

Activités anthropiques et dynamique des écosystèmes forestiers dans les zones territoriales de l'Arc Cuprifère Katangais (RD Congo)

Sylvestre Cabala Kaleba, Yannick Useni Sikuzani, Amisi Mwana Yamba, François Munyemba Kankumbi & Jan Bogaert

Sylvestre Cabala Kaleba : PhD, Congolais, Professeur, Université de Lubumbashi, Faculté des Sciences Agronomiques, Unité Ecologie, Restauration Ecologique et Paysage, BP 1825.

Lubumbashi (République Démocratique du Congo), Auteur correspondant : sylvestrecabala@gmail.com Téléphone +243814060743.

Yannick Useni Sikuzani : PhD, Congolais, Professeur, Université de Lubumbashi, Faculté des Sciences Agronomiques, Unité Ecologie, Restauration Ecologique et Paysage, Centre de Compétences en Planification et Gestion urbaine, BP 1825 Lubumbashi (R.D. Congo) BP 1825. Lubumbashi (République Démocratique du Congo).

Amisi Mwana Yamba : PhD, Congolais, Professeur, Université de Lubumbashi, Faculté des Sciences, Géographie, BP 1825. Lubumbashi (République Démocratique du Congo).

François Munyemba Kankumbi : PhD, Congolais, Professeur Ordinaire, Université de Lubumbashi, Faculté des Sciences Agronomiques, Unité Ecologie, Redzstauration Ecologique et Paysage, Centre de Compétences en Planification et Gestion urbaine, BP 1825 Lubumbashi (R.D. Congo), BP 1825. Lubumbashi (République Démocratique du Congo).

Jan Bogaert : PhD, Belge, Professeur ordinaire, Université de Liège Gembloux Agro-Bio Tech, Unité Biodiversité et Paysage, Passage des Déportés, 5030 Gembloux, Belgique; Ecole régionale postuniversitaire d'aménagement et de gestion Intégrée des forêts et territoires tropicaux, Kinshasa, République Démocratique du Congo.

DOI: [10.25518/2295-8010.2100](https://doi.org/10.25518/2295-8010.2100)

Résumé :

Les zones territoriales de l'Arc Cuprifère Katangais sont parmi les principaux réceptacles d'une forte concentration démographique et des sites miniers en RD Congo. Par conséquent, les paysages naturels y subissent des profondes mutations dans leur structure spatiale. Cette étude caractérise les changements de l'occupation du sol avant et après la libéralisation du secteur minier en 2002. Trois mosaïques d'images Landsat (TM 1990, ETM + 2002 et OLI 2015) ont été classifiées en "Forêt" et "Non Forêt", et validées par les valeurs du coefficient Kappa. Les résultats ont montré une perturbation grandissante du paysage, notamment après la libéralisation du secteur minier. La matrice paysagère, initialement constituée des taches de « Forêt » s'est dégradée et/ou convertie en classe « Non Forêt ». Une suppression et une dissection des taches de forêt en opposition à la création de taches de "Non Forêt" ont été identifiées comme des processus de transformation spatiale. La dynamique régressive des écosystèmes forestiers résultant de plusieurs activités anthropiques dont l'agriculture, la production du bois énergie et activités minières exécutés en synergie, a été plus poussée dans la

zone de Kasenga. Les administrateurs territoriaux devront en urgence déclarer des zones protégées et créer des réserves naturelles pour préserver les écosystèmes forestiers.

Mots-clés : structure spatiale, dynamique de conversion, Zones territoriales, ACK, activités anthropiques, déforestation

Abstract :

Anthropogenic activities and dynamics of forest ecosystems in the territorial areas of Katangan copper belt (KCB) (DR Congo).

The territorial zones of the Katangan copper belt are among the main receptacles of a strong demographic and mining sites concentration in DR Congo. As a result, the spatial pattern of their natural landscapes are undergoing profound changes. This study characterizes land cover changing trends before and after mining liberalization in 2002. Three Landsat image mosaics (TM 1990, ETM + 2002 and OLI 2015) have been classified into "Forest" and "Non Forest", and validated by the Kappa coefficient values. The results showed a growing landscape disturbance, especially after mining liberalization. The landscape matrix, initially "Forest" patches, has been degraded and / or converted into "Non Forest" class. Subsequently, attrition and dissection of forest patches in opposition to creation of "Non Forest" patches have been identified as spatial transformation processes. The regressive dynamics of forest ecosystems resulting from several human activities including agriculture, fuelwood production and mining activities performed in synergy, has been further amplified in the Kasenga zone. Territorial administrators will urgently need to declare protected areas and create nature reserves to preserve forest ecosystems.

Keywords : spatial pattern, conversion dynamics, territorial zones, KCB, anthropogenic activities, deforestation

Introduction

Les changements de l'occupation du sol dans un paysage sont liés à plusieurs causes et peuvent varier d'un milieu à un autre (20, 25). Compte tenu des conditions socioéconomiques que connaissent les populations de la RD Congo comme dans la plupart des pays en développement, la gestion durable des écosystèmes naturels a retenu peu d'attention des décideurs nationaux (11, 23, 49).

Les études qualitatives et quantitatives menées sur les causes de la déforestation dans les nombreuses provinces de la RD Congo, ont identifié plusieurs causes directes et indirectes propres à chaque province (11, 20, 45, 60). Pour les provinces traversées par l'Arc Cuprifère Katangais (ACK) (Lualaba et Haut-Katanga), en dehors des activités agricoles et la coupe de bois de feu, les activités minières figureraient parmi celles qui entraînaient d'autres activités agissant en synergie, lesquelles aboutissent généralement à une suppression des écosystèmes forestiers (49, 51).

Pour sa part, (31) a révélé des causes d'ordre purement politique et socio-économique comme moteur de la déforestation dans cette même partie de la RD Congo. En conséquence de toutes ces activités anthropiques, les travaux récents révèlent une dégradation et une diminution importante de la couverture forestière dans l'ACK constituant ainsi un danger permanent à leur stabilité écologique pour le peu d'écosystèmes persistants (14, 15, 16, 47, 49, 61).

A cet effet, la maîtrise des perturbations qui s'opèrent dans ce paysage s'avère crucial dans

l'élaboration d'une politique de gestion territoriale durable orientée vers la préservation des taches de forêts qui persistent aux pressions anthropiques (6, 36, 61).

Cette étude se fixe comme objectif de caractériser la dynamique spatio-temporelle des classes d'occupation du sol dans les zones territoriales couvertes par l'ACK. La libéralisation du secteur minier dans l'ACK pourrait conduire aux modifications des écosystèmes forestiers en lien avec les activités économiques exercées et le niveau infrastructural dans chaque zone territoriale.

Grâce aux outils de l'écologie du paysage, l'année 2002 marquée par la libéralisation du secteur minier en RD Congo a servi de référence pour évaluer l'ampleur des activités anthropiques avant (1990) et après (2015) la signature dudit décret présidentiel.

Matériel et méthode

Zones d'étude

La présente étude a été effectuée au sein de l'ACK, en mettant en évidence les zones territoriales qu'il couvre (Figure .1). Il est situé entre 25°4' à 28°51' de Longitude Est et 10°12' à 13°3' de Latitude Sud dans les provinces du Lualaba et du Haut-Katanga. Six portions de territoires, divergents sur le plan démographique, de développement d'infrastructures et d'activités socio-économiques, découpent administrativement l'ACK.

Les zones territoriales de Kipushi, Kambove et Mutshatsha couvrent au moins une agglomération importante et abritent plusieurs sites miniers. La zone de Lubudi combine les activités minières et agricoles qui sont de plus en plus croissantes (24, 26, 28). L'agriculture occupe encore la majorité de la population dans les zones territoriales de Sakania et Kasenga (28). Toutefois, la zone territoriale de Sakania ne bénéficie pas encore d'une infrastructure routière adéquate et ne dispose que d'environ trois sites miniers en activité. Particulièrement, la zone territoriale de Kasenga abrite une partie du Parc National de Kundelungu.

L'ACK connaît un climat tropical sec selon le système de classification de Köppen, avec des précipitations moyennes d'environ 1200 mm (28, 29). Sa végétation reste dominée par la forêt claire (*Miombo*) avec quelques lambeaux de forêt dense sèche (*Muhulu*) et de forêt galerie (*Mushitu*), lesquelles sont rattachées aux mosaïques de savanes (38). La zone d'étude (ACK) couvre environ 48358 km² dans laquelle, la zone I (8038km²), la zone II (6546 km²), la zone III (12237km²), la zone IV (4294 km²), la zone V (8065 km²) et la zone VI (8309 km²) ont été circonscrites suivant les limites territoriales couvertes par l'ACK (Figure1).

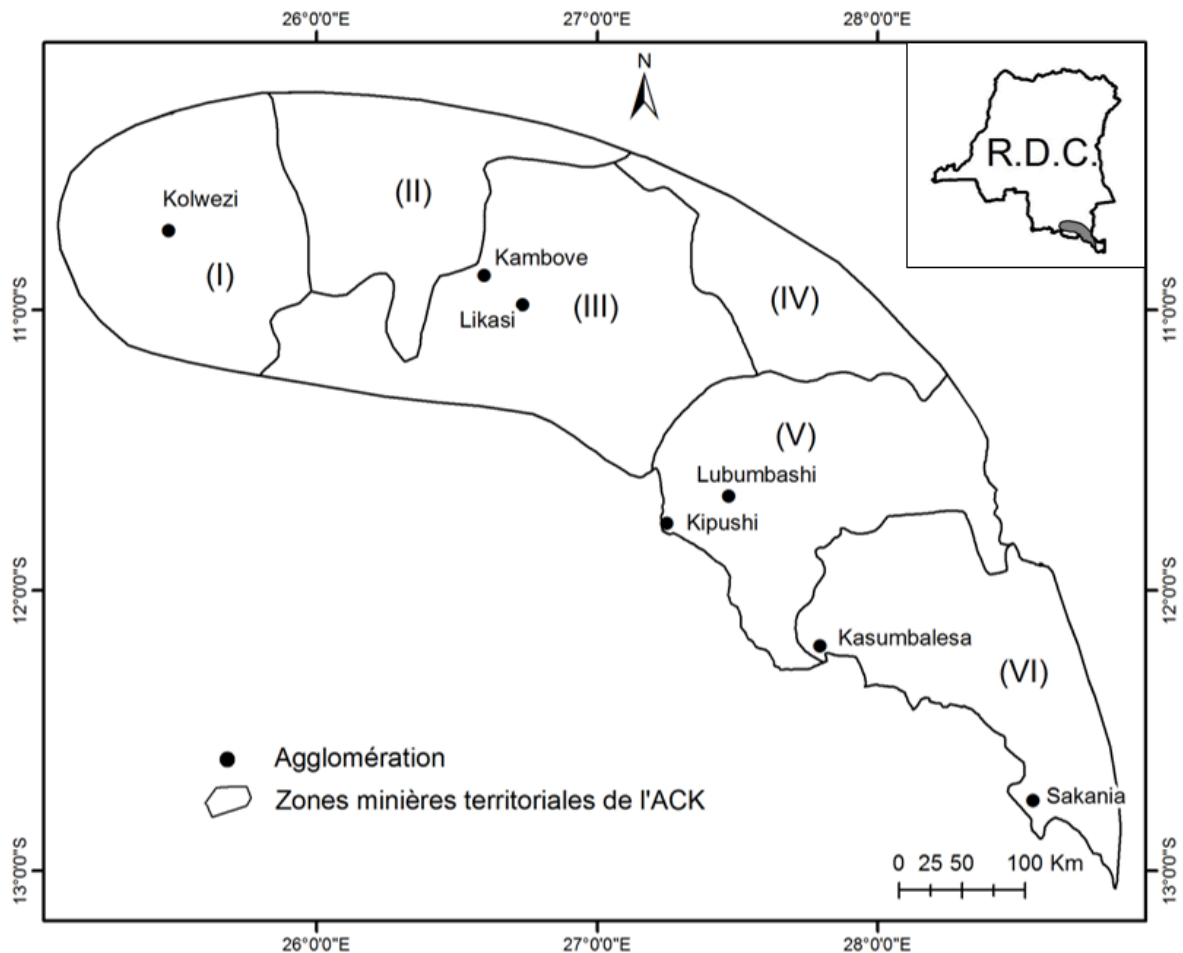


Figure 1: Délimitation du milieu d'étude : l'Arc Cuprifère Katangais et les zones territoriales de Mutshatsha (I), Lubudi (II), Kambove (III), Kasenga (IV), Kipushi (V) et Sakania (V).

Ces zones ont été circonscrites suivant les limites territoriales couvertes par l'A.C.K. L'Arc Cuprifère Katangais a été délimité approximativement sur la base des cartes géologiques et des missions de terrain (14)

Choix de données et matériels utilisés

Lorsque l'étendue de la zone d'étude dépasse le champ d'une photographie aérienne ou d'une image de télédétection, il est nécessaire de recourir à l'élaboration d'une mosaïque. Les données de base sont constituées des cartographies de l'occupation du sol obtenues à la suite des classifications supervisées et validées des mosaïques d'images Landsat 1990, 2002 (Landsat 5 TM, 7 ETM+) et 2015 (Landsat 8 OLI) téléchargées à partir du site internet (<http://glovis.usgs.gov.com>; Tableau 1).

Il est à noter que la série Landsat fait partie d'un groupe de satellites de résolution moyenne, adaptés à l'observation des ressources et de l'environnement (43). Les images Landsat ont été acquises entre le 05 et le 30 Mai, ce qui correspond au début de la saison sèche dans la zone d'étude. Ce choix de période a été fait afin d'obtenir des différences spectrales plus grandes entre les caractéristiques du paysage (14). Les travaux de prétraitements et de classification ont été effectués avec le logiciel ENVI 4.5 tandis que la vectorisation et le finissage des cartes ont été

effectués avec Arc Gis10.2.

Tableau 1 : Caractéristiques des images Landsat couvrant les zones territoriales de l'ACK et téléchargées sur le site internet <http://glovis.usgs.gov.com>

Capteurs	Dates	Path-Row	Résolution spatiale (m)
Landsat TM	20-05-1990	172 /69	30 m
	20-05-1990	172 /68	30 m
	30-05-1990	173 /67	30 m
	30-05-1990	173 /68	30 m
	16-05-1990	174 /67	30 m
	16-05-1990	174 /68	30 m
Landsat ETM+	15-05-2002	172 /69	30 m
	15-05-2002	172 /68	30 m
	05-05-2002	173 /67	30 m
	05-05-2002	173 /68	30 m
	27-05-2002	174 /67	30 m
	27-05-2002	174 /68	30 m
Landsat OLI	25-05-2015	172 /69	30 m
	25-05-2015	172 /68	30 m
	16-05-2015	173 /67	30 m
	16-05-2015	173 /68	30 m
	23-05-2015	174 /67	30 m
	23-05-2015	174 /68	30 m

Prétraitement des images Landsat

Une mosaïque d'image a été élaborée puisque l'étendue de la zone d'étude dépassait la portée d'une scène d'image de télédétection (51). Il est à noter qu'une mosaïque désigne l'assemblage de parties d'images ou d'images contiguës, pré traitées pour être connectables radiométriquement et géométriquement (34). Ainsi, les images Landsat utilisées dans cette étude ont été géo référencées

dans l'UTM (Universal Transverse Mercator)/Zone 35, qui correspond à l'A.C.K., suivant l'ellipsoïde de référence WGS 84 (World Geodesic System). La correction radiométrique a été exécutée sur la base des méthodes de régression linéaire grâce aux invariants correspondant à des points sur chaque mosaïque d'images Landsat caractérisés par une réflectance invariante. Par la suite, les coefficients de la transformation ont été calculés à partir des statistiques de ces points (2).

Classification non supervisée et collecte des données sur le terrain

La composition colorée fausse couleur des images Landsat isolées de l'A.C.K. a été créée en combinant les bandes proche-infrarouge, rouge et vert (14), les deux premières étant connues comme mieux adaptées pour la discrimination de la végétation (61). La composition colorée en fausse couleur a été suivie par une classification non supervisée de l'image de 2015. La classification non supervisée a permis d'avoir des surfaces homogènes où les pixels présentent des propriétés spectrales similaires et a mené à une interprétation visuelle et une identification des zones d'entraînement (14).

Au départ, une classe d'occupation du sol issue du regroupement de trois classes, a retenu notre attention. Il s'agit de la classe « Forêt » composée à partir de la forêt claire, la forêt dense et la forêt galerie; à côté de la classe « Non Forêt » constituée des savanes (herbeuse, arbustive, arborée, boisée, prairie marécageuse), du complexe Habitat-sol nu et des eaux. Sur la base de l'objectif de l'étude consistant à apprécier les tendances évolutives de la couverture forestière au sein des territoires de l'ACK, seules les classes forêts et non forêt ont été retenues pour mener les différentes analyses.

Le choix de zones d'entraînement a été effectué sur base d'une interprétation visuelle en composition colorée puis appuyée par les essais de classification non supervisés, les données récoltées du terrain et les images Google Earth sur laquelle les données vectorielles, dont la classification vectorielle de Defourny et al. (20), ont été intégrées. Pour ce faire, l'admission d'une zone d'entraînement dans une classe pour les opérations futures exigeait une comparaison dans le temps. Cette opération signifie une visualisation par un outil du logiciel ENVI4.5 « link display », du même objet sur toutes les images concernées et à la même place.

Pour éviter la confusion, la sélection des zones d'entraînement a été faite autour du point GPS et à l'intérieur pour les tracés. Pour effectuer une classification supervisée, un minimum de 30 à 60 pixels homogènes est exigé pour s'assurer d'une bonne affectation (ENVI 4.5). Ainsi, des missions de terrain ont été effectuées entre les mois de Mai et Juin 2016 afin de définir les éléments paysagers de la zone d'étude et de collecter à l'aide d'un GPS Garmin 64st ($\pm 3m$ de précision) des parcelles homogènes et inchangées représentatifs des différentes classes d'occupation. Au total 950 points GPS ont été acquis.

Cet ensemble a été divisé en deux groupes à savoir 550 points a été utilisés pour la définition des zones d'entraînement sous forme de polygones de pixels sur l'image de 2015 tandis que 400 points ont servi à l'évaluation de la qualité de la classification supervisée.

Les caractéristiques spectrales des classes d'occupation de sols obtenues de la classification finale de l'image de 2015 ont permis de définir et de matérialiser les zones d'entraînement sur les images de 1990 et 2002. Il est à noter que les zones d'entraînement ont été constitués en optant seulement pour des parcelles homogènes et inchangées.

Les différentes missions de terrain, les anciennes cartes thématiques ainsi que les images Google Earth couvrant l'ACK ont été également utilisées afin de mieux identifier les réponses spectrales des classes d'occupations de sols sur les images satellites Landsat utilisées dans le cadre de cette études. En outre, elles ont également servi dans le choix des sites pour l'évaluation de la fiabilité des classifications (14).

Classification supervisée et validation de la classification

L'algorithme du maximum de vraisemblance a été appliqué sur chacune des images Landsat composites lors des classifications supervisées. Car, en plus de la classe à laquelle il est attribué, il fournit pour chaque pixel un indice de certitude lié à ce choix (43). La qualité des classifications a été appréciée par le calcul du coefficient Kappa (le rapport entre le nombre de pixels bien classés et le nombre total de pixels sondés), en plus du calcul de la précision globale de la classification (la proportion de pixels bien classés calculée en pourcentage). Ces deux indices sont issus de la matrice de confusion et appropriés pour l'évaluation de la qualité des classifications supervisées (33).

Analyse de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol

Pour caractériser la dynamique spatio-temporelle de la classe « Forêt », les indices considérés ont été le nombre de taches et l'aire totale de la classe (3, 6). Ces indices ont été jugés pertinents pour renseigner sur la fragmentation du paysage (4, 5). Les dynamiques de conversion d'occupation du sol intervenues entre 1990, 2002 et 2015, ont été retracées avec la méthode de la matrice de transition (3, 5). Elle se présente comme une matrice carrée décrivant d'une manière condensée les changements d'état des éléments d'un système pendant une période donnée. Ces valeurs proviennent de la superposition des deux cartes grâce au module « *change detection* » du logiciel Envi 4.5.

L'analyse de la dynamique de la structure spatiale a été complétée par l'identification des processus de transformations spatiales qui ont prédominées dans les zones territoriales à l'aide de l'arbre de décision proposé par Bogaert et al. (3). Comme pour une matrice de transition, deux cartes d'occupation du sol sont nécessaires dans une analyse diachronique qui se fait par type de taches.

Pour déterminer le processus de transformation, le modèle utilise des comparaisons entre le nombre de taches, l'aire et le périmètre de type de taches avant et après la transformation (3). Ce dernier intervient en troisième position suivant le processus en vigueur à identifier. Il est à signaler que ces différents indices ont été calculés à travers les tables attributaires confectionnées sur ArcGis et exportées sur Excel. Cet arbre de décision a permis de définir dix processus de transformation spatiale: l'agrégation, la création, la suppression, la dissection, la déformation, l'agrandissement, la fragmentation, le rétrécissement, la perforation, le déplacement (Figure 2).

Pour distinguer le processus de dissection et de fragmentation, la valeur $\diamond = 0,5$ a été utilisée. Dans le cas où $n_0 < n_1$ et $a_1 < a_0$, la décision fait intervenir le rapport $a_1/a_0 = t_{\text{observé}}$. Dans cette étude, un seuil théorique prédéfini de $t = 0,5$ a été adopté pour distinguer le processus de « fragmentation » de celui de « dissection » (31). Ainsi, lorsque $t_{\text{observé}} > 0,5$, c'est la dissection qui est prise en considération. Au cas où $t_{\text{observé}} < 0,5$, la fragmentation est mise en évidence.

Dans le cas de la dynamique anthropique du paysage, les types de taches naturelles seront caractérisés par la suppression, la déformation, la dissection, la fragmentation, la perforation et/ou

le rétrécissement. Les types de taches reflétant les activités anthropiques affichent l'agrégation, la création, la déformation, l'agrandissement et/ou le déplacement (7).

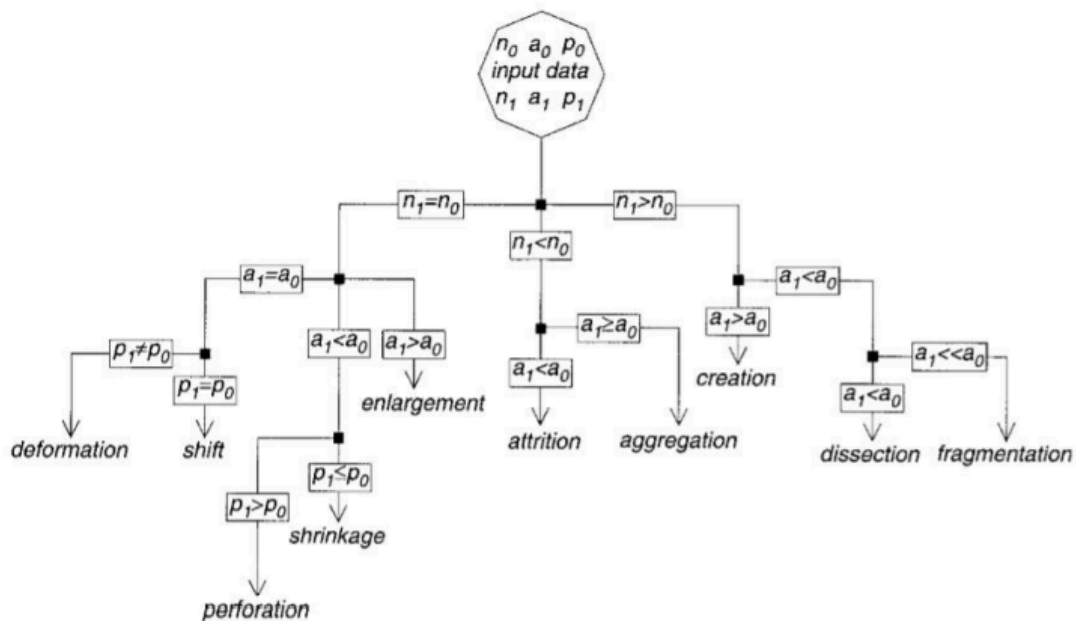


Figure 2 : Méthode d'identification des processus de transformation spatiale sur la base de l'aire, du périmètre et du nombre de taches des classes avant et après transformation du paysage (3).

La figure donne également une illustration schématique des 10 processus de transformation : agrégation, suppression (attrition), création, déformation, dissection, agrandissement (enlargement), fragmentation, perforation, déplacement (shift) et rétrécissement (shrinkage).

Résultats

Classification et composition du paysage

Six zones territoriales de l'ACK ont été isolées pour les trois dates sur les mosaïques Landsat classifiées (de 1990, 2002 et 2015), à savoir Mutshatsha, Lubudi, Kambove, Kasenga, Kipushi et Sakania (Figure 3). Les classifications ont été validées par les calculs des valeurs des précisions globales de 97 % pour les trois dates étudiées. Les valeurs du coefficient Kappa, oscillant entre 93 et 95%, ont confirmé ces précisions globales, ce qui suggère une meilleure discrimination entre les classes d'occupation du sol de manière générale (Tableau 2).

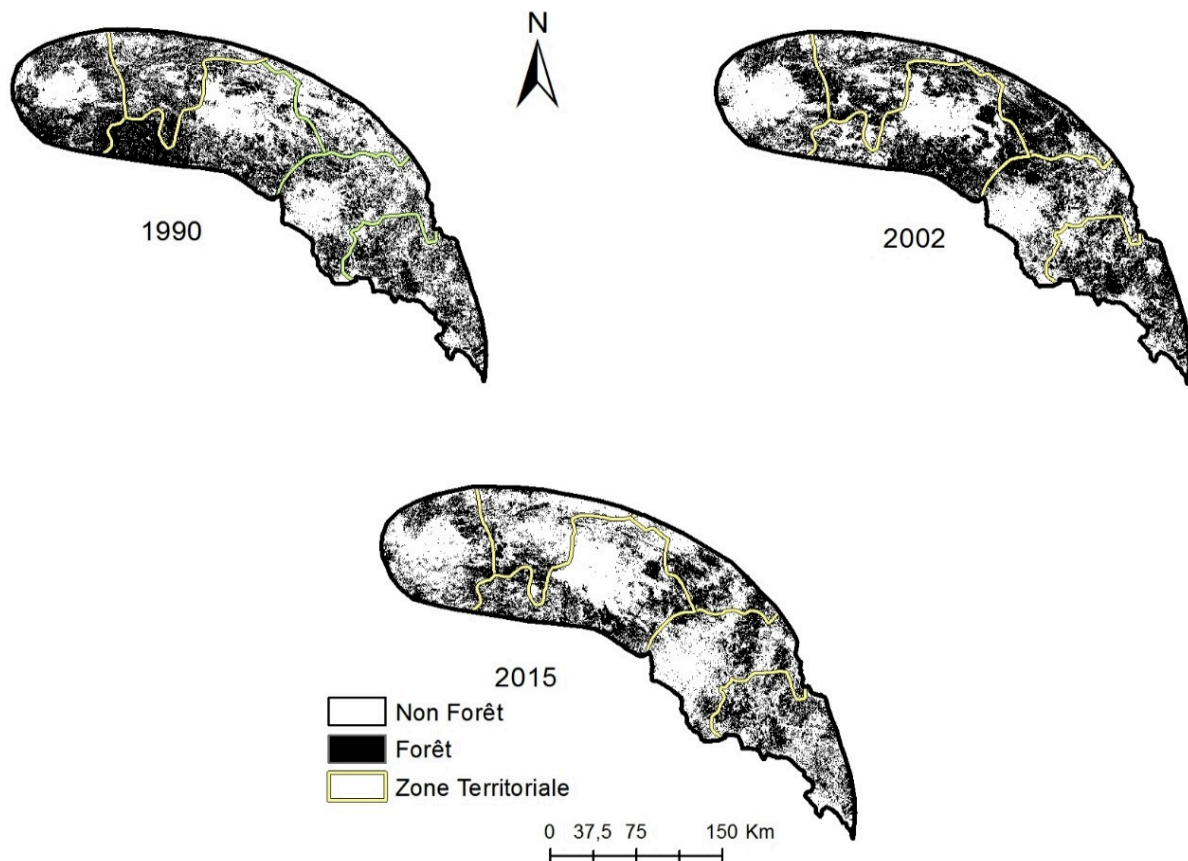


Figure 3 : Cartographie de la couverture forestière de l’A.C.K. et de ses zones territoriales pour les mosaïques classifiées de 1990, 2002 et 2015.

L’A.C.K. est scindé en différentes zones territoriales, suivant les limites administratives. Elles sont composées des classes « Forêt » et « Non Forêt ». Chaque zone territoriale a été comparée aux trois dates sur les classes d’occupation de sol à partir de l’aire et nombre de taches.

Tableau 2 : Valeurs de la précision globale et du coefficient Kappa issues des classifications supervisées des mosaïques Landsat de 1990, 2002 et 2015.

Mosaïques d’images classifiées	Précision globale (%)	Coefficient Kappa
1990	97	0,93
2002	97	0,9
2015	97	0,95

Sur base des cartes d’occupation du sol (Figure 3), les proportions des classes du paysage analysé ont été évaluées (Tableau 3). Entre 1990 et 2002, les proportions des forêts sont presque équivalentes à la classe « Non Forêt » dans les zones territoriales, à l’exception du territoire de

Kipushi où l'occupation de la classe « Non Forêt » avait une avancée énorme.

De même, le territoire de Kasenga couvrait une grande proportion de forêt dans la même période. De 2002 à 2015, la classe « Non Forêt » se démarque par un gain de grandes proportions de forêt soit environ 20%. La matrice paysagère devient la classe « Non Forêt » dans tous les territoires mais à des proportions différentes. Elle double ou prend 10% de plus. A l'opposé, la forêt est en régression dans toutes les zones territoriales.

Dynamique de conversion

L'analyse du Tableau 3 des matrices de transition dans les différents territoires a permis d'apprécier la dynamique paysagère, premièrement par la dégradation des écosystèmes forestiers et deuxièmement par la stabilité des classes. Au cours de la période 1990-2002, la classe « Non Forêt » a été la plus stable dans presque toutes les zones territoriales au détriment de la classe « Forêt », hormis les territoires de Kasenga et Sakania où le taux de non conversion des forêts était largement supérieur à la classe « Non Forêt » (Tableau 3).

Dans cette période, la forêt est en général convertie en d'autres types d'occupation de sol et cela s'amplifie dans la période de 2002 à 2015. Par contre, dans cette dernière période la classe « Non Forêt » se stabilise de plus en plus au détriment de la forêt qui devient pourvoyeuse d'espace dans toutes les zones territoriales dont l'ampleur diverge d'une zone à l'autre. Globalement, de fortes conversions sont observées dans les territoires de Kasenga, Kipushi, Lubudi, Kambove, encore moins dans les territoires de Sakania et Mutshatsha où une restauration de la forêt s'est produite.

En 25 ans, la classe « Non Forêt » est devenue la nouvelle matrice paysagère dans presque toutes les zones territoriales de l'ACK. Au regard de toutes ces conversions intervenues durant cette période d'étude, l'anthropisation a été ici le phénomène le plus important après la libéralisation du secteur minier en 2002.

Tableau 3 : Matrices de transition de l'aire des classes « Forêt » (F) et Non Forêt » (NF) en pourcentage, de 1990 à 2015 dans les zones territoriales de l'A.C.K.

I. Mutshatsha

1990-2002	F	NF	Total	2002-2015	F	NF	Total
F	29,09	22,2	51,29	F	24,15	10,45	34,59
NF	5,5	43,21	48,71	NF	9,29	56,11	65,41
Total	34,59	65,41	100	Total	33,44	66,56	100

II. Lubudi

1990-2002	F	NF	Total	2002-2015	F	NF	Total
F	35,18	13,12	48,29	F	26	22,16	48,15
NF	12,98	38,73	51,71	NF	3,92	47,93	51,85
Total	48,15	51,85	100	Total	29,92	70,08	100

III. Kambove

1990-2002	F	NF	Total	2002-2015	F	NF	Total
F	32,85	15,5	48,36	F	28,73	21,22	49,94
NF	17,09	34,55	51,64	NF	7,25	42,8	50,06
Total	49,94	50,06	100	Total	35,98	64,02	100

IV. Kasenga

1990-2002	F	NF	Total	2002-2015	F	NF	Total
F	43,34	30,97	74,31	F	39,9	24,76	64,66
NF	21,32	4,37	25,69	NF	5,24	30,1	35,34
Total	64,66	35,34	100	Total	45,15	54,85	100

V. Kipushi

1990-2002	F	NF	Total	2002-2015	F	NF	Total
-----------	---	----	-------	-----------	---	----	-------

F	21,56	12,02	33,58	F	19,5	17,1	36,6
NF	15,05	51,38	66,42	NF	11,12	52,28	63,4
Total	36,6	63,4	100	Total	30,62	69,38	100

VI. Sakania

1990-2002	F	NF	Total	2002-2015	F	NF	Total
F	37,2	10,78	47,98	F	34,01	19,56	53,57
NF	16,37	35,65	52,02	NF	8,3	38,13	46,43
Total	53,57	46,43	100	Total	42,31	57,69	100

Dynamique structurale

L'évolution du nombre de taches et de l'aire de la classe « Forêt » du sol pour les trois dates (1990, 2002 et 2015) est représentée sur la Figure 4, en valeur relative. Il ressort de ces figures que les valeurs maximales de l'aire et du nombre de taches de la forêt ont été enregistrées en 1990 et ont diminué sur l'ensemble des trois dates; à l'exception d'une légère augmentation du nombre de taches en 2002 dans les territoires de Kambove et Kipushi et Sakania qui a connu en plus une augmentation de l'aire (Figure 4).

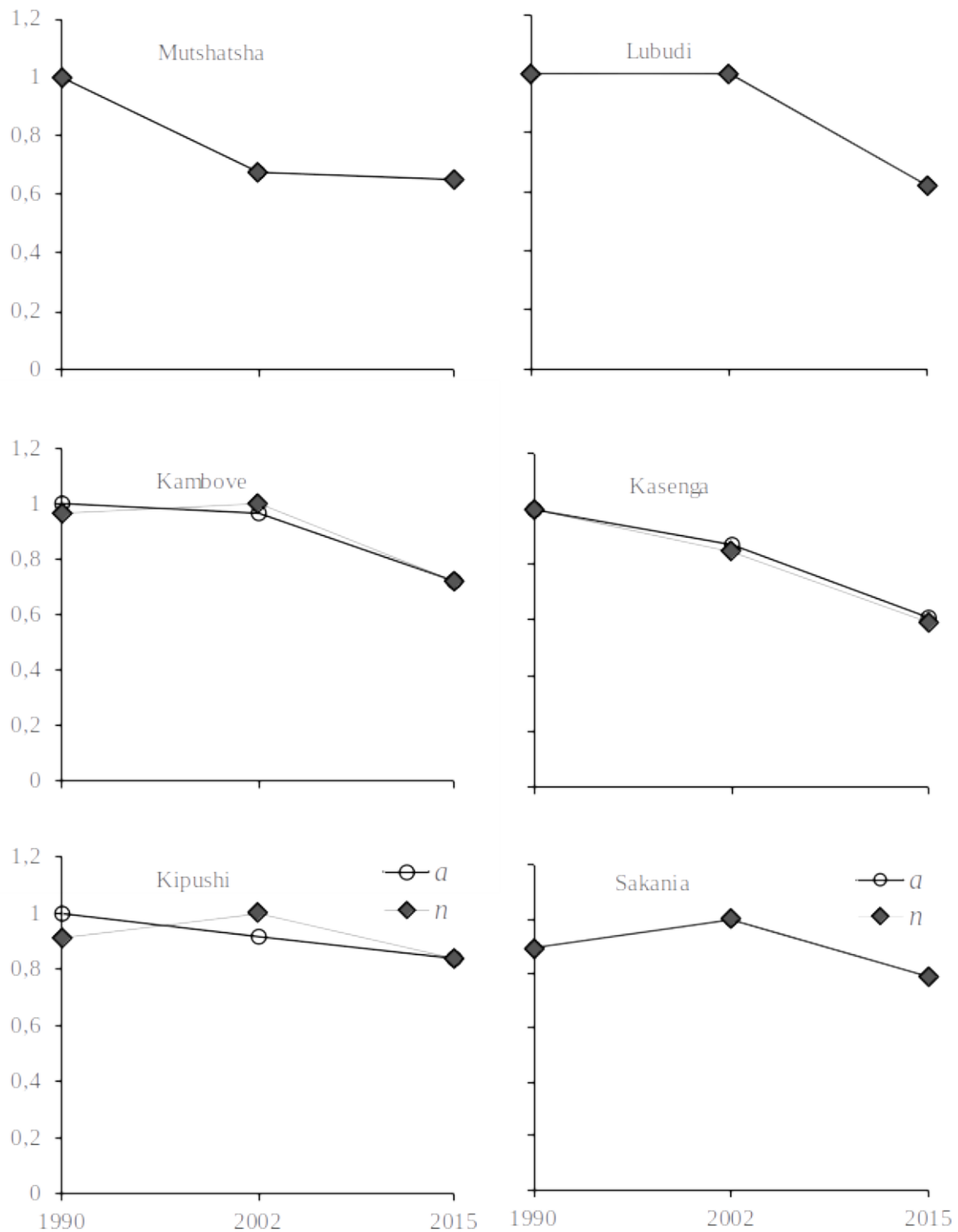


Figure 4 : Evolution des indices *n* et *a* de la classe forêts aux trois dates dans les différentes zones territoriales.

n représente l'évolution du nombre de taches de forêt tandis que *a* donne l'aire de la classe « Forêt ».

À l'opposé, la classe « Non Forêt » est celle qui enregistre une augmentation des valeurs relatives

de nombre de taches et de l'aire totale en 1990 et sont maximales en 2015. Les valeurs de ces indices sont présentées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Indice de structure spatiale pour chaque zone territoriale de l'ACK pour les classes « Forêt » (F) et « Non Forêt » (NF).

Zone I (Mutshatsha)		Zone II (Lubudi)		Zone III (Kambove)		
F	NF	F	NF	F	NF	
1990						
<i>n</i> ₁₉₉₀	4580631	4350610	3509493	3757345	6574682	7021741
<i>a</i> ₁₉₉₀ (km ²)	4122,69	3915,31	3161,06	3384,94	6111,16	6125,84
2002						
<i>n</i> ₂₀₀₂	3089722	5841809	3499301	3767698	6790612	6806036
<i>a</i> ₂₀₀₂ (km ²)	2780,34	5257,65	3151,94	3394,1	5917,81	6319,19
2015						
<i>n</i> ₂₀₁₅	2986654	5944886	2173967	5093032	4892109	8704538
<i>a</i> ₂₀₁₅ (km ²)	2687,91	5350,09	1958,56	4587,43	4402,87	7834,12
Zone IV (Kasenga)		Zone V (Kipushi)		Zone VI (Sakania)		
F	NF	F	NF	F	NF	
1990						
<i>n</i> ₁₉₉₀	3645368	1125757	3308397	6293849	4415958	4759960
<i>a</i> ₁₉₉₀ (km ²)	3190,87	1103,13	2951,79	5356,77	3986,65	4322,34
2002						
<i>n</i> ₂₀₀₂	3085187	1686126	3633508	6375371	4945936	4286839
<i>a</i> ₂₀₀₂ (km ²)	2776,5	1517,5	2708,23	5113,21	4451,13	3857,86
2015						
<i>n</i> ₂₀₁₅	2154080	2617233	3040208	6887154	3906181	5326594
<i>a</i> ₂₀₁₅ (km ²)	1938,74	2355,26	2469,5	5595,5	3515,53	4793,46

À partir de ce tableau, il se dégage pour la classe « Forêt », une diminution du nombre de taches et de l'aire de 1990 à 2002 (Tableau 4). Pendant cette période, les processus de transformation spatiale dominants identifiés ont été la suppression et la dissection, à l'exception d'une création des taches de forêts dans la zone territoriale de Sakania (Tableau 5). La classe « Non Forêt » s'est démarquée par le processus de création, d'agrégation (Kipushi), pendant qu'une suppression dans le territoire de Sakania y a été identifiée. Entre 2002 et 2015, la classe « Non Forêt » s'est imposée par une augmentation de l'aire et du nombre de taches traduisant une « création » dans tous les territoires, hormis Kambove qui a connu une agrégation. Par contre durant cette même période, le processus de « suppression » est resté en vigueur pour la classe « Forêt » dans toutes les zones territoriales.

Tableau 5 : Processus de transformation spatiale identifiés à partir d'indice *n* et *a* du tableau 3 suivant l'arbre de décision (3).

	1990-2002		2002-2015	
	F	NF	F	NF
ZONES				
I	Suppression	Création	Suppression	Création
II	Suppression	Création	Suppression	Création
III	Dissection	Création	Suppression	Agrégation
IV	Suppression	Création	Suppression	Création
V	Dissection	Agrégation	Suppression	Création
VI	Création	Suppression	Suppression	Création

Les résultats obtenus suggèrent des variabilités dans l'évolution de la couverture forestière (aire) entre la période d'avant et d'après la libéralisation du secteur minier. Les valeurs du taux de déforestation calculées pour chaque territoire entre les deux périodes (Figure 5) montrent trois tendances globalement: une déforestation croissante dans le territoire de Kasenga), une déforestation existante et dynamique (territoires de Mutshatsha, de Kambove, de Lubudi et de Sakania) et une déforestation déjà avancée dans le territoire de Kipushi) (Figure 5). En somme, il y a alors déforestation dans toutes les zones territoriales, à des rythmes différents en lien avec le développement infrastructurel amplifiée par la croissance démographique.

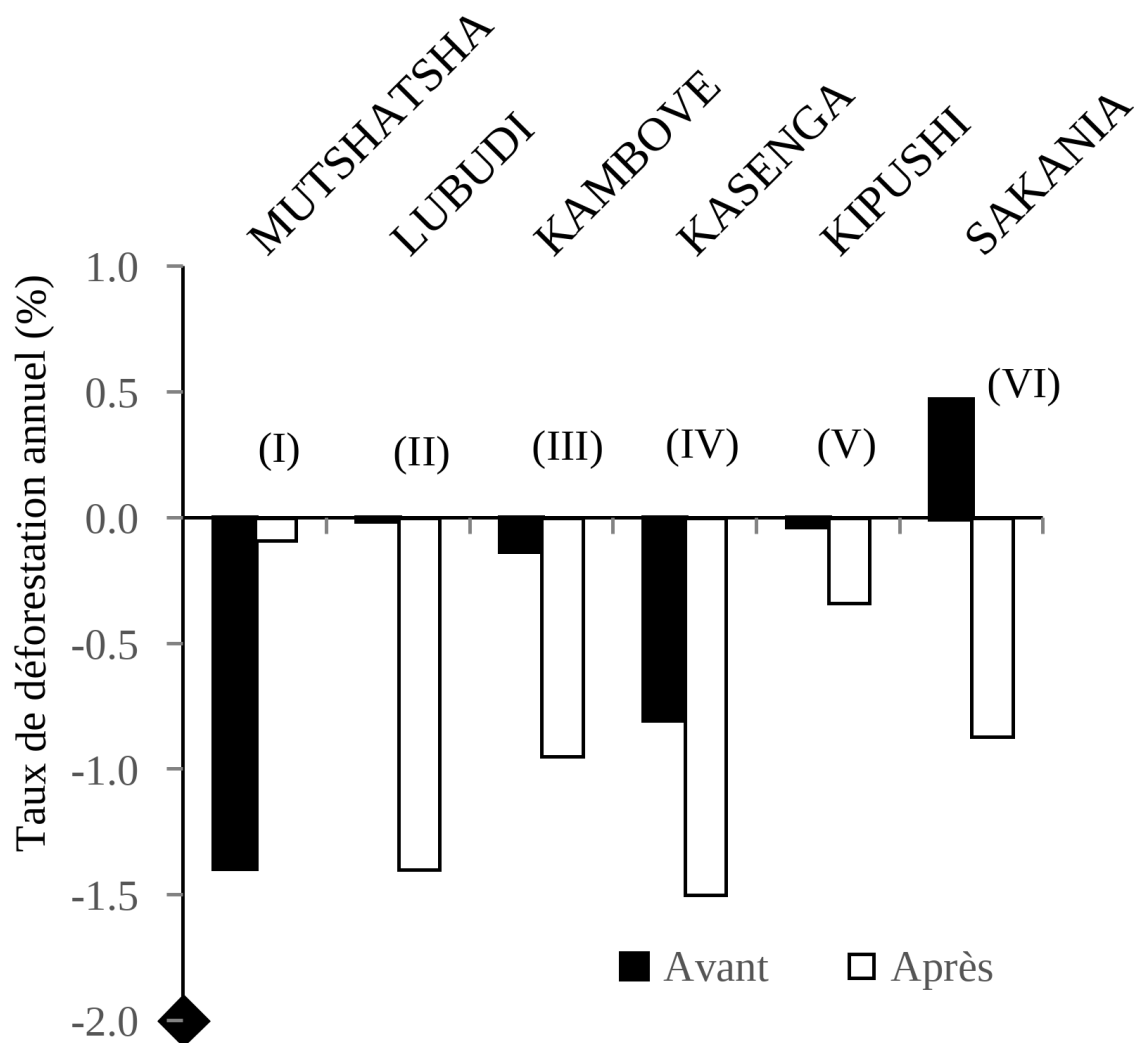


Figure 5 : Evolution du taux de déforestation avant (1990-2002) et après (2002-2015) la libéralisation du secteur minier dans les zones territoriales : (I) Mutshatsha, (II) Lubudi, (III) Kambove, (IV) Kasenga, (V) Kipushi et (VI) Sakania.

Avant la libéralisation du secteur minier, une déforestation a été observée dans toutes les zones territoriales à l’exception de la zone VI (Sakania) tandis qu’après la libéralisation, elles se caractérisent par une déforestation plus poussée qu’avant.

Discussion

Approche méthodologique

La limite de la zone de l’ACK est jusque-là un sujet à controverse. Aussi longtemps que les travaux d’exploration n’ont jamais pris fin, et que çà et là, de nouveaux gisements sont découverts, cette délimitation reste provisoire. Si seulement l’appellation s’est rapprochée de la forme que des limites administratives avec la Zambie ou des gisements, une dénomination plus inclusive serait

convenable (14, 24, 30).

Cette inquiétude est aussi à relever pour les limites de la plaine de Lubumbashi, comprise dans l'ACK, qui ont été circonscrites sur base des relevés phytosociologiques (55), alors qu'elle connaît une dégradation qualitative et quantitative aux limites anciennes tout comme à l'interne par plusieurs activités anthropiques (16). A cet effet, les limites devront se fixer en fonction des objectifs ou du phénomène que l'on veut analyser. Pour le cas de cette étude nous avons associé les couches des limites des différents travaux géologiques et aux données de terrain (14,15).

L'utilisation de l'imagerie satellitaire dans le cadre d'une analyse paysagère se focalise sur l'identification de la composition des patrons paysagers constituant les couches de base de l'information sur le paysage qui sont les classes d'occupation du sol (6, 61). Les classifications supervisées des images Landsat avec deux classes de l'occupation du sol, appuyées sur l'algorithme du maximum de vraisemblance, ont donné des valeurs de précision statistiquement acceptables (33). Cela peut s'expliquer en grande partie par le regroupement des classes (40).

Le Katanga méridional est couvert par trois types de forêts, dont les forêts galeries, les forêts denses sèches et la forêt claire de miombo qui est la plus dominante (39). Etant donné l'objectif de l'étude consistant à apprécier la déforestation d'une part et de l'autre la forte confusion entre les trois types de forêts, les 3 écosystèmes forestiers précités ont été fusionnés en une seule occupation du sol lors de la classification.

En outre, les nombreuses discussions avec les populations locales pour retracer l'historique de l'occupation du sol pendant la validation des classes de végétation sur le terrain ont facilité les interprétations visuelles et les analyses des images classifiées (40). Il est à noter que malgré certaines critiques formulées sur l'indice Kappa (52), son utilisation se justifie dans le cadre de cette étude par le fait que le nombre de sites d'entraînement de chacune des classes d'occupation de sol était identiques et fixes pour les trois dates retenues (44).

La configuration spatiale des paysages sélectionnés au cours de nos travaux a été traditionnellement quantifiée à partir d'indices paysagers. Ces indices ont permis de bien cerner le fonctionnement des paysages forestiers au sein de l'ACK. Les indices particulièrement retenus et testés font référence au nombre, à l'aire et au périmètre des taches des classes d'occupation du sol. Ces trois composantes sont considérées en écologie du paysage comme des éléments indispensables et un compromis idéal dans la caractérisation de la configuration du paysage (4). Dans le cadre de cette étude, peu d'indices ont été utilisés car la plupart étant fortement corrélés (35).

L'analyse des cartes de la période allant d'avant (1990) et après (2015) la libéralisation du secteur minier en 2002 permet de vérifier l'hypothèse d'un accroissement de l'anthropisation du paysage dans cette zone en lien avec le niveau infrastructurel ainsi que les événements politiques et économiques qui ont régit durant cette période notamment la chute de l'entreprise nationale la « Général des Carrières et des Mines » (GCM) (15, 16).

L'analyse des changements de l'ampleur de la déforestation pré et post 2002 justifie la pertinence des choix méthodologiques qui ont été réalisés. En effet, en comparant la dynamique pré et post « libéralisation » sur base de deux analyses diachroniques (1990/2002 et 2002/2015), il a été noté que le taux de déforestation a varié sans qu'il y ait un réel changement de dynamique en raison des fortes pressions anthropiques enregistrées depuis la libéralisation des activités minières en 2002.

Toutefois, il aurait été mieux d'apprécier les taux de déforestation pour chaque année et observer si un changement conséquent peut être observé en 2002, notamment en recourant aux outils récents comme Google Earth Engine (64). Par rapport à d'autres plateformes, Google Earth Engine prend en charge davantage de types de données géospatiales (par exemple, les données Sentinel et les premières données Landsat) et fournit des services gratuits à tous les utilisateurs, ce qui est particulièrement important dans les pays moins développés. Il fournit aussi des algorithmes avancés pour l'analyse des big data géographiques ainsi qu'un environnement de programmation interactif (64).

En outre, il héberge également de longues séries chronologiques d'enregistrements d'observation de la Terre et joue un rôle essentiel dans la surveillance et l'analyse de l'environnement (1). Cependant, il ne peut afficher les données géospatiales mondiales qu'en deux dimensions et ne dispose pas des capacités de visualisation plus avancées. En outre, les ensembles de données stockés dans Google Earth Engine ne sont pas complets (par exemple, le SAR complexe n'est pas inclus), et il y a une limite à la quantité de données téléchargées par les utilisateurs qui peuvent être stockées (64).

Par ailleurs, l'augmentation de l'ampleur de la déforestation mise en évidence dans notre étude sur la période de 2002/2015 pourrait bien être attribué à la libéralisation du secteur minier qui a entraîné une multiplication du nombre des sites, tant en ce qui concerne l'exploitation artisanale qu'industrielle (14). En effet, dans un pays où près des trois-quarts de la population vivent avec moins de 1,25 dollar par jour et qui occupe les derniers rangs au classement de l'indice de développement humain, les populations sont attirées par le secteur minier qui s'est révélé comme offrant la meilleure stratégie génératrice de revenu et de survie (49, 23).

Cette situation justifie ainsi que des populations se soient dès lors déplacées en nombre vers les sites miniers (63). En effet, à titre illustratif, pour la ville de Lubumbashi située au sein de l'ACK, la population est passée de près de 700.000 en 1990 à 1 million en 2002 contre près de 3 millions en 2015 (61). Ainsi, l'afflux de populations, notamment sur les sites miniers et dans les villes de l'ACK, ne sont pas sans conséquence sur les ressources naturelles. L'installation de milliers de personnes en pleine forêt a notamment une incidence en termes de destruction d'écosystèmes, de pollution, de déforestation, etc. Cela amène également à une dégradation des sols et une perte de la biodiversité (54).

En outre, les agglomérations présentes au sein de l'ACK sont les centres d'activités diverses et en même temps elles sont aussi des grandes demandeuses en produits de consommation (produits agricoles, énergie). Par conséquent, plus la taille de leur population augmente, plus la demande en espace et en subsistance y devient forte, ce qui augmente la pression sur les ressources naturelles environnantes (32).

La déforestation en lien avec le niveau infrastructurel des zones territoriales

L'analyse de la dynamique du paysage a permis d'apprécier la dégradation et ou la déforestation dans chaque zone territoriale de l'ACK. Globalement, il y a anthropisation des écosystèmes forestiers exprimée à travers les matrices de transition qui révèlent les conversions intervenues et la stabilité des classes complétée par l'identification des processus de transformation spatiale dans chaque zone territoriale. Au cours de cette période d'étude, il se dégage une différence

significative des proportions des classes dans les territoires et à travers les années, traduisant des particularités territoriales conduisant aux changements des écosystèmes forestiers. Ces particularités proviendraient de plusieurs causes anthropiques, différentes d'un territoire à un autre.

Trois grandes causes de déforestation ont été évoquées par plusieurs auteurs au sein de l'ACK. Il s'agit de la coupe de bois énergie, de l'agriculture traditionnelle, des activités minières, de plus en plus de l'exploitation du bois (20, 25, 45). Ces activités sont amplifiées par la croissance démographique tandis que les activités minières constituent un moteur de déforestation à partir desquelles d'autres activités émergent par la croissance d'un débouché. (10), et (21) confirment qu'au sein de l'ACK, les grandes agglomérations prenaient naissance à partir des activités minières. Ainsi, la répartition de sites miniers dans les zones territoriales couplée à la croissance démographique influencerait le phénomène de déforestation au sein de l'ACK (16, 20, 25, 39).

Par ailleurs, l'ACK et ses zones territoriales connaissent une dépendance quasi totale des pays voisins en ressources alimentaires. Par conséquent, l'agriculture de subsistance exercée par la population rurale aurait moins d'impact par rapport à la forte demande en bois-énergie qui est contre balancée par d'autres ressources énergétiques plus commodes (courant électrique, l'énergie solaire) et tant d'autres facteurs comme la saison et les infrastructures routières qui diffèrent d'une zone à une autre en nombre et en qualité (36, 46, 58). Ce travail vient révéler la pertinence de ces différentes causes dans les différentes zones territoriales comme (50), (62) l'avaient constaté en Inde et (48) au Sud-Ouest de la RD Congo.

La zone territoriale V (Kipushi) se caractérise par une déforestation déjà avancée, comme l'avait signalé (58), et de plus en plus progressive dans les zones périurbaines (15, 16, 63). Plus peuplée, cette zone constitue donc un débouché pour la vente en produits forestiers ligneux et non ligneux (38). La réfection des infrastructures routières autour de cette zone V (Kipushi) aurait énormément contribué à la déforestation comme c'est le cas avec la zone IV (Kasenga) (12, 36, 46, 59) qui l'approvisionne en divers produits comme du charbon de bois, du poisson fumé et des produits agricoles. En conséquence, elle s'est démarquée être la plus exploitée en pertes de couverture forestière. La zone I (Mutshatsha), essentiellement minière (10), illustre l'impact de la libéralisation du secteur minier en 2002, par l'abandon des activités moins rémunératrices et pénibles. A cet effet, suites aux migrations, elle est parmi les plus peuplées après la zone V (Kipushi) (26, 28).

Ainsi, l'arrêt ou la chute des activités minières pourraient-ils engendrer une tendance vers une déforestation plus importante illustrée durant la période 1990-2002 pour la zone minière I (Mutshatsha) qui serait amplifiée par la croissance démographique (26). La zone II (Lubudi) abrite un important gisement autour duquel des activités agricoles se développent de plus en plus et la coupe de bois-énergie dont les débouchés sont les zones I (Mutshatsha), III (Kambove) et même V (Kipushi)(46). La zone VI (Sakania) illustre le cas d'une zone éloignée des grandes agglomérations, moins peuplée avec peu de bonnes infrastructures routières et n'abrite que peu de gisements exploités.

L'agriculture de subsistance avec des techniques obsolètes reste la principale activité pour la majorité d'habitants de cette contrée (28). Par ailleurs, la même zone s'est démarquée par le processus de création avant la libéralisation du secteur minier qui proviendrait d'une régénération ou encore de non perturbation des écosystèmes naturels déjà existant comme les savanes boisées et arborée (17, 57). En outre, dans les pratiques agricoles, la majorité de la population habitant

cette zone pratique un élagage appelé localement « ukusaila » favorable à une régénération relativement rapide d'arbres (17, 57). De ce fait, il est évident qu'en cas d'absence de perturbation, les écosystèmes naturels peuvent se reconstituer.

Nos résultats suggèrent que l'ensemble de la zone d'étude connaît une transition caractérisée par le passage d'une dynamique de « déforestation/dégradation » en 1990-2002 vers une dynamique de « déforestation » pure en 2002-2015, conséquences des mutations des pratiques vis-à-vis des ressources forestières en vue de satisfaire rapidement les besoins énergétiques et en produits agricoles d'une population sans cesse croissante. En somme, la dégradation conduit donc à la déforestation dans le site d'étude concerné.

En outre, l'agrégation des classes non forêt dans la zone d'étude pourrait être assimilée à une augmentation de la proportion des lisières des écosystèmes forestiers. En effet, outre les changements d'affectation des sols et la destruction des paysages et habitats naturels qu'elle provoque, la fragmentation est aujourd'hui reconnue comme l'un des processus majeurs des dynamiques paysagères. Par la démultiplication, la réduction de la taille, la modification de la forme et l'augmentation de l'effet de lisière des taches naturelles (3), la fragmentation, résultant de l'amplification des activités minières et agricoles dans les zones territoriales étudiées, rompt l'équilibre écologique des taches et désagrège tout le processus de reproduction des espèces (18).

Vers une perspective d'identification des causes de la déforestation au sein des zones territoriales

Au regard des analyses effectuées, les mutations observées résulteraient des conséquences accumulées par les mauvaises pratiques d'utilisation du sol amplifiées par une croissance démographique galopante (26). Globalement les zones essentiellement agricoles mais valorisées par une bonne infrastructure routière comme Kasenga sont caractérisées par des changements importants, ensuite vient la catégorie des zones aux grandes infrastructures qui sont déjà caractérisées par une déforestation avancées (58) comme Kipushi, et la dernière catégorie « mixte » constitue les zones essentiellement minières dont Mutshatsha et associant d'autres activités à ampleur relativement modérée (Lubudi, kambove et Sakania).

Cette appréciation corrobore celle de (51), et (21) qui auraient constaté une déforestation plus importante dans les zones minières de l'ACK dotées de nombreux sites miniers, et plus peuplées. En outre (46) ont montré que les raisons majeures qui poussent la population à la coupe de bois-énergie, tout comme les pratiques agricoles anciennes seraient le chômage et la pauvreté (37, 56).

Comme cela s'est illustré dans la zone territoriale I (Mutshatsha), il est fort probable qu'en mettant sur pied d'autres mécanismes de survie, la population pourrait facilement abandonner les activités plus pénibles et moins rémunératrices vers celles qui seraient plus rentables (25). Cette étude confirme, en outre, les études menées par (25, 41, 44, 60) en insistant que ce serait principalement les activités agricoles et la coupe de bois-énergie qui seraient à la base de la déforestation au grand Katanga, tandis que les activités minières viennent les propulser en rapprochant les agents de déforestation aux sites miniers comme c'est le cas avec Kinsevere (15, 16, 56).

L'impact des activités minières est plutôt influencé par leur nombre (39). En cas d'absence de perturbation d'écosystèmes naturels, il y a lieu avec le temps que les forêts se reconstituent comme ce fut dans la zone VI (Sakania). La déforestation est donc permanente et continue aussi longtemps

que la population qui est censée la protéger mène une vie de pauvreté (11, 13, 41, 42, 45). Elle est plus amplifiée principalement autour des grandes agglomérations et au long des routes qui favorisent l'accessibilité aux ressources naturelles (12, 22, 28, 36, 61)

La question reste à savoir quand et comment sera inversé cette tendance d'après la libéralisation du secteur minier qui vient propulser la déforestation. Trouver des mesures pouvant plus ou moins ralentir ou inverser cette tendance reviendrait à substituer quasiment ou totalement le bois-énergie par une autre source d'énergie, améliorer la desserte en fourniture énergétique existante ainsi que les techniques de production agricole, mettre en pratique les lois du code minier et forestier relatives à la protection et conservation des forêts (23, 44, 60).

Conclusion

La présente étude contribue à la caractérisation des dynamiques paysagères en zones territoriales de l'ACK en apportant une réponse quantitative et localisée à des questions de gestion de l'espace des écosystèmes forestiers. La libéralisation du secteur minier pendant la période de 2002 -2015 permet de corroborer l'hypothèse d'une disparition continue de la classe « Forêt » au profit de la classe «Non Forêt». L'impact des activités anthropiques est exprimé avant et après la libéralisation du secteur minier (en 2002) à travers les matrices de transition, les indices de structures spatiales, complétés par l'identification des processus de transformation spatiale. Les résultats confirment que les classes d'occupation de sol sont en pleine mutation.

La classe « Forêt » connaît régulièrement une perturbation provenant de diverses activités humaines comme l'agriculture, les activités minières, la coupe de bois énergie et l'urbanisation exécutées en synergie. Il s'est avéré qu'après la libéralisation du secteur minier, la déforestation s'est amplifiée dans toutes les zones territoriales. L'intensification des activités socioéconomiques couplées à l'accroissement démographique accentuent la dégradation structurelle des forêts marquée par les processus de suppression et de dissection tandis que les classes anthropiques se démarquent par les processus de création et d'agrégation.

En conséquence, il y a rupture de l'équilibre écologique sur les écosystèmes suivis des changements climatiques, d'une dégradation de la biodiversité. Dans ce contexte, les pratiques actuelles d'utilisation des ressources naturelles ne répondent pas aux principes de gestion durable.

Vu l'ampleur de l'anthropisation en RD Congo et en particulier dans les provinces du Haut-Katanga et du Lualaba, ces résultats devraient pousser les décideurs politiques et gestionnaires des territoires à mettre en place des actions concrètes comme la déclaration des aires protégées, des réserves naturelles pour une gestion durable des écosystèmes forestiers afin d'inverser les tendances négatives tout en tenant compte du contexte socio-économique des populations locales.

Remerciements

Nous remercions l'ARES-CCD à travers le programme AI avec l'Université de Lubumbashi (2014-2019), le PRD CCPGU (2012-2017) et le PRD CHARLU (2020-2024) pour l'appui à la réalisation de ce travail.

Bibliographie

1. Amani M., Ghorbanian A., Ahmadi S.A., Kakooei M., Moghimi A., Mirmazloumi S.M., Moghaddam S.H.A., Mahdavi S., Ghahremanloo M., Parsian S., Wu Q. & Brisco B., 2020, Google Earth Engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **13**, 5326-5350.
 2. Barima Y.S.S., Barbier N., Bamba I., Traore D., Lejoly J. & Bogaert J., 2009, Dynamique paysagère en milieu de transition forêt-savane ivoirienne. *Bois For. Trop.*, **299**, 1, 15-25. http://bft.cirad.fr/cd/BFT_299_15-25.pdf
 3. Bogaert J., Ceulemans R. & Salvador-Van Eysenrode D., 2004, Decision tree algorithm for detection of spatial processes in landscape transformation. *Environmental Management*, **33**, 62-73.
 4. Bogaert J. & Mahamane A., 2005, Écologie du paysage : cibler la configuration et l'échelle spatiale. *Ann. Sci. Agro. Bénin*, **7**, 1, 1-15. <http://hdl.handle.net/2268/106426>
 5. Bogaert J., Farina A. & Ceulemans R., 2005. Entropy increase of fragmented habitats: A sign of human impact? *Ecological Indicators*, **5**(3) , 207-212.
 6. Bogaert J., Bamba I., Koffi K. J., Sibomana S, Kabulu D. J-P, Champluvier D., Robbrecht E., De Cannière C., & Visser M.N., 2008, Fragmentation of forest landscapes in Central Africa: causes, consequences and management. In: Laforteza R., Chen R., Sanesi G. & Crow Th.R. (Eds). *Patterns and Processes in forest landscapes; multiple use and sustainable management*, pp 67-87, Eds Verlag, New York: Springer.
 7. Bogaert J., Barima Y.S.S., Iyongo W. M. L., Bamba I., Mama A., Toyi M. & Laforteza R. 2011. Forest fragmentation: causes, ecological impacts and implications for landscape management. In Li C., Laforteza R. & Chen J. (Eds). *Landscape ecology and forest management: challenges and solutions in a changing globe*. Higher Education Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 273-296.
 8. Bogaert J., Vranken I. & André M., 2014, Anthropogenic Effects in Landscapes: Historical Context and Spatial Pattern, In In Hong S.K., Bogaert J. & Min Q. (Eds). (Eds.), *Biocultural landscapes. Diversity, functions and values*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, pp 89-112.
 9. Bogaert J., Farina A. & Ceulemans R., 2005, Entropy increase of fragmented habitats: a sign of Human impact? *Ecological Indicators*, **5**, 207-2012.
 10. Bruneau J-C. & Mansila Fu-Kiau., 1986, Kolwezi: L'espace habité et ses problèmes dans le premier centre minier du Zaïre. *Cahier des Sciences Humaines*, **22**, 217-229.
 11. Brockhaus M., DiGregorio M. & Mardiah S., 2013, Governing the design of national REDD+: a analysis of the power of agency, *Forest Policy and Economics*, **49**, 23-33.
 12. Bukome I. & Kingoma M., 2002, Connectivité et accessibilité du réseau routier de la République Démocratique du Congo. *Bulletin de la société de Liège*, **42**, 61-75.
 13. Burgi M., Hersperger A.M. & Schneeberger N., 2004, Driving forces of landscape change
-

- current and new directions||, *Landscape Ecology*, **19**, 857-868.
14. Cabala K.S., Useni S.Y., Sambieni K.R., Bogaert J. & Munyemba K.F., 2017, Dynamique des écosystèmes forestiers de l'Arc Cuprifère Katangais en République Démocratique du Congo. I. Causes, transformation spatiale, et ampleur. *Tropicultura*, **35**, 192-202.
 15. Cabala K.S., Useni S. Y., Amisi M.Y., Bogaert J. & Munyemba K. F., 2018a, Analyse structurale de la dynamique forestière dans la région de l'Arc Cuprifère Katangais (A.C.K.) en R.D. Congo: II. Analyse complémentaire de la fragmentation forestière. *Tropicultura*, **36**, 621-630.
 16. Cabala K.S., Useni S.Y., Munyemba K.F. & Bogaert J., 2018b, Anthropisation et dynamique spatiotemporelle de la forêt claire dans la plaine de Lubumbashi. In Bogaert J., Colinet G & Mahy G. (Eds). *Anthropisation des paysages au Katanga*. Les presses agronomiques de Gembloux, pp 253-266.
 17. Chidumayo E.N. & Gumbo D.J., 2013, The environmental impacts of charcoal production in tropical ecosystems of the world: a synthesis. *Energy for Sustainable Development*, **17**: 86-94.r
 18. Cristofoli S. & Mahy G., 2010. Restauration écologique : contexte, contraintes et indicateurs de suivi. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **14**: 203-211.
 19. Debroux I., Hart T., Kaimowitz D., Karsenty, A. & Topa G., 2007, Forests in post-conflict Democratic Republic of Congo: analysis of a priority agenda. CIFOR, World Bank, CIRAD, Bogor, Indonesia.
 20. Defourny J.-P., Delhage C. & Kibambe J.-P., 2011, *Analyse quantitative des causes de la déforestation et de la dégradation des forêts en République démocratique du Congo*. Rapport. FAO, Kinshasa, République Démocratique du Congo.
 21. Dibwe D.D.M., 2009, Les identités urbaines en Afrique: Le cas de Lubumbashi (R-D Congo), *L'Harmattan*, 200p.
 22. Dupin L., Nkono C., Burlet C., Muhashi F. & Vabrabant Y., 2013, Land Cover Fragmentation Using Multi-Temporal Remote Sensing on Major Mine Sites in Southern Katanga (Democratic Republic of Congo). *Advances in Remote Sensing*, **2**, 127-139.
 23. FAO, 2015, Evaluation des ressources forestières mondiales, *Rome*, 253p.
 24. François A., 1973, L'extrémité occidentale de l'arc cuprifère shabien, Étude géologique, Gécamines: Likasi Zaïre.
 25. Gillet P., Vermeulen C., Feintrenie L. & Dessart H., 2016, Quelles sont les causes de la déforestation dans le bassin du Congo? Synthèse bibliographique et étude des cas. *Biotechnologie Agronomie Société et Environnement*. **20**, 183-194.
 26. INS., 2015, Annuaire statistique 2014 de la RDC, Rapport annuel, Institut national de statistique, 560 p.
 27. Kabulu D.J., 2011, *Impacts des activités minières sur les écosystèmes au Katanga*
-

- (République Démocratique du Congo). Thèse de doctorat. Université libre de Bruxelles (Belgique), 250 p.
28. Kalamba T., Khonde M., Ilunga N. & Mansinsa M., 1998. *Monographie de la Province du Katanga*. PNUD/UNOPS. Programme national de relance du secteur agricole et rural (PNSAR), 137p.
 29. Kalombo K.D., 2015, Caractérisation de la répartition temporelle des précipitations à Lubumbashi (Sud-Est De La RDC) sur la période 1970-2014. *XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, pp 531-536.
 30. Kampunzu A.B. & Cailteux J., 1999, Tectonic Evolution of the Lufilian Arc (Central Africa Copper Belt) During Neoproterozoic Pan African Orogenesis Gondwana, *Research*, **2**, 401-421.
 31. Kikombo I.N., 2006, Assessing the impact of turnoils and wars on the environment in the city of Lubumbashi using remote sensing data. *The Great Lake Research Journal*, **2**, 74-90.
 32. Khoji M.H., N'Tambwe N.D.D.D., Malaisse F., Waselin, S., Sambiéni, K.R., Cabala K.S., Munyemba K.F., Bastin, J.-F., Bogaert, J., Useni S.Y., 2022. Quantification and Simulation of Landscape Anthropization around the Mining Agglomerations of Southeastern Katanga (DR Congo) between 1979 and 2090. *Land*. **11**, 6, 850. <https://doi.org/10.3390/land11060850>
 33. Landis J.R. & Koch G.G., 1977, The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, **33**, 159-174.
 34. Leruth F., 2000. Les mosaïques d'images. *Taureau. Soc. Géogr. Liège* **38**, 95-106
 35. Li H. & Wu J., 2004, Use and misuse of landscape indices. *Landscape Ecology*, **19**, 389-399
 36. Li M., De Pinto A., Ulimwengu J.M, You L. & Robertson R.D., 2015, Impacts of Road Expansion on Deforestation and Biological Carbon Loss in the Democratic Republic of Congo, *Environmental Resource Economics*, **60**, 433-469.
 37. Lootens-De Muynck M.T., Mbuyi B.D. & Binzangi K., 1982. Typologie et aspects socio-économiques de quelques villages de bûcherons et charbonniers des environs de Lubumbashi. *Geo-Eco-Trop*, **6**, 45-63.
 38. Malaisse F., 1997, Se nourrir en forêt claire africaine. Approche écologique et nutritionnelle. Gembloux, Belgique: Les presses agronomiques de Gembloux.
 39. Malcorps P. & Lambin E., 2010, Activité minière au Katanga: changements de l'occupation du sol et exposition humaine aux métaux. In Decree S. & De Putter T. (Eds). *Activité minière au Katanga: changements d'occupation du sol et exposition humaine aux métaux, la quête des ressources en Afrique centrale*. Tervuren (Belgique), pp 85-88.
 40. Mama A., Sinsin B., De Cannière C. & Bogaert J., 2013, Anthropisation et dynamique des paysages en zones soudanienne au Nord du Bénin, *Tropicultura*, **31**, 78-88.
-

41. Mangion I., 2010, *Le futur mécanisme REDD face aux moteurs de la déforestation et de la dégradation des forêts au Brésil, en Indonésie et en RDC*. Université Libre de Bruxelles. Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire mémoire, 152p.
 42. Martin B., 2012, Quelles « mesures » pour quantifier la pauvreté ? Les indicateurs produits par les organisations internationales", *CERISCOPE Pauvreté*, 2012, [en ligne], consulté le 14/04/2017, URL: <http://ceriscope.sciences-po.fr/pauvrete/content/part1/quelles-mesures-pour-quantifier-la-pauvrete>
 43. Mas J.F., 2000, Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. *Can. J. Remote Sens.*, **26**, 349-362.
 44. Masse A., Ducrot D. & Marthon P., 2012, Evaluation de la classification supervisée par les caractéristiques de classe et > de classification", *Proc. SPIE 8390, Algorithmes et technologies pour l'imagerie multispectrale, hyperspectrale et ultraspectrale XVIII*, 83902R (24 mai 2012); DOI : <https://doi.org/10.1117/12.919163>
 45. MECNT, 2012, *Synthèse des études sur les causes de la déforestation et de la dégradation des forêts en République Démocratique du Congo*. Ministère de l'environnement conservation de la nature et tourisme, 40p.
 46. Münkner C-A., Bouquet M., Muakana R., 2015, *Elaboration du schéma directeur d'approvisionnement durable en bois-énergie pour la ville de Lubumbashi (Katanga)*. Programme Biodiversité et Forêts (PBF), Projet Filière Bois / Chaînes de valeur ajoutée.
 47. Munyemba K.F. & Bogaert J., 2014, Anthropisation et dynamique de l'occupation du sol dans la région de Lubumbashi de 1956 à 2009, *E-revue UNILU*, **1**, 3-23.
 48. Musampa K., 2009, *Etude des cas sur l'évaluation de la dégradation des forêts en RDC*. Document de travail 169, FAO.
 49. Mwitwa J., German L., Muimba-Kankolongo A. & Puntodewo A., 2012, Governance and sustainability challenges in landscapes shaped by mining: mining forestry linkages and impacts in the Copper Belt of Zambia and the DR Congo. *Forest Policy and Economics*, **25**, 19-30.
 50. Oliveau S., 2004. Les indicateurs locaux d'association spatiale (LISA) comme méthode de régionalisation Une application en Inde *ESPACE2 UMR 6012 CNRS - Université de Provence.*, *Septièmes Rencontres de Théo Quant*, 1-10p.
 51. Ouattara, G., Koffi, G.B., Kouakou Y.K.A., 2012, Contribution des images satellitaires Landsat 7 ETM+ à la cartographie lithostructurale du Centre-Est de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). *IJIAS*, **1** , 61-75
 52. Pontius R.G. & Millones M., 2011, Death to Kappa: birth of quantitydisagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *Int. J. Remote Sens.*, **32**, 4407-4429. DOI : > <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.552923>
 53. Potapov P.V., Turubanova S.A., Hansen M.C., Adusei B., Broich M., Altstatt A., Mane L.& Justice C.O., 2012, Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of the Congo,
-

- 2000-2010, with Landsat ETM+ data, *Remote Sensing Environment*, **122**, 106-116.
54. Promines, 2014, Evaluation stratégique environnementale et sociale du secteur minier en République démocratique du Congo. <http://www.prominesrdc.cd/fr/Rapport/sofreco.pdf>
 55. Schmitz A., 1971, *Végétation de la plaine de Lubumbashi. Région d'Elisabethville (Haut-Katanga)*. Bruxelles, Publ. INEAC, 320 p.
 56. Sonter L.J., Moran C.J, Baret D.J. & Soares-Filho B.S., 2014 ,Processes of land use change in mining regions. *Journal of Cleaner Production*, **84**, 494-501.
 57. Syampungani S., Geldenhuys C.J. & Chirwa P.W., 2016, Regeneration dynamics of *Miombo* woodland in response to different anthropogenic disturbances: forest characterisation for sustainable management. *Agroforestry Systems*, **90**, 563-576.
 58. Trefon T., Hendriks T., Kabuyaya N. & Ngoy B., 2010, *L'économie politique de la filière du charbon de bois à Kinshasa et à Lubumbashi: Appui stratégique à la politique de reconstruction post-conflit en R.D.C.* Working paper of the Institute of Development Policy and Management, University of Antwerpen.
 59. Tshibangu K.W.T., 2001, Etude du déboisement et de la crise de combustibles ligneux en tant que source d'énergie domestique à Kinshasa (République Démocratique du Congo). Thèse de doctorat: Université Libre de Bruxelles (Belgique).
 60. UN-REDD, 2012, Synthèse des études sur les causes de la déforestation et de la dégradation des forêts en République Démocratique du Congo, UN-REDD PROGRAMME
 61. Useni S.Y., Malaisse F., Cabala K.S., Bogaert J. & Munyemba K.F. 2017, Le rayon de déforestation autour de la ville de Lubumbashi (Haut-Katanga, RD Congo): Synthèse. *Tropicultura*, **35**, 215-221.
 62. Wadhawan M. & Ahmad S., 2010, Changes in Land use Pattern due to Mining in Faridabad (Haryana). ESRI India User Conference, India, 8p.
 63. Weerts A., 2015, Les sites miniers en République Démocratique du Congo : conflits et développement autour d'un espace hybride. In : Bogaert J. & Halleux J.M., Eds. Territoires périurbains : développement, enjeux et perspectives dans les pays du sud. Gembloux, Belgique : Les Presses agronomiques de Gembloux, pp 75-81.
 64. Zhao Q., Yu L., Li X., Peng D., Zhang Y. & Gong P., 2021, Progress and trends in the application of Google Earth and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, **13**(18), 3778.