropique et aménagement rationnel des hautes terres de Lubero en RDC : rapports entre société et milieu physique dans une montagne équatoriale.

Kasereka, M.R., Vlassenroot, K., Muholongu, M.M., 2021. Dynamiques locales et pressions extérieures dans la conflictualité armée au Nord-Kivu : Cas des territoires de Beni-Lubero. Afrika Focus 23, 73–79. https://doi.org/10.1163/2031356x-02302011

Kessler, J.-J., Geerling, C., 1994. Profil environnemental du Burkina Faso. Université agronomique, Département de l'aménagement de la nature.

Kujirakwinja, D., Bashonga, G., Plumptre, A., 2007. Etude socio-économique de la zone nord-ouest du Parc National des Virunga (région de Lubero-Butembo-Beni). WWF, WCS,.«Programme de renforcement des capacités de gestion de l'ICCN et appui à la réhabilitation d'aires protégées en RDC», Feuillet technique.

Laguë, M.M., Bonan, G.B., Swann, A.L.S., 2019. Separating the impact of individual land surface properties on the terrestrial surface energy budget in both the coupled and uncoupled land–atmosphere system. J Clim 32, 5725–5744.

Ligate, E.J., Chen, C., Wu, C., 2018. Evaluation of tropical coastal land cover and land use changes and their impacts on ecosystem service values. Ecosystem Health and Sustainability 4, 188–204. https://doi.org/10.1080/20964129.2018.1512839

Liu, Y., Hou, X., Li, X., Song, B., Wang, C., 2020. Assessing and predicting changes in ecosystem service values based on land use/cover change in the Bohai Rim coastal zone. Ecol Indic 111, 106004.

Lobanga, E.L., Bosela, F.B., Lofumbu, G.L., Bolila, I.B., Mwabi, J.N.M., 2021. Étude comparée de l'évaluation du taux de déforestation dans les forêts du secteur forestier central de la République Démocratique du Congo. Afr. Sci 19, 28–41.

Mararo, S.B., 2000. Pouvoirs, élevage bovin et la question foncière au Nord-Kivu. L'Afrique des Grands Lacs: annuaire 2001, 219–250.

Maréchal, J., 2012. Caractérisation de la dynamique d'occupation du sol de la ville de Kisangani (RD Congo) et sa périphérie entre 2002 et 2010.

Milesi, J., 2023. Les apports de la télédétection dans le suivi de la végétation et l ' évaluation des aménagements de restauration des terres au Sahel , application au Niger To cite this version : HAL Id : dumas-04208069 l ' évaluation des aménagements de restauration des.

MINAT_RDC, 2018. Politique nationale de l'Aménagement du Territoire. Ministère de l'Amenagement du Territoire, République Démocratique du Congo.

Moïse, M.K., Ozer, P., Gloire, M.K., Jonathan, A.M., Isaac, U.D., Muyisa, M.K., Hintou, K.M., Walere, M.S., 2022. Dynamics of Land Use and Land Cover Change in the South Talihya Watershed North Kivu, Eastern Democratic Republic of Congo. Indonesian Journal of Social and Environmental Issues (IJSEI) 3, 179–193. https://doi.org/10.47540/ijsei.v3i2.596

Ndavaro, K N., Dramani R. , Mulondi K.G. , Sahani, M W., B.S.S.H.& N.K.A., 2021. Dynamique spatio-temporelle de l ' occupation du sol et du couvert forestier dans les. Geo Eco Trop 641–658.

Nintarakit, N., 1989. Classification automatique des images satellitaires par la méthode de maximum de vraisemblance. Université de Paris.

OSFAC, 2010. Forêts d'Afrique centrale évaluées par télédétection FACET. Étendue et perte du couvert forestier en République démocratique du Congo de 2000 à 2010., Brookings. ed. L'Université d'État du Dakota du Sud, États-Unis d'Amérique.

PATUREL, J.E., Servat, E., Delattre, M.O., Lubes-Niel, H., 1998. Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. Hydrological sciences journal 43, 937–946.

Pettitt, A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. J R Stat Soc Ser C Appl Stat 28, 126–135.

Pontius Jr, R.G., 2000. Comparison of categorical maps. Photogramm. Eng. Remote Sens 66, 0.

Protection, L.C., 2020. Rapport d'évaluation multisectorielle dans le territoire de Lubero. Lubero.

Shit, P.K., Pourghasemi, H.R., Adhikary, P.P., Bhunia, G.S., Sati, V.P., 2021. Forest resources resilience and conflicts. Elsevier.

Smith, G.M., Milton, E.J., 1999. The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. Int J Remote Sens 20, 2653–2662.

Syphard, A.D., Rustigian-Romsos, H., Mann, M., Conlisk, E., Moritz, M.A., Ackerly, D., 2019. The relative influence of climate and housing development on current and projected future fire patterns and structure loss across three California landscapes. Global Environmental Change 56, 41–55. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.03.007

Tchatchou, B., Sonwa, D.J., Ifo, S., Tiani, A.M., 2015. Déforestation et dégradation des forêts dans le Bassin du Congo : État des lieux, causes actuelles et perspectives. CIFOR.

Tungi Tungi, L.J., Madibi, M.P., Nsimba, N.É., Lutete, L.É., Lendo, M.C., Baraka, L., Ndiyo, E.S., Lumbuenamo, S.R., Tshimanga, M.R., Mwamba, T.C., 2021. Impact de la croissance démographique et de l'expansion urbaine sur la dynamique forestière des zones environnantes de la ville de Kikwit en République Démocratique du Congo. Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture 4, 16–30.

Webster, R., Oliver, M.A., 2007. Geostatistics for environmental scientists. John Wiley & Sons.

WWF, 2019. Évaluation de l'impact d'une décennie d'efforts visant à réduire la déforestation dans et autour du parc national des Virunga, province du Nord-Kivu.

Yuan, F., Bauer, M.E., 2007. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. Remote Sens Environ 106, 375–386.