

# Dynamique des écosystèmes forestiers de l'Arc Cuprifère Katangais en République Démocratique du Congo. I. Causes, transformations spatiales et ampleur

S. Cabala Kaleba<sup>1\*</sup>, Y. Useni Sikuzani<sup>1,2</sup>, K.R. Sambieni<sup>3,4</sup>, J. Bogaert<sup>3,5</sup> & F. Munyemba Kankumbi<sup>1,2</sup>

**Keywords:** Deforestation- Spatial transformation process- Anthropogenic effects- Mining activities- Katangese Copper Belt- DRC

## Résumé

Le développement socioéconomique issu de l'émergence du secteur minier en République Démocratique du Congo engendre des modifications profondes des écosystèmes naturels. L'objectif de cette étude est d'analyser la déforestation dans l'Arc Cuprifère Katangais (A.C.K.) en lien avec la prolifération des sites miniers et des villes sur base des images satellitaires issues du capteur Landsat de 2002 et 2015. Pour ce faire, une grille à mailles de 10 km x 10 km a été appliquée pour faire ressortir des attributs caractérisant la structure spatiale des forêts. Les résultats obtenus montrent qu'au sein de l'A.C.K., la superficie relative des forêts régresse et passe de 49% à 42% de 2002 à 2015. Les mailles sont en majorité caractérisées par une augmentation en nombre de taches de forêt et par une diminution de la superficie forestière. La dissection a été identifiée comme étant le processus de transformation spatiale dominant la dynamique de la couverture forestière dans 48% des mailles. L'agrégation, la création et l'élargissement des taches forestières ont été observées dans les milieux bénéficiant de mesures de conservation de la nature et/ou localisés dans des concessions privées. Une correspondance avec le développement urbain et minier a été cartographiée. Cette étude offre un cadre de réflexion pour une mise en place des politiques de gestion et de conservation durable appropriée des forêts katangaises susceptibles d'inverser cette dynamique.

## Summary

### Dynamics of Forest Ecosystems of the Katangese Copper Belt in the Democratic Republic of the Congo. I. Causes, Spatial transformations and Extent

The socio-economic development resulting from the emergence of the mining sector in the Democratic Republic of the Congo causes significant changes in the natural ecosystems. The objective of this study was to evaluate, the deforestation patterns in the Katangese Copper Belt (K.C.B.) caused by the proliferation of mining sites and urban areas using the Landsat images of 2002 and 2015. A 10 km x 10 km square grid was applied to calculate landscape metrics for forest pattern analysis. The results obtained within the K.C.B. show that, the relative area of forests decreases from 49% to 42% between 2002 and 2015. Most squares are characterized by an increase in the number of forest patches and by a reduction of the forest area. Dissection was identified as the dominant spatial transformation process governing the forest cover dynamics. Other processes observed related to anthropogenic effects in landscapes were the suppression and the fragmentation. Aggregation, creation and enlargement dominate those squares situated in private concessions or in which forest conservation initiatives are developed. A link between the overall forest cover declining and the development the urban areas and the mining sites has been mapped. This study can serve as a conceptual framework for the application of policies oriented towards a more sustainable conservation of the Katangese forests, hence inverting the current trends.

<sup>1</sup>Université de Lubumbashi, Faculté des Sciences Agronomiques, Unité de Recherche Écologie, Restauration Écologique et Paysage, Lubumbashi, R.D. Congo.

<sup>2</sup>Université de Lubumbashi, Centre de Compétences en Planification et Gestion urbaine, Lubumbashi, R.D. Congo.

<sup>3</sup>Ecole Régionale Post-Universitaire d'Aménagement et de Gestion Intégrés des Forêts et Territoires Tropicaux, Campus UNIKIN, Kinshasa, R.D. Congo.

<sup>4</sup>Université de Liège, Faculté d'Architecture, Laboratoire Ville-Territoire-Paysage, Liège, Belgique.

<sup>5</sup>Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Unité Biodiversité et Paysage, Gembloux, Belgique.

\*Auteur correspondant: Email: sylvestrecabala@gmail.com

Reçu le 06.12.16 et accepté pour publication le 03.03.17

## Introduction

La forêt figure parmi les grandes ressources naturelles dont la préservation est l'une des préoccupations du développement durable (13, 16). Le recours aux enjeux d'aménagement et de protection des écosystèmes restants seraient à ce jour un moyen susceptible de faire face à ce défi (16, 17). En effet, les écosystèmes boisés procurent aux êtres vivants de nombreux services écosystémiques. Cependant, les conditions socioéconomiques dans lesquelles vivent les populations de la République Démocratique du Congo (R.D. Congo) sont tributaires des activités perturbatrices de l'occupation du sol (3). A cet effet, au Sud-ouest de la R.D. Congo, dans l'Arc Cuprifère Katangais (A.C.K.), les ressources minières rentables constituent la principale exploitation à laquelle s'ajoutent d'autres mécanismes de survie (26). La libéralisation du secteur minier en juillet 2002 a attiré de nombreux investisseurs dont le résultat fut la prolifération des sites miniers (19) passant de deux à plus d'une centaine d'entreprises minières, accompagnées par de nouvelles infrastructures et une augmentation de la densité de la population (30, 31). Or, les activités minières produisent des effets directs, indirects et cumulatifs sur l'environnement. Elles concentrent une grande population sur une faible portion du territoire produisant ainsi une pression énorme suivie de nombreuses conséquences environnementales. Parmi ces conséquences, l'une des plus visibles est la déforestation (30) qui se matérialise par la fragmentation, la dégradation et la réduction de l'étendue des écosystèmes naturels (4) laissant la place aux types d'occupation du sol anthropisés. Etant donné que les forces socioéconomiques liées aux activités anthropiques engendrent des pressions sur les habitats naturels qui résultent ultimement en une transformation du territoire (13, 42, 47), le Sud du Katanga, en particulier l'A.C.K., a subi une transformation profonde depuis 2002. Ainsi, le paysage qui autrefois était presque entièrement couvert de forêts claires (35, 36), est actuellement dominé par des habitats anthropisés (24, 25). De ce fait, au sein de l'A.C.K., la déforestation observée durant cette période, est en lien avec la prolifération des activités minières et probablement responsable du déclin de nombreuses espèces animales et végétales (27). Ce phénomène de déforestation a été évoqué à travers tout le Katanga (25), dans la région de Lubumbashi (40), dans l'A.C.K. et dans le Copper Belt Zambien (42). Et, de plus en plus, elle accuse une progression allant de 0,2 à 1.5 % par an (17, 25, 40, 42).

Dans ce contexte, il importe d'analyser la dynamique des habitats forestiers à l'échelle du territoire afin d'expliquer leur répartition spatiale actuelle, ainsi que les processus de transformation spatiale qui en sont responsables (6, 7).

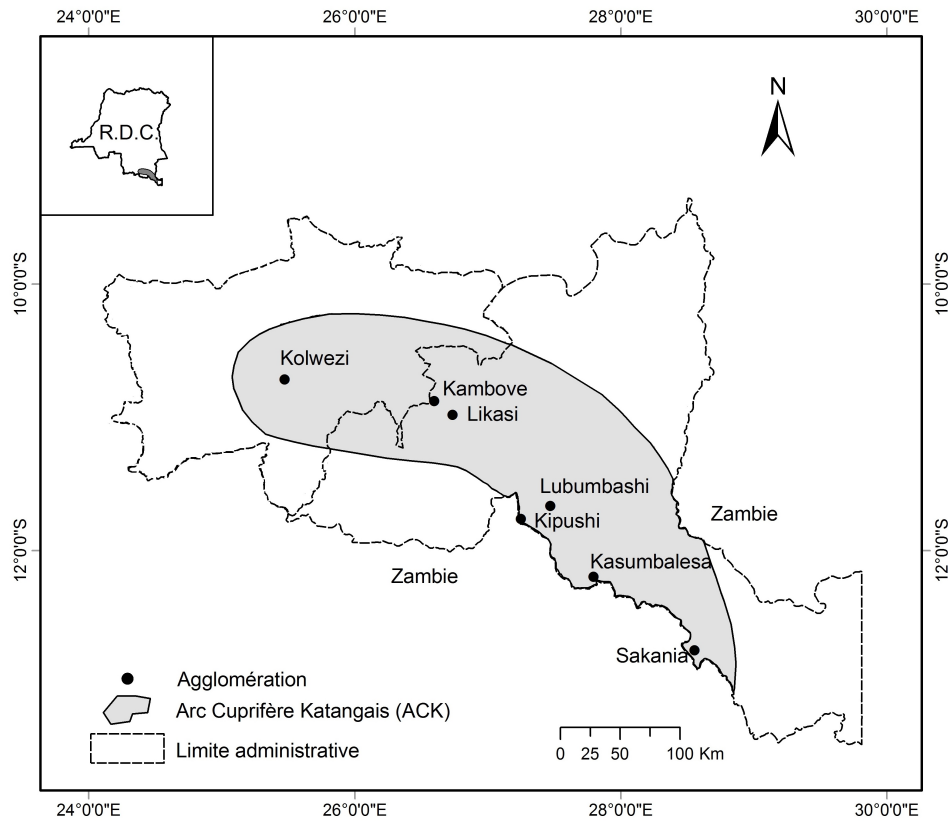
A cet effet, l'utilisation de l'imagerie satellitaire dans des analyses diachroniques s'impose comme l'approche appropriée pour quantifier la disponibilité et la distribution spatiale des habitats forestiers sur de vastes territoires (17, 38). La connaissance de la structure spatiale forestière permettra également une évaluation des conséquences écologiques de cette structure, qui correspond à l'hypothèse centrale de l'écologie du paysage (4, 5). Par conséquent, l'objectif de cette étude était de caractériser et interpréter la dynamique de la couverture forestière au sein de l'A.C.K à partir d'une analyse diachronique du paysage entre 2002 et 2015 sur base de données issues du capteur Landsat.

## Matériel et méthode

L'A.C.K. est situé dans les provinces du Lualaba et du Haut-Katanga, au Sud de la République Démocratique du Congo (8, 26). Il s'étend de 10°12' à 13°3' S et de 25°4' à 28°51' E, et est constitué de plus d'une centaine d'affleurements cupro-colbaltifères formant une convexité progressant jusqu'en Zambie («Copper Belt») (8, 15, 42). Par la genèse du sol et le caractère phytogéographique spécifique, l'A.C.K. forme une division géologique bien individualisée.

La zone d'étude couvre environ 48.358 km<sup>2</sup> (Figure 1). Caractérisé principalement par la forêt claire (miombo), la forêt dense sèche (muhulu), la forêt galerie (mushitu), les variantes de savanes et les prairies marécageuses, l'A.C.K. héberge sur ses collines une flore originale adaptée à une forte concentration en métaux lourds auxquels elle est parfois inféodée (21). Des termitières plus ou moins régulières, contrastent les diverses formations végétales (35, 36). Le climat est du type tropical sec avec deux saisons: une saison sèche plus longue et relativement froide suivie d'une saison pluvieuse chaude avec des températures parfois élevées (26). Les sols sur lesquels pousse le miombo sont d'origine éluviale et reposent sur des roches quartzites et schistes granitiques. Généralement, il évolue sur des sols de type géologique ancien et acides qui sont peu fertiles (35).

La couverture forestière de la décennie étudiée (2002 à 2015) a été extraite d'images satellitaires issues du capteur Landsat. Les différentes images utilisées dans cette étude ont été téléchargées du site internet (<http://glovis.usgs.gov.com>). Afin de garder une cohérence dans la réponse spectrale des différents couverts végétaux, les images ont toutes été acquises pendant le début de la période de saison sèche (avril-mai) en vue d'obtenir des différences spectrales plus grandes entre les éléments paysagers (12, 43), notamment le contraste entre les systèmes de végétation naturelle et ceux de type anthropique. L'A.C.K. a été couvert par six scènes Landsat, ensuite divisées en mailles de 10 km x 10 km.



**Figure 1:** Délimitation approximative de l’Arc Cuprifère Katangais sur base des cartes géologiques et des missions de terrain. Il est présent dans les provinces du Lualaba et du Haut-Katanga et contient plusieurs grandes agglomérations, dont Lubumbashi, Likasi et Kolwezi. La zone se prolonge jusqu’en Zambie où elle est dénommée «Copper Belt».

De toutes ces mailles, celles couvrant l’A.C.K. ont été retenues. Les images Landsat-5 (TM) et Landsat-7 (ETM+) utilisées pour la création de la mosaïque 2002 ont été produites à partir des bandes et des filtres suivants (11, 33): bande 5, moyen infrarouge appliqué au filtre rouge; bande 4, proche infrarouge appliqué au filtre vert; bande 3, rouge appliqué au filtre bleu. Quant aux images Landsat-8 (OLI), elles ont été produites à partir des bandes et des filtres suivants pour la mosaïque 2015: bande 6, infrarouge à ondes courtes appliqué au filtre rouge; bande 5, proche infrarouge appliqué au filtre vert; bande 4, rouge appliqué au filtre bleu. Toutes ces données ont été traitées avec le logiciel ENVI 4.5. Les images Google Earth couvrant l’A.C.K. ont été utilisées afin d’identifier les différents types de couverts végétaux et leur réponse spectrale sur les images satellites Landsat de 2015. En outre, elles ont aussi servi dans le choix des sites témoins et pour la validation des classifications.

L’A.C.K. est caractérisé par un paysage assez hétérogène dont les transitions se font graduellement au travers des mosaïques d’occupation du sol (35, 36). Deux missions de terrain ont été effectuées dans le but de reconnaître et de définir les éléments paysagers de la zone d’étude et relever des points GPS représentatifs de chaque classe d’occupation du sol. Par ailleurs, une carte de l’occupation du sol (14) a été utilisée dans la reconnaissance et la définition des classes. Les points collectés pour les classes anthropiques ont nécessité une enquête préalable sur leur existence dans le temps (par rapport à 2002). En tout, 950 points GPS ont été acquis et conservés en UTM (Universal Transverse Mercator, système de projection par défaut WGS84). Diverses techniques classiques de traitement des images satellitaires ont été utilisées pour aboutir à la classification supervisée. Pour interpréter l’occupation du sol des images satellitaires, les compositions colorées Rouge, Vert et Bleu des bandes 5-4-3 pour les images de 2002 et 6-5-4 pour les images 2015 ont été effectuées (28).



La classification non supervisée, qui précède à la classification supervisée, a permis d'avoir des surfaces homogènes où les pixels ont des propriétés spectrales similaires. L'image issue de la classification non supervisée a servi à la numérisation des sites témoins nécessaire à la classification supervisée. Avant d'extrapoler les échantillons de terrain à l'ensemble de l'image, il a été nécessaire de vérifier la discrimination des classes. Pour ce faire, un test de séparabilité des classes a été fait en utilisant la distance de Jeffries-Matusita (2, 10). Ensuite, l'algorithme du maximum de vraisemblance a été appliqué (4, 37, 41).

Pour chaque classification, dix classes d'occupation du sol précédemment définies ont pu être discriminées (eau, habitat-sol nu, prairie marécageuse, savane herbeuse, savane arbustive, savane arborée, savane boisée, forêt claire, forêt galerie et forêt dense sèche). Les trois classes d'habitats forestiers (forêt claire, forêt galerie et forêt dense sèche) ont été regroupées ainsi que les autres classes (eau, habitat-sol nu, prairie marécageuse, savane herbeuse, savane arbustive, savane arborée et savane boisée) pour produire une carte forêt/non-forêt. Enfin, la précision des classifications obtenues a été évaluée à travers la matrice de confusion. Deux indices de validation de classification ont été employés (18), à savoir la précision globale qui caractérise la proportion de pixels bien classés et l'indice de Kappa qui correspond au rapport entre les pixels correctement classés et l'ensemble des pixels considérés. Une étude peut être validée si l'indice de Kappa est compris entre 50% et 75% (18, 32, 44). L'étude de la dynamique spatiale du couvert forestier a été réalisée avec des données vectorielles. L'A.C.K. a été subdivisé en 488 mailles carrées de 10 km x 10 km dont 411 mailles entières et 77 mailles partielles couvrant plus de 50%. Afin de caractériser la structure spatiale forestière de toute la zone d'étude puis de chaque maille, le nombre de taches forestières et l'aire totale forestière ont été déterminés. L'augmentation du nombre de taches d'une classe est supposée due à la fragmentation de cette classe et renseigne donc sur l'anthropisation du paysage, qui est censée d'aller de pair avec la réduction de l'aire totale de la classe considérée (23, 39). En outre, la distribution cumulative des valeurs de pourcentages des forêts pour les différentes mailles a aussi été étudiée. Pour analyser la dynamique d'occupation du sol entre 2002 et 2015, la matrice de transition a été élaborée en superposant les deux cartes (7, 37, 46). L'arbre de décision (6, 37, 40) a permis de déterminer les processus de transformation spatiale dominant de la forêt au sein de l'A.C.K., ensuite dans chaque maille. Les transformations possibles que peuvent subir une classe au niveau des taches sont: l'agrégation, la

suppression, la création, la déformation, l'élargissement, la perforation, le déplacement, le rétrécissement, la fragmentation et la dissection. Pour séparer la fragmentation de la dissection, la valeur seuil prédéfinie de  $t=0,5$  (37, 40, 41) a été comparée au  $t_{observé}$  ( $a_0/a_1$ ). Lorsque  $t_{observé} > t$ , c'est la fragmentation qui est identifiée.

Afin d'interpréter les tendances de déforestation observées, des cartes ont été produites sur base de la classification initiale (10 classes, donc avant le regroupement des classes) en considérant uniquement la classe «habitat-sol nu», qui est censée refléter l'anthropisation de la zone d'étude entre 2002 et 2015, en particulier l'urbanisation et les infrastructures associées. La correspondance de ces cartes avec la présence des grandes agglomérations et centres d'activités minières à impact spatial majeur a également été visualisée.

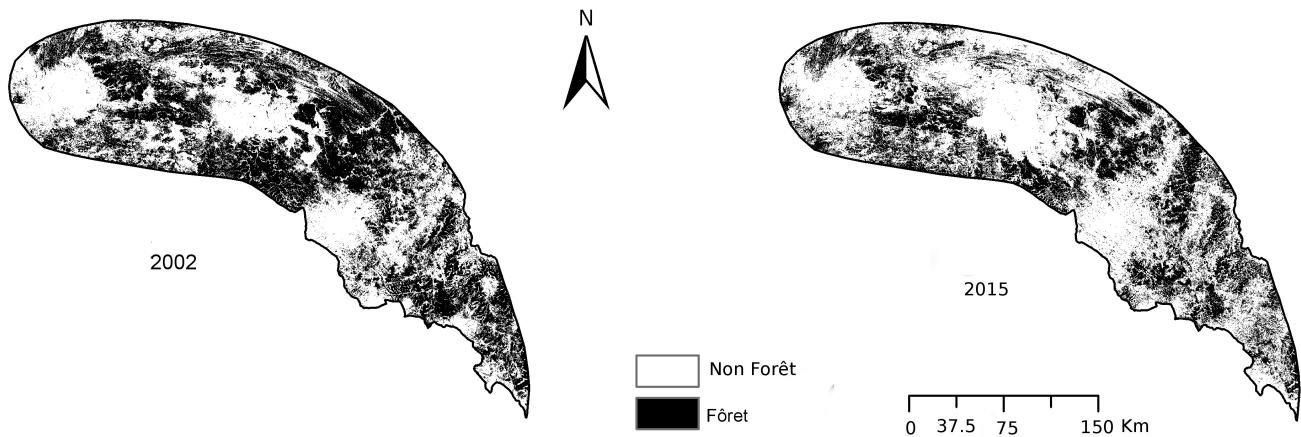
## Résultats

Les valeurs de précision globale (97,8 et 97,0%) ainsi que les valeurs du coefficient Kappa variant entre 0,95 et 0,90 respectivement pour les images Landsat de 2015 et 2002 démontrent que les classifications réalisées sont recevables (18, 32, 44).

Visuellement, une régression des espaces forestiers entre 2002 et 2015 est remarquable (Figure 2). Cette régression est particulièrement prononcée notamment dans la partie Sud-Est sur la carte de 2015. La matrice de transition (Tableau 1) confirme cette observation; la classe forêt est passée de ~49% en 2002 à ~42% en 2015 soit une régression de ~7% en 13 ans. On y note alors la présence d'un véritable front de déforestation dans lequel la forêt est pourvoyeuse d'espaces et est convertie en d'autres types d'occupation de sol. La déforestation, qui correspond à une superficie proportionnelle cumulative de ~16%, n'est pas compensée par la reforestation, qui ne dépasse pas la superficie proportionnelle cumulative de ~8%.

Le tableau 2 présente les indices de structure spatiale calculés pour les images classifiées de 2002 et 2015. La dissection a été identifiée comme le processus de transformation spatiale régissant l'A.C.K. entre 2002 et 2015 sur toute la zone d'étude pour la classe de forêt contrairement aux zones «Non forêt» qui ont connu une agrégation de leurs éléments paysagers. Quant au nombre de taches, la densité de taches boisées a augmenté tandis qu'une tendance opposée est observée pour les zones «Non forêt».

L'analyse au niveau des mailles (uniquement effectuée pour la classe des forêts) a révélé la présence de 6 processus de transformation spatiale (Figure 3). Ainsi, la déforestation et la reforestation ont été observées de 2002 à 2015, comme déjà indiquée par la matrice de transition.



**Figure 2:** Cartographie de la couverture forestière de l'Arc Cuprifère Katangais sur base des mosaïques d'images Landsat 2002 et 2015 classifiées. Une régression des zones boisées est visuellement remarquable entre 2002 et 2015.

**Tableau 1**

Matrice de transition (2002-2015) sur base d'images Landsat pour l'Arc Cuprifère Katangais (superficies en % de la zone d'étude; superficie totale: 48.358 km<sup>2</sup>).

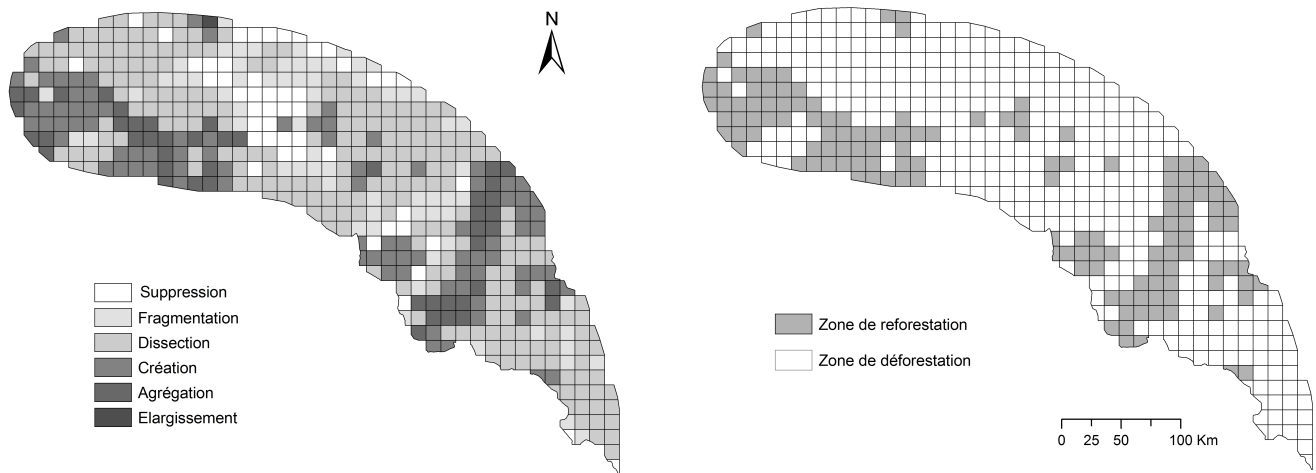
		2015		
		Forêt	Non Forêt	Total
2002	Forêt	33,96	15,51	49,47
	Non Forêt	7,99	42,54	50,53
	Total	41,95	58,05	100

**Tableau 2**

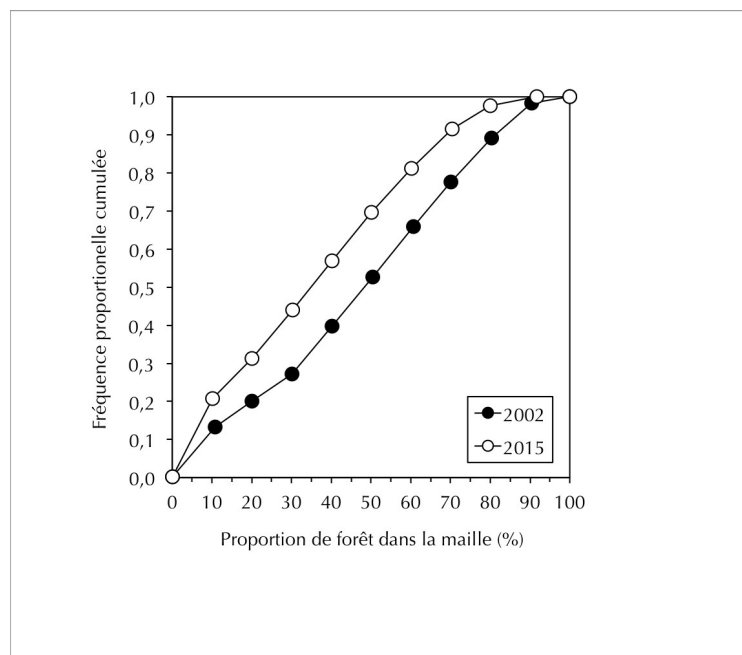
Analyse de la dynamique spatiotemporelle de l'Arc Cuprifère Katangais entre 2002 et 2015 sur base d'images Landsat.

Récapitulatif des indices de structure spatiale utilisés pour la détermination des processus de transformation spatiale caractérisant l'évolution de la structure spatiale de la forêt (nombre de taches (n); aire totale en km<sup>2</sup> (a)).

	Forêt	Non Forêt
$n_{2002}$	86298	104653
$a_{2002}$	46780,4	47787,72
$n_{2015}$	138163	102213
$a_{2015}$	39672,78	54895,34



**Figure 3:** Analyse de la dynamique spatiotemporelle des zones forestières de l'Arc Cuprifère Katangais entre 2002 et 2015. Détermination des processus de transformation spatiale sur base d'images Landsat. Analyse effectuée sur 488 mailles de 10 km x 10 km. La carte supérieure montre les processus de transformation spatiale par maille pour la classe de forêt. La carte inférieure présente l'interprétation des processus de transformation spatiale observés. La dissection est le processus dominant dans l'Arc Cuprifère Katangais accompagnée de la fragmentation et la suppression caractérisant également la déforestation. La création, l'agrégation et l'élargissement sont des processus de reforestation.



**Figure 4:** Analyse de la déforestation de l'Arc Cuprifère Katangais (2002-2015) effectuée sur base d'images Landsat. La zone d'étude a été divisée en mailles de 10 km x 10 km. Pour chaque année d'étude et pour l'ensemble des mailles, la distribution cumulative de la proportion de forêt par maille a été étudiée. La position supérieure de la courbe de 2015 par rapport à celle de 2002 indique une évolution vers des proportions de forêt plus faibles. Graphique conçu sur base de valeurs représentatives afin de mieux visualiser la tendance.

La déforestation a été observée sous forme de dissection et comme le processus dominant dans 233 des 488 mailles (~48%), suivi de la fragmentation (68 mailles ; ~14%) et la suppression (49 mailles; ~10%). Par contre, la reforestation a été révélée par la création qui a été le processus dominant sur 90 mailles (~18%), suivi de l'agrégation et de l'agrandissement, respectivement sur 47 mailles (~10%) et 1 maille (~0,2%). La figure 3 montre également les deux grandes tendances observées sur base des processus de transformation spatiale décrits ci-dessus: la déforestation qui se manifeste presque partout dans l'A.C.K., sauf dans trois zones distinctes où la reforestation domine.

Les tendances de déforestation/reforestation sont également illustrées par la distribution cumulative des proportions de forêt par maille (Figure 4). Les allures des courbes mettent en évidence un morcellement des forêts au cours de la période étudiée.

La proportion moyenne diminue de 46,5% à 35,6% entre 2002 et 2015; la proportion médiane connaît une tendance similaire, elle évolue de 48,4% vers 34,2% dans la période étudiée.

## Discussion

La visualisation spatiale de l'A.C.K. a été facilitée par la sélection de six scènes Landsat, ayant une résolution spatiale et spectrale appropriée permettant une analyse des patrons paysagers. La disponibilité, le taux de saturation nuageuse (<10%), le caractère saisonnier (mai, en début de saison sèche) ont été les éléments clés dans la sélection des images (7, 11, 14, 37). La composition des mosaïques s'est effectuée avec les bandes spectrales du visible et du proche infrarouge. En effet, elles apportent chacune des renseignements différents et complémentaires sur la couverture du sol et sont fréquemment utilisées en télédétection (11, 12, 34).

Il convient de noter que dans cette étude, la résolution spatiale de l'image Landsat de 30 m x 30 m a été respectée, sans agrégation spatiale ultérieure.

Une application de cette dernière technique aurait pu éviter l'effet « poivre et sel » qui a caractérisé nos cartes d'occupation du sol mais qui également souligne le taux de fragmentation des écosystèmes forestiers.

Les valeurs de précision globale des images classifiées ainsi que les valeurs de coefficient Kappa attestent que les classifications réalisées sont fiables (18, 32, 44). L'examen des résultats des matrices de confusion confirme qu'au niveau des deux images, il n'y a pas eu globalement de fortes confusions entre les classes. Cela s'explique, d'une part, par la qualité des images et, d'autre part, par le choix des sites de validation et la fusion des classes thématiques (3, 46).

Le maillage de 10 km x 10 km utilisé est conforme à d'autres études en rapport avec la thématique. Il est crucial de trouver un compromis entre la réalité du terrain en termes hétérogénéité et la précision spatiale de l'analyse (1). Malgré le découpage potentiel arbitraire des taches par les limites des mailles, ses avantages sont nettement à mettre en évidence. Sa simplicité et sa praticabilité dans le traitement des données sont parmi les principaux arguments qui font du maillage, une méthode adaptée pour une telle étude (1, 48).

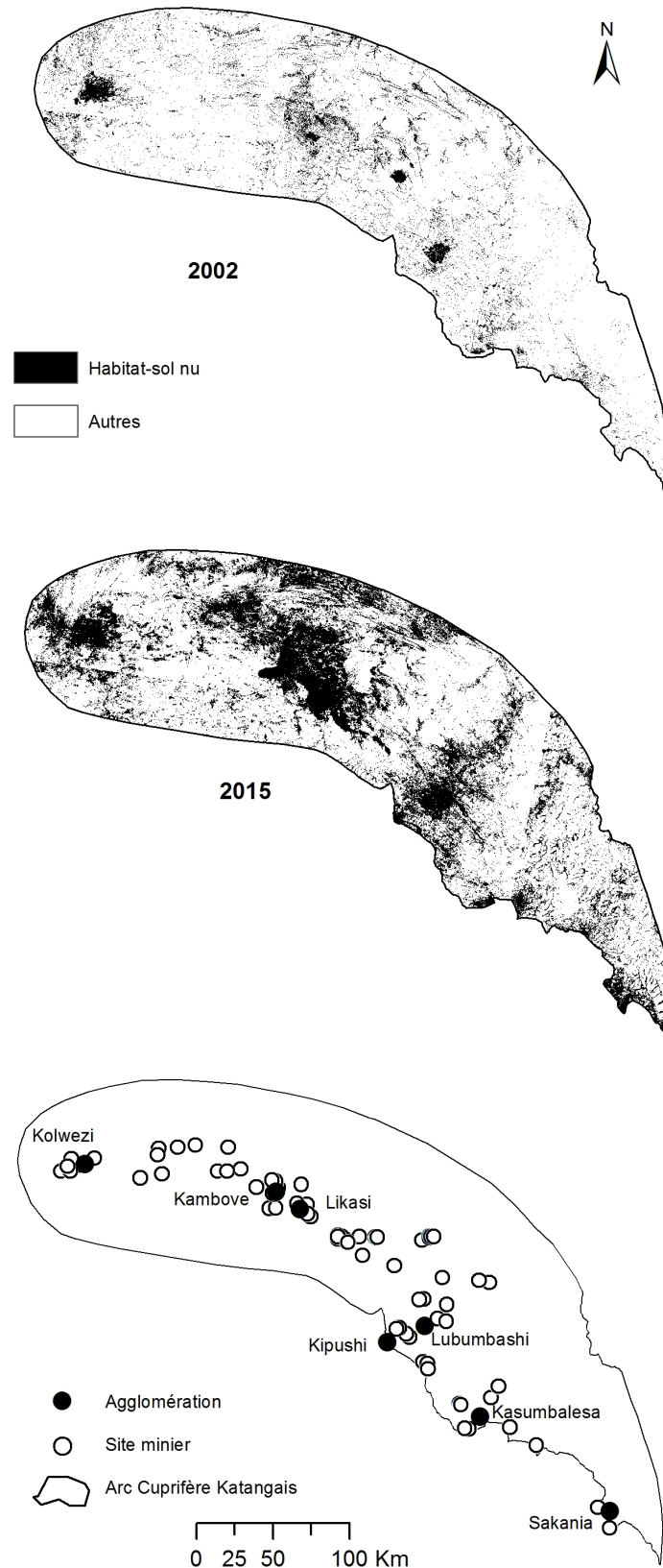
En ce qui concerne la visualisation de l'anthropisation, l'étude se limite à la classe « habitat-sol nu » qui représente une relation directe à l'urbanisation et ignore les activités agricoles, étant donné le manque de correspondance directe entre les classes d'occupation du sol obtenues après classification et l'agriculture. Plusieurs classes pourraient être associées aux activités de production agricole ou aux occupations du sol post-culturelles, malheureusement sans exclusivité.

L'illustration d'une zonation de déforestation et de reforestation au sein de l'A.C.K. s'explique par la présence de grandes agglomérations katangaises ainsi que d'infrastructures liées à l'industrie minière (mines à ciel ouvert, sites métallurgiques, réseaux routiers, etc.) (Figure 5), à savoir: (i) au nord-ouest de l'A.C.K., la ville de Kolwezi et la zone minière environnante; (ii) au centre, la ville de Likasi avec sa périphérie minière; et (iii) au sud, les villes de Lubumbashi et Kipushi accompagnées de sites d'extraction. La reforestation se manifeste surtout au sud de la ville de Kolwezi, le long de la frontière avec la Zambie, et dans deux zones distinctes, dont l'une se trouve à plusieurs kilomètres à l'est de Lubumbashi et l'autre aux environs de Kipushi. De 2002 à 2015, la couverture forestière a fortement diminué en passant de 49% en 2002 à 42% en 2015 soit 0,5%/an.

Ce taux de déforestation devient supérieur au taux annuel au niveau national (0,2%) (13, 16, 17) mais rapproche le taux (0.6-1,8%) de ceux qui ont travaillé dans toute l'ancienne province du Katanga (24, 25), dans l'Arc Cuprifère Katangais et le Copper belt zambien (42), et dans la région de Lubumbashi (41). Selon (45) dans sa quantification des forêts de la RDC le taux de déforestation dépendait de facteurs du milieu en interaction avec la société (7).

En effet, après la libéralisation du secteur minier en juillet 2002, l'A.C.K. a connu des flux migratoires occasionnés par le boum minier (24) et par conséquent les pressions anthropiques sur l'environnement se sont multipliées (13, 20). Plusieurs auteurs ont constaté que les activités minières et industrielles poussent les ruraux à abandonner leurs terres à la recherche d'activités plus rémunératrices (49).





**Figure 5:** Cartographie de l'anthropisation et l'urbanisation de l'Arc Cuprifère Katangais entre 2002 (carte supérieure) et 2015 (carte centrale) sur base d'images Landsat. L'urbanisation et les infrastructures associées sont visualisées au moyen de la classe «habitat-sol nu». La carte inférieure montre la distribution des agglomérations principales et centres d'activités minières à impact spatial majeur de l'Arc Cuprifère Katangais.



De ce fait, elles forment un noyau à partir duquel la fragmentation s'amplifie suite aux activités anthropiques de fortune qui se créent avec la coupe de bois de feu et de bois d'œuvre, le dessouchage des terrains agricoles, etc. (9, 31, 47). Les indices calculés, ainsi que l'utilisation de l'arbre de décision (6) montrent que les paysages de l'A.C.K. subissent des mutations profondes. Entre 2002 et 2015, la dissection a été le processus de modification identifié pour la classe de forêt. Au niveau des mailles, les forêts de l'A.C.K. ont connu premièrement une déforestation qui s'est matérialisée par une dissection, une fragmentation ou une suppression (24, 25, 40, 42). En cas d'anthropisation du paysage, les taches associées aux activités anthropiques subissent des transformations différentes de celles associées aux formations naturelles (5). L'aire des taches de forêts a diminué suite aux diverses activités anthropiques qui s'imposent et imprègnent des modifications structurales. La prolifération des sites miniers au sein de l'A.C.K. aurait engendré ces modifications. D'ores et déjà les activités minières ont été évoquées comme agissant directement, indirectement et implicitement sur l'environnement (27, 30).

Les processus de dissection, de fragmentation et de suppression reflètent ici l'ouverture des routes pour l'évacuation et l'approvisionnement des sites miniers, la création des agglomérations autour et le long des routes rattachées, lesquelles s'accompagnent d'une forte pression sur l'environnement. Les échanges Chine-R.D. Congo se soldent au sein de l'A.C.K. par la présence de nombreuses collines dénudées de leurs couvertures végétales, des trous béants, des tas de scories, des agglomérations de fortune, etc. (19, 21, 27). En effet, ces accords consistent aux échanges des ressources minières contre la création et l'amélioration des infrastructures routières (19). Dans cette étude, une observation particulière a été révélée.

En l'absence d'activités humaines, certaines mailles enregistrent entre 2002 et 2015, des taches de forêts qui se comportent comme des taches des classes anthropisées. Elles se créent, s'élargissent et s'agrègent. Ces processus impliquent une augmentation de l'aire des forêts, ce qui est en contradiction avec d'autres observations ou hypothèses (5). Cette augmentation de superficie proviendrait de la densification ligneuse.

Cette situation pourrait s'expliquer principalement par l'effet de protection (22, 37).

En effet, dans les concessions privées, le contrôle du feu figure parmi les grandes activités : les forêts ne brûlent généralement pas et sont souvent protégées par des coupes feux (47). De même, les protections naturelles comme les cours d'eau ou la topographie peuvent freiner la fréquence des feux de brousse dévastatrices (35, 36). Ce constat confère aux forêts galeries, et même aux forêts fixées sur les termitières et collines sans ressources minérales exploitables d'être moins vulnérables aux diverses pressions anthropiques (29). Par ailleurs, un effort soutenu du (re)boisement n'est pas à exclure dans les concessions de certaines entreprises minières comme Tenke Fungurume, Kinsevere, Kinsamfu. L'augmentation de la superficie forestière a été constatée dans les concessions protégées au Niger dans le Parc National du W du Niger (PNWN) (22) en Côte d'Ivoire au Nzi-Bandama (29) et au Sénégal à Ferlo (46).

## Conclusion

Les analyses montrent que dans la période 2002-2015, les forêts de l'A.C.K. ont principalement subi une « dissection ». Cependant, dans certaines zones, une progression de la forêt a été constatée. Les forêts de l'A.C.K. sont donc exposées à la pression anthropique et nécessite une application des mesures conservatoires et/ou régénératrices. La privatisation de certaines concessions forestières pourrait conduire à la (re)forestation en réduisant la coupe anarchique souvent occasionnée par les conditions socioéconomiques précaires dans lesquelles vivent les populations.

A travers cette étude, des informations nécessaires sont disponibles aux décideurs politiques et aux chercheurs pour une mise en place des politiques de gestion et de conservation durable appropriée susceptible d'inverser cette dynamique de déforestation. Elles pourront également être utilisées dans la prédiction des changements pouvant subvenir à moyen terme dans ce paysage dans le but d'orienter les actions de recherche et de conservation.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'ARES-CCD (programme d'Appui Institutionnel avec l'Université de Lubumbashi) ainsi que le Doyen de la Faculté des Sciences Agronomiques.

## Références bibliographiques

1. Abdellaoui A., Visan L. & Patru-Stupariu I., 2010, Etude de la viabilité du paysage par analyse de grille dans la région Sous Carpatique dans la Vallée de Prahova (Roumanie), *Revista Geomorfologie*, **12**, 81-90.
2. Aduah M.S., Warburton M.I. & Jewitt G., 2015, Analysis of land cover changes in the Bonsa, catchment, Ankobra Basin, Ghana, *Appl. Ecol. Environ. Res.*, **13**, 935-95.
3. Bamba I., Mama A., Neuba D.F.R., Koffi K.J., Traore D., Visser M., Sinsin B., Lejoly J. & Bogaert J., 2008, Influence des actions anthropiques sur la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la province du Bas Congo (République Démocratique du Congo), *Sci. Nat.*, **5**, 9-60.
4. 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 ad forest management: challenges and solutions in a changing globe*. Higher Education Press, Beijing and Verlag Heidelberg, Berlin: Springer, 273-296.
5. Bogaert J., Barima Y.S.S., Ji J., Jiang H., Bamba I., Iyongo W.M.L., Mama A., Nyssen E., Dahdouh-Guebas F. & Koedam N., 2011, *A methodological framework to quantify anthropogenic effects on landscape pattern*. In: *Landscape ecology in Asian cultures* (eds S.-K. Hong, J. Wu, J.-E. Kim & N. Nakagoshi). Springer, Verlag, New York. 27p.
6. Bogaert J., Ceulemans R. & Salvador-Van Eysenrode D., 2004, Decision tree algorithm for detection of spatial processes in landscape transformation, *Environ. Manage.*, **33**, 62-73.
7. Bogaert J. & Mahamane A., 2005, Ecologie du paysage: cibler la configuration et l'échelle spatiale, *Ann. Sci. Agron. Bénin*, **7**, 1-15.
8. Bruneau J.-C. & Mansila Fu-Kiau., 1986, Kolwezi: L'espace habité et ses problèmes dans le premier centre minier du Zaïre. *Cah. Sci. Hum.*, **22**, 217-229.
9. Burel F. & Baudry J., 2003, *Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*. Paris, France: Tec & Doc., 359p.
10. Christopher J.S. & Timothy A.W., 2002, Scale and texture in digital image classification. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, **68**, 51-63.
11. Collin G.H., Douglas R. R., Thomas C., Edwards Jr. & Allan F., 1997, Landscape Cover-Type Modeling Using a MultiScene Thematic Mapper Mosaic, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, **63**, 59-67.
12. Conghe S., Curtis E.W., Karen C.S., Mary Pax L. & Scott A.M., 2001, Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *Remote Sens. Environ.*, **75**, 230-244.
13. 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.
14. Defourny P., Vancutsem C., Pekel J.-F., Evrard C. & Malaisse F., 2006, *Carte de l'occupation du sol de la République Démocratique du Congo*. Presses Universitaires de Louvain, Bruxelles.
15. DeWaele S., Muchez Ph., El Desouky H., Haest M. & Heijlen W. 2008, *Multiphase origin of the base metal deposits in the Lufilian fold-and-thrust belt, Katanga* (Democratic Republic of Congo). [http://edit.africamuseum.be/geco\\_website/](http://edit.africamuseum.be/geco_website/), 02 Mai 2016.
16. DeWasseige C., De Marken P., Bayol N., Hiol Hiol F., Mayaux Ph., Desclée B., Nasi R., Billand A., Defourny P. & Eba Atyi R., 2012, *Les forêts du bassin du Congo: Etats des forêts 2010*. OSFAC, Office de publication de l'union européenne, Luxembourg, 276p.
17. FAO., 2007, *Situation des forêts en 2007*. Rome, 143p. <http://www.fao.org/docrep/009/a0773f/a0773f00.htm>, 15 Octobre 2014.
18. Fitzgerald R. W. & Lees B.G., 1994, Assessing the classification accuracy of multisource Remote Sensing data, *Remote Sens. Environ.*, **43**, 362-368.
19. Global Witness., 2011, La Chine et le Congo: deux amis dans le besoin. <http://www.globalwitness.org>, 17 Juillet 2014.
20. GROUPE HUIT., 2009, *Elaboration du plan urbain de référence de Lubumbashi*. Rapport final Groupe Huit, BEAU, Ministère des ITR, RD Congo, 62p
21. Ilunga wa Ilunga E., Grégory M., Julien P., Maxime S., Mylor N., Pierre M. & Michel-Pierre F., 2015, *Plant functional traits as a promising tool for the ecological restoration of degraded tropical metal -rich habitats and revegetation of metal-rich bare soils: a case study in copper vegetation of Katanga, DRC*, *Ecol. Eng.*, **82**, 214-221
22. Inoussa M. M., Mahamane A., Mbow C., Saadou M. & Yvonne B., 2011, Dynamique spatio-temporelle des forêts claires dans le Parc National du W du Niger (Afrique de l'Ouest), *Sécheresse*, **22**, 108-116.
23. Jaeger J.A.R., 2000, Landscape division, splitting index and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation, *Landscape Ecol.*, **15**, 115-130.
24. 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), 250p.
25. Kabulu D.J., Bamba I., Munyemba K.F., Defourny P., Vancutsem C., Nyembwe N.S., Ngongo L.M. & Bogaert J., 2008, Analyse de la structure spatiale des forêts au Katanga, *Ann. Fac. Sci. Agron.*, **1**, 12-18.
26. 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.
27. Kirsten H. & Megevand C., 2013, *Dynamiques de la déforestation dans le bassin du Congo, Réconcilier la croissance économique et la protection de la forêt*. Document de travail n°4, Washington, DC, World Bank.
28. Koné M., Kouadio K., Yao L. Kouadio Y.L., Neuba D.F.R., Djah F. & Malan D.F., 2014, Dégradation de la forêt dense humide tropicale, cas de la région de l'Indénié-Djuablin à l'Est de la Côte d'Ivoire, *J. Animal & Plant Sci.*, **21**, 3324-3338, <http://www.m.elewa.org/JAPS>, 14 Octobre 2015.

29. Kouassi A.M., Koffi K.F., Ahoussi K.E., Sekouba O.S. & Bieme J., 2012, Impacts conjugués des changements climatiques et des pressions anthropiques sur les modifications de la couverture végétale dans le bassin versant du Nzi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, **20**, 124-146, <http://www.revist.ci>, 15 Octobre 2015.
30. Kumar A. & Pandey A.C., 2013, Evaluating impact of coal mining activity on land use/land cover using temporal satellite images in south Karanpura coalfields and environs, Jharkhand State, India, *Int. J. Adv. Remote Sens. GIS*, **2**, 183-197.
31. Kumar U., Mukhodhyay C. & Ramachandra T.V., 2009, Spatial data mining and modeling for visualisation of rapid urbanization, *SCIT J.*, **9**, 1-9.
32. Landis J.R. & Koch G.G., 1977, The measurement of observer agreement for categorical data, *Biometrics*, **33**, 159-174.
33. Leboeuf A., Samson M.P. & Paquet A., 2015, *Guide d'interprétation des mosaïques d'images Landsat. Direction des inventaires forestiers*, [www.mffp.gouv.qc.ca/fr/forets/inventaire](http://www.mffp.gouv.qc.ca/fr/forets/inventaire), 12 Octobre 2015.
34. Lecerf R., 2008, *Suivi des changements d'occupation et utilisation des sols d'origine anthropique et climatique par télédétection moyenne haute résolution (application à la Bretagne)*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 2, 326p.
35. Malaisse F., 1973, Contribution à l'étude de l'écosystème forêt Claire (Miombo). Note 8, le projet Miombo, *Ann. Univ. Abidjan Ecol.*, **6**, 227-250.
36. Malaisse F., 1997, *Se nourrir en forêt claire africaine, Approche écologique et nutritionnelle*. Gembloux, Belgique: les Presses Agronomiques de Gembloux, 384p.
37. 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.
38. Mayaux P., Gond V., Massart M., Pain-Orcet M. & Achard F., 2003, Évolution du couvert forestier du bassin du Congo mesurée par télédétection spatiale, *Bois For. Trop.*, **277**, 45-52.
39. McGarigal K. & Cushman S. A., 2002, Comparative evaluation of experimental approaches to the study of habitat fragmentation effects, *Ecol. Appl.*, **12**, 335-345.
40. Munyemba K., 2010, *Quantification et modélisation de la dynamique paysagère dans la région de Lubumbashi: évaluation de l'impact écologique des dépositions issu de la pyrométallurgie*, Thèse de doctorat. Université de Lubumbashi (RD Congo), 280p.
41. 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.
42. 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, *For. Policy Econ.*, **25**, 19-30.
43. Oswald J., Lefebvre A., Arnault de Sartre X., Thalès M. & Gond V., 2010, Analyse des directions de changement des états de surface végétaux pour renseigner la dynamique du front pionnier de Maçaranduba (para, Brésil) entre 1997 et 2006, *Télédétection*, **9**, 97-111.
44. Pontius R.G.Jr., 2000, Quantification error versus location in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **66**, 1011-1016.
45. Potapov P.V., Svetlana I., Matthews C.H., Bernard A., Mark B., Alice A., Landing M., Christopher O.J., 2012, Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000-2010, with Landsat ETM+ data, *Remote Sens. Environ.*, **122**, 106-116.
46. Sarr M.A., 2009, Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat, *Cybergeo: Eur. J. Geogr. Environ. Nat., Paysage*, <http://cybergeo.revues.org/22707>, 12 Octobre 2015.
47. Schmitz A., Oumarou F.A. & Rouchiche S., 1996, *Contrôle et utilisation du feu en zones arides et subhumides africaines*. Rome, Cahiers FAO, Conservation 29, 211p.
48. Vigné P., Richard M., Mary J-F, Cahière S., Joly O. & Gourgand B., 2011, Traitement géomatique par carreaux pour l'observation des territoires. CERTU, Normandie-centre, CETE.
49. Wahidi F.L., Bellefontaine R., Quentin P. & Defourny P., 2014, Dynamique de changement de l'arganeraie entre sur-usage et mutation sociale: une opportunité d'équilibre socio-écologique, *J. Agric. Environ. Int. Dev.*, **2**, 108-114.

S. Cabala Kaleba, Congolais, Doctorant, Université de Lubumbashi, Faculté des Sciences Agronomique, Unité de Recherche Écologie, Restauration Écologique et Paysage, Lubumbashi, République Démocratique du Congo.

Y. Useni Sikuzani, Congolais, Doctorant, Université de Lubumbashi, Faculté des Sciences Agronomique, Unité de Recherche Écologie, Restauration Écologique et Paysage, Centre de Compétences en Planification et Gestion urbaine, Lubumbashi, République Démocratique du Congo.

K.R. Sambieni, Béninois, Doctorant, Ecole Régionale Post-Universitaire d'Aménagement et de Gestion Intégrés des Forêts et Territoires Tropicaux, Campus UNIKIN, Kinshasa, République Démocratique du Congo. Université de Liège, Faculté d'Architecture, Laboratoire Ville-Territoire-Paysage, Liège, Belgique.

J. Bogaert, Belge, Professeur ordinaire, Ecole Régionale Post-Universitaire d'Aménagement et de Gestion Intégrés des Forêts et Territoires Tropicaux, Campus UNIKIN, Kinshasa, République Démocratique du Congo. Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Unité de Biodiversité et Paysage, Gembloux, Belgique.

F. Munyemba Kankumbi, Congolais, Professeur, Université de Lubumbashi, Faculté des Sciences Agronomiques, Unité de Recherche Écologie, Restauration Écologique et Paysage, Lubumbashi, République Démocratique du Congo & Centre de Compétences en Planification et Gestion urbaine, Lubumbashi, République Démocratique du Congo.