

Cartographie de la dynamique de l'occupation du sol dans la concession de l'INERA-Yangambi en RDC

T. MBAVUMOJA¹, A. J. EBUY¹, K.J. MASIMO¹

(Reçu le 04/10/2021; Accepté le 09/01/2022)

Résumé

La RD Congo dispose des vastes étendues forestières qui contribuent au bien-être des populations riveraines et à la régulation du climat. Mais, il y a plusieurs décennies que ces forêts sont soumises à une forte pression anthropique avec comme conséquences la déforestation et la fragmentation de ces écosystèmes forestiers. La région de Yangambi, une des plus riches des régions forestières en RD Congo subit aussi les mêmes situations liées à la déforestation et à la fragmentation d'habitat. C'est pourquoi le but de cette étude est de faire une analyse cartographique et quantitative par télédétection de la dynamique de l'occupation du sol dans la concession de l'INERA-Yangambi. La classification par objet avec l'approche supervisée des images Landsat a permis de caractériser l'occupation du sol en trois dates (1990, 2010 et 2018). Pour des raisons d'étude, six classes d'occupation du sol ont été retenues en fonction des réalités sur terrain : le bâti/sol nu, le complexe agricole, les friches, les plantations, la forêt secondaire et la forêt primaire. L'analyse de la dynamique du paysage et de la fragmentation s'est faite par le biais des matrices de transitions, et de certains indices de la structure spatiale du paysage. Les résultats obtenus ont montré qu'il y a eu un changement dans l'occupation du sol en l'espace de 28 ans. Nous avons aussi constaté que les formations forestières (forêt primaire et forêt secondaire) ont connu une régression significative au profit des classes anthropiques (bâti/sol nu et complexe agricole), avec un taux de déforestation annuel de 1990-2010, de 2010-2018 et de 1990 et 2018 estimé à 0,29 %, 0,96 % et 0,89 % respectivement. Il faut noter aussi qu'il y a eu fragmentation progressive des forêts (primaires et secondaire) mis en évidence par l'augmentation continue du nombre des taches, la diminution de la densité des périmètres des taches et la diminution impressionnante de leur aire moyenne. Aussi, la distance moyenne entre deux taches voisines a augmenté indiquant ainsi un isolement accru des taches. Ces résultats suggèrent la nécessité de la mise en place d'un plan d'aménagement en vue de la gestion durable de la concession et des ressources naturelles qui s'y trouvent.

Mots clés: Dynamique paysagère, occupation du sol, déforestation, fragmentation du paysage, télédétection, structure spatiale

Mapping the dynamics of land use in the INERA-Yangambi concession in the DRC

Abstract

The DR Congo has vast tracts of forest that contribute to the well-being of the local population and to climate regulation. However, for several decades now, these forests have been subject to strong anthropic pressure, resulting in deforestation and the fragmentation of these forest ecosystems. The Yangambi region, one of the richest forest regions in DR Congo, is also suffering from the same situations related to deforestation and habitat fragmentation. This is why the aim of this study is to carry out a cartographic and quantitative analysis by remote sensing of the dynamics of land use in the INERA-Yangambi concession. The classification by object with the supervised approach of Landsat images allowed to characterize the land cover in three dates (1990, 2010 and 2018). For study purposes, six land cover classes were selected according to the realities on the ground: built/bare ground, agricultural complex, wasteland, plantations, secondary forest and primary forest. The analysis of landscape dynamics and fragmentation was carried out by means of transition matrices and certain indices of the spatial structure of the landscape. The results showed that there was a change in land use over a period of 28 years. We also found that forest formations (primary forest and secondary forest) have experienced a significant regression in favour of anthropogenic classes (built/bare ground and agricultural complex), with an annual deforestation rate from 1990-2010, 2010-2018 and 1990 and 2018 estimated at 0.29%, 0.96% and 0.89% respectively. It should also be noted that there has been a progressive fragmentation of forests (primary and secondary) evidenced by the continuous increase in the number of patches, the decrease in the density of patch perimeters and the impressive decrease in their average area. Also, the average distance between two neighboring patches has increased, indicating an increased isolation of patches. These results suggest the need for a management plan for the sustainable management of the concession and its natural resources.

Keywords: Landscape dynamics, land use, deforestation, landscape fragmentation, remote sensing, spatial structure

INTRODUCTION

Les récentes études ont montré que les forêts de la R.D. Congo se sont fortement dégradées sous diverses pressions anthropiques (Bamba, 2010; Mikwa, 2010; Iyongo, 2013; Masimo, 2015). La plupart de ces écosystèmes forestiers sont en train de subir une anthropisation plus ou moins sévère, entraînant leur fragmentation accompagnée des impacts négatifs, à l'échelle locale et régionale (Barima, 2009). La région de Yangambi est un centre de recherche agricole et forestière en République Démocratique du Congo. Il est connu dans le monde comme une réserve de la biosphère qui attire l'attention des scientifiques depuis des décennies à cause de sa biodiversité. Cette dernière, subirait une pression anthropique sans précédent au cours de ces dix dernières années.

Un certain nombre d'études menées dans cette région, portant sur l'évolution de l'occupation du sol, lançaient déjà une alerte selon laquelle les activités humaines exercent une pres-

sion sur cette réserve de biosphère (FACET, 2010; Mbemba, 2012; Alongo, 2013). Ces pressions se matérialisent par des changements d'occupation du sol, qui se traduisent à l'échelle locale par la disparition progressive des différentes agrégations forestières (espaces forestiers et non forestiers en passant par des lisières) (FACET, 2010; Alongo, 2013).

Notre contribution s'inscrit dans ce contexte, pour essayer d'estimer les différents changements observés depuis les années 1990 jusqu'aux années 2018. Le but de cette étude est d'en faire une analyse cartographique et quantitative de la dynamique de l'occupation du sol de la concession de l'INERA-Yangambi afin de mettre en évidence les différents changements observés dans l'espace et dans le temps. L'objectif de cette étude est d'estimer l'évolution de l'occupation du sol en fonction des données disponibles dans le temps et, cartographier et quantifier cette dynamique paysagère afin de mettre en évidence le taux annuel de déboisement estimé (déforestation et dégradation).

¹ Université de Kisangani, Faculté de gestion des ressources naturelles renouvelables, RDC

Les résultats obtenus aideront la province de la Tshopo à comprendre les phénomènes spécifiques liés à la déforestation et à la dégradation afin de mettre en place des stratégies du développement durable (estimation de niveau de référence des émissions et absorptions).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Site d'étude

La zone d'étude se situe dans l'actuelle province de la Tshopo en RD Congo, plus exactement dans le territoire d'Isangi, secteur de Turumbu, à 100 kilomètres au nord-est de la ville de Kisangani. Elle couvre une superficie d'environ 2440 ha soit 24 400 000 Km² et jouit d'un climat de type Af (climat équatorial) suivant la classification de Köppen. Les précipitations annuelles moyennes oscillent autour de 1815 mm (Ebuy, 2009; Toirambe, 2011) avec au moins 172 jours où il pleut en moyenne une fois tous les deux jours (station de climatologie de Yangambi). La moyenne maximale annuelle des températures est de 30,3°C, la moyenne minimale annuelle est de 20°C et la valeur moyenne entre les deux extrêmes est de 25,2°C; les trois gammes de températures restent presque constantes toute l'année, ne montrant que de très faibles amplitudes (Alongo, 2007; Ebuy, 2009; Toirambe, 2011). Sur le plan hydrographique, la zone d'étude est traversée par plusieurs cours d'eau (Lusambila, Itasukulu, Isalowe, Boto, etc.) qui forment cinq sous-bassins versants dont les eaux se déversent dans le fleuve Congo. Selon Kombele (2004), les types de végétation à Yangambi peuvent être rassemblés dans deux groupes principaux: les types de végétation non modifiée (caractérisée par la forêt semi-caducifoliée, la forêt climacique et ombrophile sem-

pervirente lourde) et celui de types de végétation modifiée ou anthropisée (caractérisée par les recrus forestiers, la parasoleraie, les forêts secondaires et remaniées, les friches herbeuses, les groupements artificiels) (Van Wambeke *et al.*, 1956; Kombele, 2004). La carte ci-dessous permet de circonscrire la zone d'étude.

Acquisition des images satellitaires

Dans le cadre de cette étude, cinq images satellitaires de la série Landsat (Thematic Mapper – TM, Enhanced Thematic Mapper plus - ETM+ et Operational Land Imager – OLI) ont été utilisées pour cartographier la dynamique de l'occupation du sol dans cette concession.

Les images téléchargées sur le site de l'United States Geological Survey (USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>)) ont permis d'apporter la lumière sur la dynamique de l'occupation du paysage en trois dates : 1990, 2010 et 2018. Ces dates ont été choisies pour couvrir une période assez longue (échantillonnage), mais aussi en fonction de la disponibilité des données dans le site ressource (USGS).

Traitements des images

Les mosaïques ont été réalisées en veillant à éliminer les nuages et les voiles, autant que possible, en retenant les portions d'images de meilleure qualité. La création des masques a permis de mettre à l'écart toutes les parties des images qui ne sont pas concernées par l'étude.

Pour une meilleure discrimination de la végétation, les compositions colorées ont été visualisées à partir du logiciel ENVI Zoom en couleurs naturelles (rouge, proche-infra-rouge et l'infrarouge respectivement pour les canaux rouge, vert et bleu). Pour les mosaïques issues des capteurs

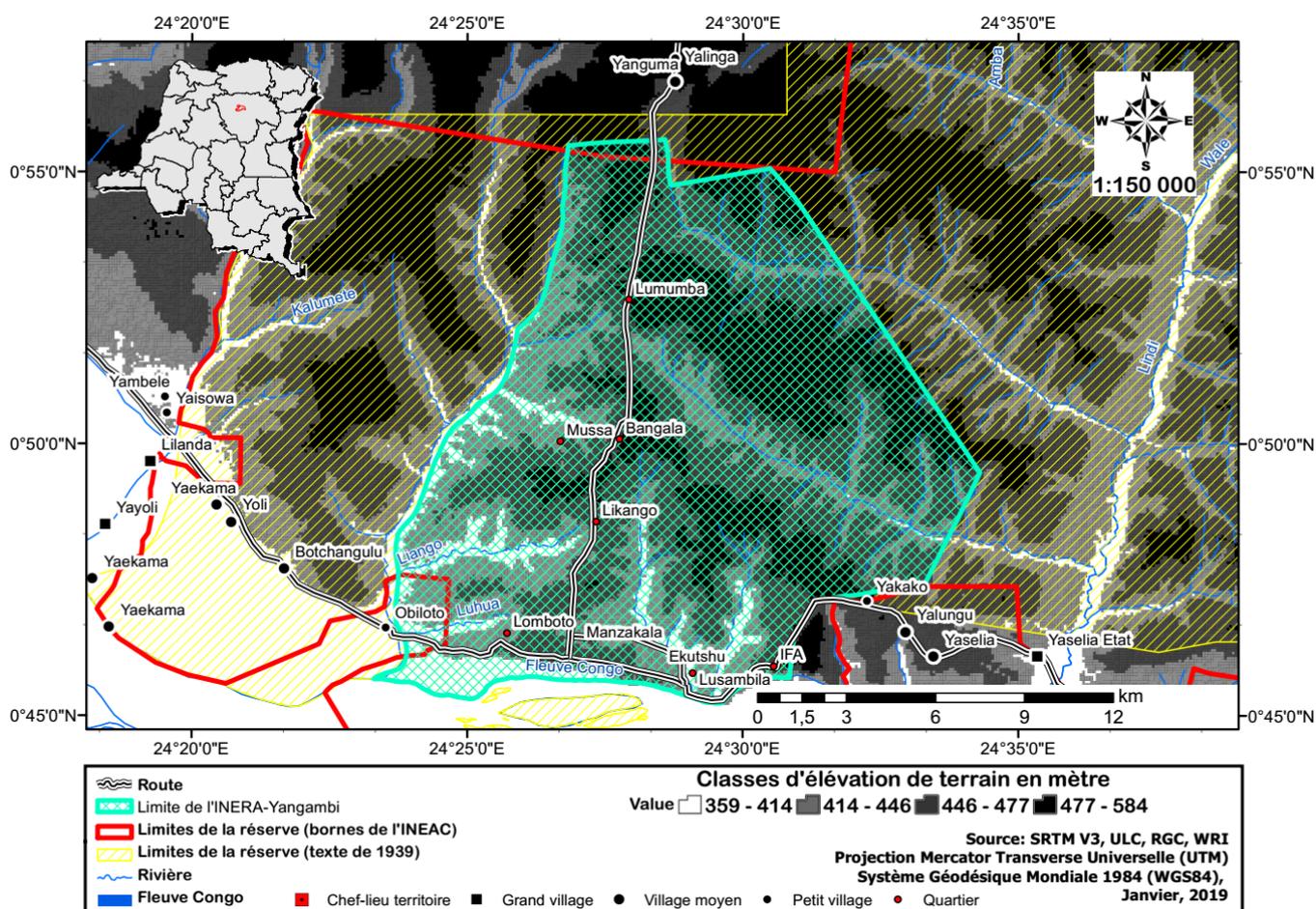


Figure 1: Carte géographique de la concession de l'INERA-Yangambi

TM (1990) et ETM+ (2010), les bandes 3, 4 et 5 ont été utilisées. Par ailleurs, la mosaïque de 2018, issue des images OLI, a nécessité l'utilisation des bandes 4, 5 et 6.

Ces compositions colorées ont permis la meilleure discrimination des patrons spatiaux. L'extraction de la zone d'étude sur les scènes et les images composites ont été créées dans le logiciel ARCGIS 10.1.0.

La création des néo-canaux via le logiciel eCognition 9 correspond au calcul de deux indices de télédétection: l'Indice de Végétation de la Différence Normalisée (NDVI) et l'Indice de Bâti de la Différence Normalisée (NDBI).

L'Indice de Végétation de la Différence Normalisée est le rapport entre la différence des valeurs de réflectance de chaque pixel dans le canal (PIR) et le canal 2 (R) et leur somme (Ilunga, 2012):

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

Cet indice est particulièrement utile pour distinguer les espaces bâtis ou défrichés des espaces encore couverts par la végétation.

L'Indice de Bâti de la Différence Normalisée est le rapport entre la différence des valeurs de réflectance de chaque pixel dans le canal 4 (MIR) et le canal 3 (PIR) et leur somme:

$$NDBI = \frac{MIR - PIR}{MIR + PIR}$$

Cet indice permet de cartographier automatiquement les zones bâties. Cette méthode a été utilisée par le fait que les zones bâties ont une réponse spectrale unique.

En effet, une base des données, reprenant 1583 coordonnées géographiques («waypoints»), a servi à la caractérisation et la validation de l'occupation de la zone d'étude.

Le mois de janvier 2018 était le moment favorable (faible nébulosité) pour la récolte de données, coordonnées géographiques ont été mises à part pour la calibration de la classification supervisée.

Le reste des coordonnées géographiques a servi à la validation de la classification. Les critères de validation des cartes d'occupations du sol retenus pour cette étude, comprennent la précision globale de classification et le coefficient Kappa (Skupinski *et al.*, 2009; Pontius, 2000).

Classification orientée-objet des images

Les cartes d'occupation du sol dans cette étude s'est appuyée sur la méthode de classification orientée-objet, parce qu'elle ne traite pas des pixels de manière isolée mais les regroupe en tant qu'objet (Vigneau, 2010 cité par El Zerey, 2014). En plus, elle est plus objective que la classification par pixel, car elle nous a permis de mieux détecter les différents types d'occupation du sol. En outre, cette analyse s'est avérée appropriée parce qu'elle nous a permis à bien distinguer les plantations aux classes forestières avec beaucoup plus de précision, bien qu'elles soient des classes ayant la même signature spectrale.

La démarche de la classification sous ce logiciel eCognition9 se fait en deux étapes: la segmentation et la classification.

Segmentation

La première étape a consisté à choisir le critère de la segmentation de l'image. Le logiciel eCognition9 propose plusieurs critères de segmentation d'image (Elmi, 2016). Concernant cette étude, c'est le critère «multi résolution-segmentation» qui a été choisi, parce que le principe se base sur une méthode ascendante de croissance de région. La deuxième étape a consisté à la définition des paramètres (l'échelle de segmentation, poids de la bande spectrale, les ratios de couleur/forme et de compacité/lissage des objets (Benz *et al.*, 2004 cités par Thi-Thanh-Hièn et Dong-Chen, 2013), puis une échelle appropriée pour chacune des classes (échelle grossière 100, 80 et 60 vers l'échelle plus fines 50 à 5). Ces ratios ont été ensuite graduellement modifiés pour atteindre un niveau et une échelle acceptable.

Après analyse, le comportement spectral des plantations était proche de ce des forêts secondaires et des forêts primaires.

Pour distinguer les plantations des forêts, deux segmentations ont été réalisées : premièrement à l'échelle du paysage sur la base de l'image brute et secondairement à l'échelle des plantations. Il est à noter que nous avons aussi ajouté la bande NDVI (L'Indice de Végétation de la Différence Normalisée) et le NDBI (L'Indice de Bâti de la Différence Normalisée) en plus des bandes spectrales d'origine de l'image.

Classification

La classification a consisté à étiqueter chacun des segments obtenus avec la classe de référence qui lui correspond, identifiée préalablement dans une nomenclature (Vigneau, 2010 cité par El Zerey, 2014).

La classification s'est faite en deux étapes: l'affectation des objets à leurs classes respectives en définissant des seuils, par la suite, les objets de chaque classe peuvent être fusionnés soit par l'approche du plus proche voisin ou par une fonction d'appartenance définie par l'utilisateur.

Cependant, la grande limite de cette méthode réside dans son incapacité à détecter les changements d'occupation du sol observés sur des surfaces inférieures à 0,09 ha. Cette limite est liée à la résolution des images satellites utilisées qui est de 30 mètres.

Validation des cartes d'occupation du sol

En fonction des dates, trois matrices de confusion ont été produites pour évaluer la qualité intrinsèque des classifications. En effet, elles ont permis de calculer les pourcentages d'erreur d'omission et la Moyenne des Pourcentages des Pixels Correctement Classés et le coefficient Kappa (Cohen *et al.*, 1960, Caloz *et al.*, 2001 cités par Masimo, 2015). Le tableau 1 présente les résultats d'estimation de la qualité des classifications.

Tableau 1: Estimation de la qualité des classifications

Année	MPCC (%)	Kappa
1990	80	0.81
2010	85	0.83
2018	87	0.90

Ces matrices de confusion, nous ont permis de constater que le coefficient Kappa est de 0,81 entre les années 1990 et 2010 et légèrement supérieur en 2018. La mesure d'exactitude ou la MPCC (Moyenne des pixels correctement classifiés) est compris entre 80 et 87 % pour les trois périodes.

Analyse de la dynamique paysagère

Matrice de transition

Les matrices de transitions ont permis de synthétiser les changements observés en deux dates (1990 et 2018). Elles ont été obtenues suite à l'opération de superposition des deux cartes d'occupation du sol. En effet, cette matrice a permis de décrire de manière condensée, la dynamique de changements de l'occupation du sol pendant la période d'observation entre ces deux dates.

Indices de la structure spatiale

Ces indices nous ont permis de mesurer la fragmentation des classes forestières ainsi que l'agrégation des classes anthropiques (présentation des indices).

Taux de déforestation

Le taux de déforestation annuel résulte du rapport entre la surface défrichée sur une période, divisée par la surface forestière initiale et par le nombre d'années de la période. La formule standardisée proposée par Puyravaud, (2002) a été adoptée pour calculer le taux de déforestation annuel pour cette étude.

$$\theta = -\frac{1}{t_2 - t_1} \ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right) * 100$$

Avec:

A1= superficie forestière de l'année initiale;

A2 = superficie forestière de l'année finale;

t1 = date d'acquisition exacte de l'image pour l'année initiale;

t2= date d'acquisition exacte de l'image pour l'année finale.

Tableau 2: Indices de la structure spatiale

Métriques	Unité	Intervalle
Nombre de fragments (NP)	Sans	
Densité de périmètre (ED)	M Ha	$ED \geq 0$
Indice d'agrégation (AI)	%	$0 \leq AI \leq 100$
Aire moyenne des taches (MPS)	Hectare	
IJI	%	$0=IJI=100$
MNN	Mètre	> 0

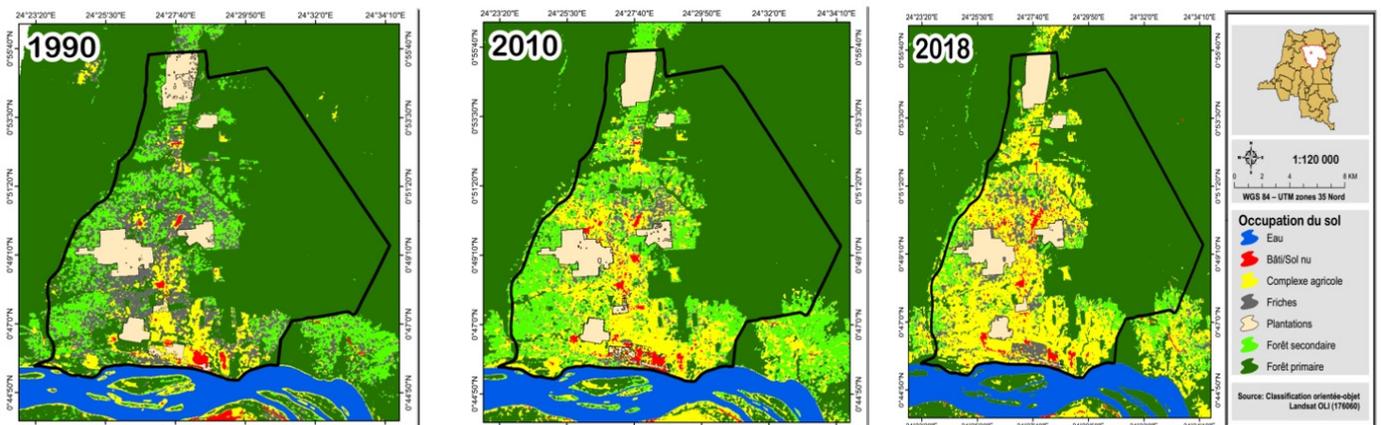


Figure 2: Carte d'occupation du sol de la concession de l'INERA-Yangambi entre 1990 et 2018

RÉSULTATS

Cartographie de la dynamique de l'occupation du sol

Les différents traitements des images Landsat de trois périodes d'observation (1990, 2010 et 2018) ont aboutis à la réalisation des cartes d'occupation du sol présentées ci-dessous par la figure 2.

L'occupation du sol a été cartographiée en sept classes distinctes. Il s'agit des classes: l'eau, bâti/sol nu, complexe agricole, friches, plantations, forêt secondaire et forêt primaire.

Les classes forestières (forêt primaire et forêt secondaire) occupent une grande proportion du paysage, suivies des classes anthropiques (complexe agricole, bâti/sol nu, friches et les plantations) et enfin l'eau qui a une petite proportion et reste régulièrement stable toutes les années.

Dynamique de l'occupation du sol

L'évolution de l'occupation du sol en trois dates d'analyse (1990, 2010 et 2018) comme le montre la figure 3.

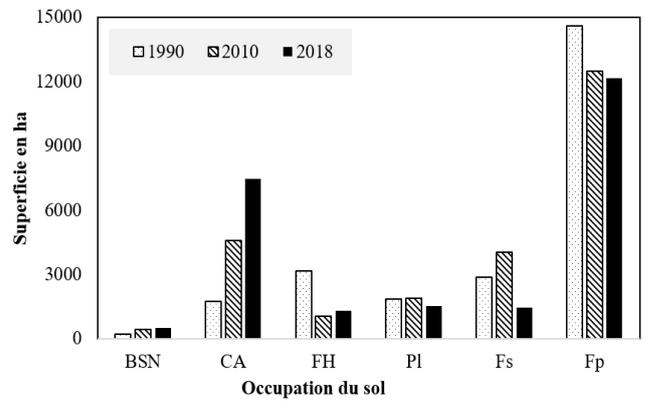


Figure 3: Dynamique de l'occupation du sol
Légende: BNS (bâti/sol nu), CA (complexe agricole), FH (friches), PI (plantations), Fs (forêt secondaire) et Fp (forêt primaire)

Il ressort de cette figure que la forêt primaire domine le paysage en termes de superficie comparée aux autres classes d'occupation du sol. Cependant, sa superficie connaît une régression considérable entre 1990 et 2018. Par contre, nous avons observé une augmentation importante de la superficie des forêts secondaires entre 1990 et 2010, puis une diminution spectaculaire de ces forêts entre 2010 et 2018. La classe de complexe agricole a connu des changements notables en termes de superficie, soit trois fois plus en 2010 et 2018 que l'année 1990. Les friches ont connu une forte régression entre 1990 et 2010, puis une augmentation non négligeable entre 2010 et 2018.

Les plantations sont restées généralement stables entre 1990 et 2010 et par la suite elles ont connu une perte entre 2010 et 2018 suite aux pressions anthropiques. Le bâti/sol nu a augmenté de façon importante, mais à des proportions faibles pendant les périodes d'observation.

La zone de protection intégrale a été explorée comme une composante à part entière pour cette étude. Elle est présentée dans la figure 4 ci-dessous de la dynamique de l'occupation du sol de cette composante (tendances de changements). La figure 4 présente la dynamique de l'occupation du sol en fonction de la réserve floristique.

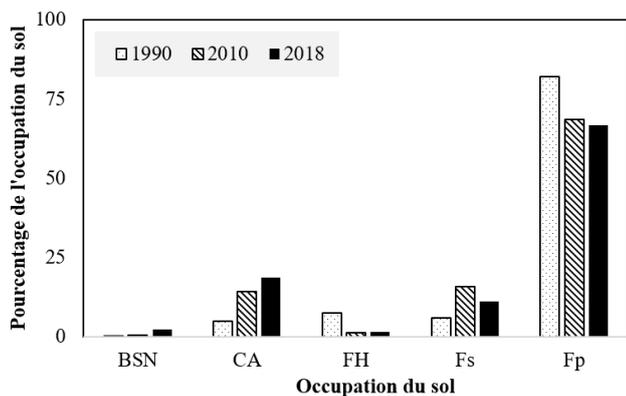


Figure 4: Dynamique de l'occupation du sol en fonction de la réserve floristique

Légende: BNS (bâti/sol nu), CA (complexe agricole), FH (friches), PI (plantations), Fs (forêt secondaire) et Fp (forêt primaire)

Il ressort de cette figure que la réserve floristique de la concession se dégrade et diminue au cours des années au profit des classes anthropiques. On observe des changements similaires comme dans la figure 4 présentée ci-haut pour la dynamique des forêts primaires, des forêts secondaires et des friches. Le complexe agricole et bâti/sol nus ont connu une augmentation au cours des années d'étude.

Dynamique paysagère de l'occupation du sol

Le tableau 3 présente les changements globaux observés entre 1990 et 2018.

Les colonnes de cette matrice représentent les états d'occupation du sol à l'année initiale et les lignes correspondent à ceux de l'année finale. Les cellules de la diagonale (en gras) correspondent aux surfaces n'ayant pas modifié leur état entre les années initiale et finale (zones stables) et les éléments hors de la diagonale indiquent les changements d'occupation du sol. Les contenus des cellules représentent la surface en pourcentage d'un type d'occupation du sol (ligne) à l'année initiale ayant passé à un autre type d'occupation année finale (colonne).

La proportion des forêts primaires stable durant les périodes d'observation est largement plus importante que toutes les autres classes d'occupation du sol (Tableau 3). Le taux des plantations resté intact est en seconde position et est légèrement supérieur que celui de bâti/sol nu et du complexe agricole, des friches et de la forêt secondaire.

Du point de vue quantitatif, la superficie de complexe agricole est passée de 7,64 % en 1990 à 30,2 % en 2018 (soit une augmentation de 22,67 %); par contre, celle de la forêt primaire passe de 57,9 % à 48,2 en 2018 (une réduction d'environ 9,65 %). Suite aux effets anthropiques, les plantations et les friches ont connues une réduction respectivement de 2,43 % et de 6,1 % (les plantations passent de 9,68 % en 1990 à 9,25 % en 2018 et les friches de 12,4 % en 1990 à 6,45 % en 2018). La forêt secondaire est passée de 11,4 % en 1990 à 5,77 % en 2018 (soit une perte de 5,59 %) suite à l'élargissement des superficies agricoles dans la région.

Pour les autres périodes d'observations (entre 1990-2010 et entre 2010 et 2018) (non présentées), les matrices des changements sont explicitent les mêmes tendances que celles observées dans les périodes de 1990 et 2018.

Dynamique structurale de l'occupation du sol

Fragmentation des forêts

Les tableaux ci-dessous ne concernent que les forêts primaires et secondaires dans lesquelles les différentes tâches, les périmètres et les aires ont été estimés pour quantifier la fragmentation.

L'augmentation du nombre de taches (NP) et la diminution significative de la densité des périmètres (ED) ainsi que la superficie moyenne occupée par les forêts (MPS), sont des indices qui traduisent la fragmentation des forêts, surtout pour le cas de notre zone d'étude.

Tableau 3: Matrices des transitions entre 1990 et 2018

		1990						
Classe		BSN	CA	FH	PI	Fs	Fp	Total 2018
2018	BSN	0,54	0,64	0,48	0,13	0,17	0,15	2,11
	CA	0,29	5,78	8,67	1,59	6,11	7,77	30,2
	FH	0,07	0,66	1,84	0,76	2,02	1,10	6,45
	PI	0,01	0,15	0,01	7,04	0,02	0,02	7,25
	Fs	0,00	0,11	1,06	0,03	1,89	2,68	5,77
	Fp	0,00	0,30	0,49	0,13	1,15	46,1	48,2
Total 1990		0,91	7,64	12,5	9,68	11,4	57,9	100

Légende: (BNS: bâti/sol nu, CA: complexe agricole, FH: friches, PI: plantations, Fs: forêt secondaire et Fp: forêt primaire)

Le tableau 4 montre que dans les forêts primaires les nombres des taches (NP) ont augmenté entre les périodes d'observation (1990 et 2018), soit une augmentation de 213 taches. La lisière ou la zone moyenne entre les taches voisines les plus proches a connu une augmentation de 34,5 m (synonyme d'isolement accru des taches). Par contre, la densité du périmètre des forêts primaires diminue de 14,07 m/ha. Nous notons aussi que la superficie moyenne des taches des forêts primaires s'est rétrécie considérablement entre 1990 et 2018, soit une baisse de 5,63 ha.

En compilant ces éléments décrits ci-haut (NP, MNN et MPS), nous pouvons donc affirmer que la forêt primaire a connu une fragmentation avec un isolement accru des taches.

Donc, nous observons aussi presque la même tendance dans la forêt secondaire, mais les nombres de taches sont importants que dans la forêt primaire (Tableau 5).

Avec une augmentation de nombre des taches de 98 taches entre 1990 et 2018. La distance entre ces taches est de l'ordre de 0,62 m (situations de non isolement). Par contre, la densité du périmètre pour la forêt secondaire diminue de 13,5 m/ha, ce qui confirme une situation de fragmentation de cette partie de la zone d'étude.

Estimation du taux annuel de la déforestation des forêts entre 1990 et 2018

Le tableau 6 présente les superficies des forêts perdues et l'évolution des taux de déforestation entre 1990 et 2010, 2010 et 2018 ainsi qu'entre 1990 et 2018.

Ces résultats montrent que les forêts de la zone d'étude connaissent un taux de déforestation qui varie chaque année. La perte des forêts est évaluée à 971 ha entre 1990 et 2010, avec un taux annuel de déforestation relativement faible de 0,23 % chaque année. Le taux annuel de la déforestation augmente entre 2010 et 2018 (soit de 0,96 %; avec une perte de 2892 ha chaque année) comparativement à celui observé entre 1990 et 2010.

Globalement, entre 1990 et 2018, les forêts ont connu une perte importante de 3863 ha, avec comme conséquence un taux annuel de déforestation élevé estimé à 0,89 % chaque année.

DISCUSSION

La présente étude avait comme objectif global cartographier et quantifier la dynamique de l'occupation du sol dans la concession de l'INERA-Yangambi en République Démocratique du Congo, parce que jusque-là aucune étude de ce genre n'a été réalisée dans cette concession. Six images Landsat datant respectivement de 1990, 2010 et 2018 ont été comparées.

Le choix de la classification orientée-objet se justifie dans le but de cartographier au mieux l'occupation biophysique de la zone d'étude. L'approche de classification orientée-objet a présenté un avantage notamment en facilitant la distinction des plantations et des classes forestières avec beaucoup plus de précision, bien qu'ayant toutes les deux la même signature spectrale. À la différence de la classification par pixel utilisée par plusieurs auteurs pour apprécier les changements d'occupation du sol (Bamba *et al.*, 2008; Ilunga, 2012; Katembera, 2013; Masimo, 2015), la méthode basée sur l'approche orientée-objet regroupe les pixels selon leur appartenance à des régions homogènes en tenant compte à la fois de leur caractéristiques spectrale, spatiale, morphologique, texturale, contextuelle, temporelle et thématique (Godefroid, 2009).

Godefroid (2009), a aussi appliqué cette analyse orientée objet dans son étude sur la distribution végétale et leur utilisation par les populations locales dans le cadre de la gestion du parc national d'Omo en Éthiopie.

Elle a trouvé que la classification orientée-objet a donné des meilleurs résultats concernant la cartographie du parc par rapport à la classification par pixel. L'occupation du sol a été modélisée en sept classes. À cet effet, trois cartes

Tableau 4: Mesure de la fragmentation des forêts primaires

Forêts	Années	Tache		Périmètre	Aire (ha)
		NP (#)	MNN (m)	ED (m/ha)	MPS
Forêt primaire	1990	427	106,0	32,6	28,4
	2010	509	135,5	21,6	24,5
	2018	640	140,5	18,6	22,8
2018 – 1990		213	34,5	-14,1	-5,63

Légende: NP (Nombre des taches); MNN (Distance entre le nombre des taches); ED (Densité du périmètre); MPS (Aire moyenne des taches).

Tableau 5: Mesures de la fragmentation des forêts secondaires

Forêts	Années	Tache		Périmètre	Aire (ha)
		NP (#)	MNN (m)	ED (m/ha)	MPS
Forêt secondaire	1990	573	136,1	31,6	4,27
	2010	609	121,7	35,6	6,61
	2018	671	136,8	18,0	2,53
2018 – 1990		98	0,62	-13,5	-1,73

Légende: NP (Nombre des taches); MNN (Distance entre le nombre des taches); ED (Densité du périmètre); MPS (Aire moyenne des taches).

Tableau 6: Estimation du taux annuel de la déforestation

Classes	1990-2010		2010-2018		1990-2018	
	Perte en ha	Taux en %	Perte en ha	Taux en %	Perte en ha	Taux en %
Forêt secondaire	+1159	+1,7	2570	12,7	1411	2,42
Forêt primaire	-2130	-0,79	321	0,33	2452	0,66
Total des Forêts	-971	-0,29	2892	0,96	3863	0,89

d'occupation du sol ont été produites suivant les différentes années. Les différentes matrices de transition produites dans ce travail, explicitent plusieurs tendances possibles, qui stipulent que toutes les classes d'occupation du sol ont subi des transitions ou des dynamismes importants durant les 28 années écoulées. Comme exemple de ces dynamismes, la forêt primaire a connu une régression entre 1990 et 2010, 2010 et 2018 et 1990 et 2018. Elle a aussi subi une transformation progressive de ses superficies au profit du complexe agricole, de bâti/sol nu et de forêt secondaire. La forêt secondaire quant à elle, a connu une progression entre 1990 et 2010, mais elle finit par régresser entre 2010 et 2018 et entre 1990 et 2018 et se convertit largement en complexe agricole. Cette progression de la forêt secondaire entre 1990 et 2010 serait due au fait que pendant cette période, il y a eu des guerres et des rebellions. Et ces dernières ne permettaient pas à la population de pratiquer normalement ses activités (agriculture, exploitation artisanale du bois, etc.), d'où la pression sur les étendues forestières s'est ralentie. Durant cette même décennie, les friches ont augmenté jusqu'à atteindre la maturité puis se convertir en forêt secondaire.

Les matrices de transitions ont donc montré que, durant les 28 années d'observation de l'évolution de l'occupation du sol de la concession, d'importantes transformations au niveau des classes forestières se sont opérées au profit des classes anthropisées (bâti/sol nu, complexe agricole), qui, quant à elles, ont connu une forte extension au cours des années. C'est ce qui explique que la tendance de la dynamique du couvert forestier se solde à une régression importante en quantité dans le temps et se convertit en zones anthropiques au cours de 28 ans.

Cette tendance régressive des classes forestières au profit des classes anthropiques est également relevée par de nombreuses études en RDC (Bamba *et al.*, 2008; Mikwa, 2010, Katembera, 2013). La réduction des classes forestières serait donc due à l'explosion démographique, qui pousse la population à la recherche de nouvelles terres agricoles afin de compenser la baisse des rendements causée par un temps court de jachère (Masimo, 2015; Kio, 1984).

Nous avons noté aussi une diminution nette des friches en 2018, tout simplement parce que les gens manquent de terre où couper, alors ils s'attaquent aux friches et aussi aux forêts. Les études menées par Mbemba (2012) et Tshomba (2016) ont eu à démontrer ces phénomènes dans la réserve de biosphère de Yangambi. Tout ceci traduit en effet, l'ampleur de l'anthropisation dans la zone d'étude durant cette période de 28 ans.

De nombreux indices ont été proposés pour quantifier et mesurer la structure paysagère (McGarigal & Marks, 1995; Barima, 2009; Bamba, 2010; Mikwa, 2010). Dans cette étude, huit indices ont été utilisés découlant directement de la définition de la fragmentation. Cette dernière entraîne une réduction de l'aire totale (MPS, ED) et l'isolement des taches (MNN) ainsi que l'augmentation de leur nombre (NP). Ce sont donc ces variables que nous avons mesurées et analysées.

L'existence de corrélation entre ces indices, même si elle indique une redondance de l'information (Bogaert et Hong, 2003), constitue un argument pour mettre en évidence le fait que les observations ne sont pas dues au hasard.

Plusieurs auteurs ont eu à utiliser ces indices pour mesurer les changements et quantifier la dynamique paysagère et structurale (Bogaert et Hong, 2003; Casado, 2007, Barima, 2009; Bamba, 2010; Mikwa, 2010; Defouny *et al.*, 2008). Les résultats trouvés ont montré qu'en compilant tous ces indices, nous remarquons que les deux classes des forêts (primaires et secondaires) ont connu la fragmentation, mais avec des ampleurs différentes. Cela peut être due à: (i) la différence significative de nombre des taches entre les classes, (ii) la différence de la distance entre les taches par classe, (iii) la différence de la densité du périmètre entre les classes et (iv) la moyenne de l'aire entre les classes.

L'analyse de variance a permis de montrer que les aires moyennes des forêts secondaires sont statistiquement identiques sur l'ensemble de la période d'observation ($F=1,107$; $p=0,408$) et aussi qu'il n'y a pas de différence significative au seuil de 5 % entre les aires moyennes des forêts primaires en 1990, 2010 et 2018 (ANOVA; $F=1,162$; $p\text{-value} = 0,35$).

Bamba *et al.* (2008) et Mikwa, (2010), sont aussi parvenus à une conclusion similaire que la nôtre dans leurs études réalisées respectivement dans l'ex-province du Bas-Congo, l'ex-province de la Tshopo et dans la Réserve Forestière de Masako. Ils ont trouvé que les classes forestières se sont fragmentées suite aux pressions anthropiques.

Il revient à noter que la fragmentation des forêts se traduit aussi par la déforestation, raison pour laquelle le taux de déforestation du couvert forestier a été évalué dans cette étude. La formule standardisée proposée par Puyravaud (2002) a été adoptée pour calculer le taux de déforestation annuel pour cette étude. L'évaluation de la déforestation montre que les étendues des forêts (tant la forêt primaire que la forêt secondaire) ont été perdues en générale, avec un taux annuel de déforestation estimé à 0,89 % par année entre 1990 et 2018.

En détail, il a été observé une diminution importante de la forêt primaire entre 1990 et 2010, alors, que la forêt secondaire a connu une hausse sur la même période d'observation. Par contre, entre 2010 et 2018, la forêt secondaire a connu une perte très importante de sa superficie, estimée à 12,73 % comparativement à la forêt primaire. Entre 1990 et 2018, le taux de déforestation de la forêt secondaire reste toujours très élevé, soit 2,42 % par an. Les tendances montrent que la forêt secondaire a perdu plus d'étendue forestière avec un taux de déforestation très élevé par rapport à la forêt primaire durant la période d'observation. Cela s'explique par le fait que la forêt secondaire est proche de complexe rural et elle n'est pas épargnée par des fortes pressions des activités anthropiques principalement l'agriculture, l'exploitation artisanale du bois.

CONCLUSION

Les résultats obtenus dans cette montrent que le paysage étudié est soumis à une pression anthropique et connaît des changements en 28 ans. Ces résultats révèlent aussi une tendance à la déforestation et à la fragmentation des forêts, conduisant à l'expansion des zones anthropiques. Les forêts en général ont sensiblement régressé malgré une hausse de la classe forêt secondaire enregistrée entre 1990 et 2010, due à la maturation des friches. Ensuite la forêt secondaire a fini par connaître une forte diminution entre

2010 et 2018 (estimée à 12,71 %) et entre 1990 et 2018 (estimée à 2,42 %). En ce qui concerne le couvert forestier pris dans l'ensemble, le taux annuel de déforestation est estimé à 0,29 % entre 1990 et 2010, à 0,96 % entre 2010 et 2018 et à 0,89 % entre 1990 et 2018. Cette diminution des étendues forestières est due au mode d'exploitation non durable des terres caractérisé par l'agriculture itinérante sur brûlis avec des jachères de très courte durée. Cela conduit en effet, à une densification forte des zones anthropiques (bâti/sol nu et le complexe rurale), qui ont augmenté de superficie durant les périodes d'observation. Les indices de structure spatiale du paysage calculés indiquent que le paysage est un paysage anthropisé, et nous avons constaté deux processus dont la fragmentation des classes forestières et l'agrégation des classes anthropiques.

Ceci montre en effet, la menace que subit la concession, qui est soumise à une pression anthropique.

Compte tenu des résultats trouvés dans cette étude, la grande inquiétude réside sur la restauration du paysage qui perd de plus en plus des forêts, surtout plus particulièrement les forêts secondaires, celles qui occupent une place importante et centrale dans la procédure de la restauration des forêts.

Vu toutes ces menaces, nous proposons que l'INERA-Yangambi encadre effectivement l'exploitation des terres dans sa concession. La sensibilisation et l'amélioration du système agraire par des techniques d'agroforesterie convenables au milieu, doivent être au centre des stratégies de ses activités en vue de la création et du développement des forêts, surtout les forêts secondaires, afin de favoriser la gestion durable des ressources naturelles, desquelles la population pourra tirer les produits forestiers utiles pour leurs besoins.

Dans la même optique, nous recommandons que l'État congolais et les acteurs de gestion de l'INERA-Yangambi, veillent à l'application et au strict respect des normes qui régissent le secteur forestier afin d'induire une utilisation plus rationnelle et durable des ressources forestières dans le but de maintenir les services écologiques qu'elles rendent pour la survie de la population.

RÉFÉRENCES

- Achbun A., Mansour A., Mohammed Layelmam, Mohammed Faouzi Smiej (2011). Étude comparative de la classification orientée objet d'une image spot5 pour la cartographie de l'occupation du sol via eCognition® 9. *Geo Observateur 2011*, pp. 13.
- Alongo S. (2007). Étude de l'effet de lisières sur l'humidité équivalente et la température du sol d'un écosystème forestier de la cuvette centrale congolaise. (Cas de la réserve forestière «jardin systématique» de l'INERA à Yangambi); DEA à la Faculté des sciences, Université de Kisangani, 105p.
- Alongo S. (2013). Étude microclimatique et pédologique de l'effet de lisière en Cuvette centrale congolaise: impact écologique de la fragmentation des écosystèmes. Cas des séries Yangambi et Yakonde à la région de Yangambi (R.D. Congo). Thèse, ULB, Service d'Ecologie du paysage et Systèmes de Production Végétale, 344p.
- Bamba I. (2010). Influence de la densité de la population sur la structure spatiale d'un paysage forestier dans le bassin du Congo en R. D. Congo. *Tropical Conservation Science*, 3 :31-44.
- Bamba I. (2010). Anthropisation et dynamique spatio-temporelle de paysages forestiers en RDC, Thèse, Université Libre de Bruxelles, 205 p.
- Bamba I., Mama A; Neuba D.F.R; Visser M (2008). Influence des actions anthropiques sur la dynamique spatiotemporelle de l'occupation du sol dans la province du Bas-Congo (R.D. Congo). *Sciences & Nature*, 5: 49-60.
- Barima S. (2009). Dynamique, fragmentation et diversité végétale des paysages forestiers en milieu de transition forêt-savane dans le département de Tenda à Côte d'Ivoire, Thèse, ULB, 196 p.
- Bogaert J. & Hong S.K., (2003). Landscape ecology: monitoring landscape dynamics using spatial pattern metrics, In *Ecological Issues in a Changing World*, (eds. Hong, S.K.; Lee, J.A.; Ihm B.S.; Farina A.; Son Y.; Kim E.S. & Choe J.C), pp. 109-131. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht,
- Burel F. & Baudry., (1999). *Écologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*. Tec & Doc, Paris, France.
- Bwanzani J. (2016). Analyse diachronique du paysage forestier et des paramètres climatiques dans le territoire de LISALA dans une perspective de gestion durable des forêts (GDF), Université de Kisangani, Faculté de gestion des ressources naturelles renouvelables, TFE, 105p.
- Casado A., (2007). Étude de la structure et de la dynamique des paysages de montagne, exemple du bassin versant de La Voireuze, affluent de l'Alagnon entre 1948 et 2000. Laboratoire de géographie physique UMR 6042 – CNRS Université Blaise Pascal, 51p.
- CCT (2009). Notions fondamentales de télédétection. Ressources naturelles Canada, (Online at <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>).
- Communautés européennes, (2001). Manuel des concepts relatifs aux systèmes d'information sur l'occupation et l'utilisation des sols. Office des publications officielles des Communautés européennes. Luxembourg, 110 p.
- Corgne S., (2005). Modélisation prédictive de l'occupation des sols en contexte agricole intensif, application à la couverture hivernale des sols en Bretagne. Thèse, Université de Rennes 2 Haute-Bretagne, 120p.
- De Wasseige C., (2008). La question des zones tampons autour du parc national des virunga: principes de base et délimitation. *Revue des questions scientifiques*, CL XXVIII: 99-110.
- De Wasseige C., de Marcken P., Bayol N., Hiol F., et Mayaux Ph., Desclée B., Nasi R., Billand A., Defourny P. et Eba'aAtyi R. (2012). Les forêts du bassin du Congo – État des Forêts 2010, Office des publications de l'Union Européenne. Luxembourg. 276 p.
- Defourny P., Delhage C., & Kibambe L. (2011). Analyse quantitative des causes de la déforestation et de la dégradation des forêts en République Démocratique du Congo. Rapport final; ULC/ELI-Géomatique Université Catholique de Louvain Louvain-la-Neuve, Belgique, 104p.
- Ebuy J. (2009). Estimation du stockage de carbone dans les plantations de l'I. N.E.R.A.-Yangambi à Yangambi (R.D. Congo): Cas d'*Aulranella congolensis* (De Wild). A. Chev., de Gilbertiodendron dewevrei (De Wild) J. Léonard et «Drypetes likwa (J. Léonard. Nomen)», Mémoire DES, Faculté de gestion des ressources naturelles renouvelables, Université de Kisangani, 102p.
- El Zerey W, (2014). Étude diachronique de la régression du couvert forestier de la plaine de Telagh (Algérie): approche par télédétection et SIG. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Vie*, 36: 25-31.
- Ernst C; Verhegghen A; Bodart C; Mayaux P; De Wasseige C; Bararwandika A; Begoto G., EsonoMba F; Ibara M; KondjoShoko A; KoyKondjo H; Makak J.S; MenomoBiang J.D; Musampa C; NcogoMotogoR; NebaShu G; Nkoumakali B; Ouissika C.B et Defourny P (2010). Congo Basin forest cover change estimate for 1990, 2000 and 2005 by Landsat interpretation using an automated object-based processing chain. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-4/C7.
- FACET, (2010). Forêts d'Afrique Centrale Évaluées par Télédétection. Étendue et perte du couvert forestier en République démocratique du Congo de 2000 à 2010. Université d'État du Dakota du Sud, Brookings. Dakota du Sud, États-Unis d'Amérique, 66p.

- FAO, (2010). Évaluation des ressources forestières mondiales 2010: rapport principal. Forestry paper. Rome, Italie, p.348 p.
- FAO, (2011). State of the World's Forest 2011, Rome.
- Godefroid. C., (2009). Étude de la distribution des ressources végétales et de leur utilisation par les populations locales dans le cadre de la gestion du Parc National d'Omo en Ethiopie, Faculté Universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, TFE, 55p.
- Halimo Elmi Ali (2016). Méthode d'identification et de cartographie de l'occupation du sol à fine échelle par analyse d'images, Université de Marne-la-Vallée, Géomatique, Information Géographique: Analyse Spatiale et Télédétection Co-habileté UPEM – ENSG, 39p.
- Ilunga C., (2012). Cartographie par télédétection de l'occupation du sol dans la ville de Kisangani et sa périphérie entre 2002 et 2012, Mémoire DES, Faculté des sciences, Université de Kisangani, 59p.
- Iyongo L., (2013). Effet de lisière sur la biodiversité des rongeurs dans la réserve de Masako, un écosystème fragmenté. Thèse, Faculté des sciences UNIKIS, 284p.
- Kabulu D J ; Bamba I; Munyemba K. F; Defourny P; Vancutsem C; Nyembwe N. S; Ngongo L. M et Bogaert J. (2008). Analyse de la structure spatiale des forêts au Katanga, *Ann. Fac. Sc. Agro.*, 1: 12-18.
- Katembera C., (2013). Estimation par télédétection du taux de la déforestation dans la cuvette centrale congolaise: cas de la forêt d'Isangi, DES, Faculté des sciences, Université de Kisangani, 47p.
- Kio O. P. R. (1984). Stratégie de conservation des forêts en Afrique Tropicale. Compte Rendu de colloque du 27 Avril au 01 Mai 1981 à Ibadan, Nigéria.
- Kombele B., (2004). Diagnostic de la fertilité des Sols dans la Cuvette Centrale Congolaise. Cas des séries Yakonde et Yangambi. Thèse de Doctorat, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique, 421p.
- Masimo, J., (2015). Analyse prospective de la déforestation estimée par télédétection dans la réserve de biosphère de Yangambi (Tshopo, RDC). Travail de fin de cycle, Faculté de gestion des ressources naturelles renouvelables, Université de Kisangani, 82p.
- Masimo Kabuanga., J, Blaise Adipalina Guguya, Elvis Ngenda Okito, Nicolas Maestriperi, Mehdi Saqalli, Vivien Rossi et Léon Iyongo Waya Mongo. (2020). Suivi de l'anthropisation du paysage dans la région forestière de Babagulu, République Démocratique du Congo. *VertigO*, 20(2).
- Mbemba M., (2012). Impact de l'agriculture itinérante sur brûlis en République Démocratique du Congo: Préparation d'un atelier et étude de cas dans la réserve de biosphère de Yangambi. Rapport de stage. Faculté des sciences biologiques, agronomiques et environnementales, Université Catholique de Louvain, Belgique, 52p.
- McGarigal K. & Marks B. J., (1995). Fragstats: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Structure. Department of Agriculture, Pacific Northwest Research Station General Technical Report PNW-GTR-351. Oregon, USA.
- Megevand. C. (2013). Dynamique de la déforestation dans le bassin du Congo économique, réconcilier la croissance économique et la protection de la forêt. Washington, DC, World Bank.
- Mikwa JF (2010). Évaluation par télédétection des effets de la déforestation et de la dégradation des forêts des environs des Kisangani cas de la région forestière de Masako, DES, Faculté des sciences, Université de Kisangani, 51p.
- Munyemba K. F. (2010). Quantification et modélisation de la dynamique paysagère dans la région de Lubumbashi: évaluation de l'impact écologique des dépositions issues de la pyrometallurgie. Thèse, Université de Lubumbashi, Faculté des sciences agronomiques, 284p.
- Oloukoi J., Mama V.J., AGBO F. B. (2006). Modélisation de la dynamique de l'occupation des terres dans le département des collines au Bénin. *Contemporary Publishing International Télédétection*, 6: 305-323.
- Puyravaud, J. P. (2002). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177:593–596.
- Soulama S ; Kadeba A ; Nacoulma B MI ; Traoré S ; Bachmann Y ; Thiombiano A. (2015). Impact des activités anthropiques sur la dynamique de la végétation de la réserve partielle de faune de Pama et de ses périphéries (sud-est du Burkina Faso) dans un contexte de variabilité climatique, *Journal of Applied Biosciences*, 87: 8047-8064.
- Stassart D., (2012). Diagnostic territorial de la zone Yangambi, une histoire au service de l'avenir? Mémoire de master, UCL, Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnement. 231 p.
- Tchatchou B., Sonwa DJ ; Ifo S., Tiana AM. (2015). Déforestation et dégradation des forêts dans le Bassin du Congo: État de lieux, causes actuelles et perspectives. Papier occasionnel 120. Bogor, Indonésie; CIFOR.
- Thi-Thanh-Hiên Pham, Dong-Chen He (2013). Classification orientée objet d'une image Quickbird de la ville de Hanoi (Viêt-nam): étude empirique des paramètres de segmentation. Télédétection, *Éditions des Archives Contemporaines*, 11 :287-305
- Toirambe B.B., (2011). Plan d'Aménagement de la Réserve de Biosphère de Yangambi, Draft. WWF-RDC Kinshasa, RDC 69p.
- Tshimbangu K. W. T., (2001). Étude du déboisement et de la crise de combustible ligneux en tant que source d'énergie domestique à Kinshasa (République Démocratique du Congo). Thèse de doctorat. Université Libre de Bruxelles, Belgique, 205p.
- Van Wambeke, A., (1956). Notice explicative de la carte des sols et de la végétation du Congo belge et du Ruanda-Urundi. 6. Planchette 2: Yangambi, A et B. Bruxelles: INEAC, 31p.
- Van Wambeke, A., (1957). Notice Explicative de la Carte des Sols et de la Végétation du Congo-Ruanda-Urundi; Bruxelles: Publ. INEAC, 28p.
- Van Wambeke, A., (1995). Les sols des tropiques: propriétés et appréciation. CTA& Huy Trop asbl. 335 p.