

13

Activités anthropiques et dynamique spatiotemporelle de la forêt claire dans la Plaine de Lubumbashi

Sylvestre CABALA KALEBA, Yannick USENI SIKUZANI, François MUNYEMBA KANKUMBI,
Jan BOGAERT*

Cet article se propose de caractériser la dynamique spatio-temporelle de la forêt claire dans la Plaine de Lubumbashi de 2001 à 2011. La zone d'étude couvre une partie de la Plaine de Lubumbashi, dans le Haut-Katanga (République Démocratique du Congo). Trois images Landsat ETM+ datant du début des mois de mai 2001, 2005 et 2011 ont été utilisées. Pour chaque image, une classification supervisée avec l'algorithme du maximum de vraisemblance a été appliquée, suivie de la validation de la classification sur base de l'indice Kappa. Trois classes pertinentes ont été retenues, à savoir la classe «forêt claire», le complexe «habitats-sol nu» et la classe «autres». Des indices de structure spatiale et des matrices de transition ont été calculés. L'analyse des changements a fait ressortir une perte de surface de forêt claire passant de 53% de la superficie totale de la zone d'étude en 2001 à 45% en 2005 et à 42% en 2011. La dynamique de conversion dominante est donc la déforestation. L'urbanisation et la savanisation ont été aussi observées. Deux processus de transformation ont caractérisé la forêt claire durant cette décennie : la suppression et la dissection.

Anthropogenic activities and spatiotemporal pattern of miombo woodland in the Lubumbashi plain

This article aims to characterize the spatiotemporal pattern of *miombo* woodlands in the Lubumbashi region from 2001 to 2011. The study area covered a part of the Lubumbashi plain, in the Upper Katanga Province (Democratic Republic of the Congo). Three Landsat ETM+ images from May 2001, 2005 and 2011 were used. For each image, a supervised classification with the maximum likelihood algorithm was applied, followed by a validation of the classification based on the Kappa index. Three relevant classes were selected, namely "woodland", complexes of "bare soil-built-up" and "other". Landscape metrics and transition matrices were calculated. Change analysis showed that woodland area decreased from 53% in 2001 to 45% in 2005 and 42% in 2011. Dominant landscape dynamics were deforestation, but urbanization and conversion to savannah were also observed. Two spatial transformation processes characterized the *miombo* woodland during this decade: attrition and dissection.

Bogaert J., Colinet G. & Mahy G., 2018. *Anthropisation des paysages katangais*. Gembloux, Belgique : Presses Universitaires de Liège – Agronomie-Gembloux.

1. Introduction

Les problèmes liés à la gestion de l'environnement et des ressources naturelles constituent des défis majeurs qui se posent à l'Homme aujourd'hui. La dégradation des écosystèmes forestiers en constitue un des éléments (FAO, 2007). En effet, les forêts tropicales ont fortement diminué sous diverses pressions anthropiques pour répondre aux besoins socioéconomiques des populations (FAO, 2010). La déforestation a ainsi entraîné la disparition ou la raréfaction d'un nombre important d'espèces végétales et est également une menace pour les animaux qui en dépendent (Koné et al., 2007; Ilunga Wa Ilunga, 2014). Ces phénomènes sont inquiétants pour la gestion de la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes (Bogaert et al., 2011a). En République Démocratique du Congo, les activités dominantes de déforestation qui contribuent à la modification de la structure spatiale du paysage sont : l'agriculture itinérante, la coupe du bois de feu, les activités minières ou l'exploitation du bois d'œuvre (Megevand, 2013; Li et al., 2015). L'ampleur des impacts causés par ces moteurs de déforestation varie d'une région à une autre (Potapov et al., 2012). Au Katanga particulièrement, Defourny et al. (2011) placent en première position l'agriculture itinérante et la coupe du bois de feu, puis les activités minières. Devant une problématique aussi complexe, un suivi du changement du paysage forestier s'impose afin d'estimer l'impact des activités anthropiques sur les écosystèmes naturels (Bogaert et al., 2011b). L'importance de l'analyse de la dynamique forestière s'inscrit aussi dans la stratégie d'atténuation des effets du changement climatique global dans l'optique de la séquestration du carbone (Kabulu, 2011; Rautner et al., 2013). La télédétection et l'utilisation des données géospatialisées pour la cartographie de l'occupation du sol jouent un rôle incontournable dans la caractérisation et l'aménagement des écosystèmes (Mama, 2013). Dans la Plaine de Lubumbashi, relativement peu d'études adoptant les approches de la télédétection et des SIG pour l'analyse de la dynamique des écosystèmes ont déjà été réalisées (Kabulu et al., 2008; Kabulu, 2011; Munyemba Kankumbi & Bogaert, 2014).

La forêt claire joue un rôle capital tant pour la population humaine que pour la biodiversité animale et végétale (Malaisse, 1997). D'où l'intérêt d'analyser la dynamique spatiale de cet écosystème. La thématique de la dynamique de la forêt claire a déjà fait l'objet d'études orientées vers l'évaluation de l'impact des activités anthropiques et ses conséquences sur le climat. Il a été observé une progression des forêts claires (Inoussa et al., 2011) dans les parcs du Bénin, mais le plus souvent c'est la fragmentation suivie d'une suppression qui sont observées (Barima et al., 2009; Munyemba Kankumbi & Bogaert, 2014).

Dans cette étude, les pertes de surfaces de forêt claire dans la Plaine de Lubumbashi seraient dues aux diverses activités anthropiques qui y sont exercées. L'objectif principal est de caractériser la dynamique de la forêt claire. Par la cartographie, il s'agira de quantifier la dynamique de la structure spatiale du paysage en mettant l'accent sur la forêt claire à travers des indices de structure spatiale, la matrice de transition et les processus de transformation spatiale.

2. Matériel et méthodes

2.1. Zone d'étude

La zone d'étude est située dans la Plaine de Lubumbashi (Schmitz, 1971), entre 10°-12°S et 25°-28°E. Sur le plan administratif, elle se trouve dans la partie sud-est de la République Démocratique du Congo, dans la province du Haut-Katanga, territoires de Kipushi et de Kambove. Cette plaine appartient au type climatique Cw6 selon la classification de Köppen (Sys & Schmitz, 1959). Elle connaît une saison sèche dont la durée moyenne est de 185 jours, débutant généralement vers la deuxième quinzaine du mois d'avril et se terminant vers la fin du mois d'octobre. Le régime pluviométrique est caractérisé par une saison des pluies (novembre à mars), une saison sèche (mai à septembre) et deux mois de transition (avril et octobre). La moyenne des précipitations est de 1 231 mm par an (Kalamba et al., 1998).

La formation végétale dominante est la forêt claire. Du point de vue phytogéographique, elle couvre une région de savanes arbustives aux clairières parsemées de termitières appartenant au centre régional d'endémisme zambézien (Sys & Schmitz, 1959; Malaisse, 1973). La végétation ligneuse naturelle appartient généralement aux forêts semi-caducifoliées à distribution zambézienne. Ces forêts constituent les noyaux de forêt dense, au milieu des forêts claires et savanes boisées du sud de l'ancienne province du Katanga, appelées *muhulu*, et comportent une proportion très élevée d'espèces arborescentes décidues leur conférant, avec leur hauteur relativement basse (15 à 25 m), un aspect de forêt dense sèche (Schmitz, 1971; Malaisse, 1973). Selon Malaisse (1997), il existe trois types de forêts claires au Katanga: la forêt claire du type *miombo*, la forêt claire à dominance de *Marquesia* et les hautes termitières de forêt claire.

2.2. Données cartographiques

La matérialisation de cette étude a nécessité l'utilisation de logiciels de cartographie numérique (ArcView 3.3, SAGA GIS 1.3), de la carte de la Plaine de Lubumbashi (Schmitz, 1971), de l'imagerie satellitaire et d'un système de positionnement global (GPS Garmin 60, 6 m de précision). Trois images Landsat ETM+, de même échelle (résolution et étendue), datant du 2 Mai 2001, 5 Mai 2005 et du 15 Mai 2011 ont été téléchargées et géoréférencées.

2.3. Traitement des données

Les données de télédétection ont été reprojctées à la zone UTM 35S grâce au module «reprojecting» du logiciel SAGA GIS 1.3. Une même zone d'étude a été circonscrite pour les trois images grâce au module «cutting interactive» et «clip with polygone». La récolte des données de terrain avec un GPS a été nécessaire, ainsi que les renseignements supplémentaires dans le choix des zones d'entraînement.

Plusieurs compositions colorées ont été effectuées. La combinaison des bandes 4-3-2 respectivement dans le rouge, le vert et le bleu a été utilisée pour discriminer le couvert végétal, car elle donnait après observation visuelle le meilleur résultat. Toutes les images

ont été soumises à une classification non supervisée sur base de laquelle des sites d'entraînement ont été choisis. Ces derniers ont conduit à une classification supervisée en utilisant l'algorithme de maximum de vraisemblance (Inoussa et al., 2011).

Les travaux de terrain sont indispensables pour appuyer et corriger l'interprétation des images par le logiciel (Karimoune et al., 1993). Cent trente coordonnées géographiques ont été prélevées dans des sites répartis suivant un plan de sondage stratifié aléatoire. Ensuite, une matrice de confusion a permis de valider la qualité de la classification de l'occupation du sol (Godard, 2005). Pour y arriver, le calcul du coefficient Kappa a été effectué, en plus du calcul de la précision globale de la classification. Le coefficient Kappa est un estimateur de qualité qui tient compte des erreurs en lignes et en colonnes et varie de 0 à 1, tandis que la précision globale représente la moyenne des pourcentages des pixels correctement classés à partir de la matrice de confusion. Les valeurs acceptables du coefficient Kappa sont celles qui dépassent 60 % (Landis & Koch, 1977). Le cas d'une valeur inférieure à 61 % exige une reprise du choix des zones d'entraînement (Mama, 2013).

Pour caractériser la dynamique spatiotemporelle de la classe «forêt claire», les indices considérés ont été le nombre de taches et l'aire totale de la classe. Le nombre de taches renseigne sur la fragmentation d'une classe entre deux temps. En effet, l'augmentation du nombre de taches d'une classe peut être due à la fragmentation de cette classe (Davidson, 1998; Bogaert et al., 2008).

Pour décrire les dynamiques de conversion d'occupation du sol intervenues entre 2001, 2005 et 2011, la méthode de la matrice de transition a été utilisée (Bogaert et al., 2011b). Elle correspond à une matrice carrée décrivant de manière condensée les changements d'état des éléments d'un système pendant une période donnée (Schlaepfer, 2002). Ces valeurs proviennent de la superposition des deux cartes grâce au module «change detection» de SAGA GIS 3.1.

L'analyse de la dynamique de la structure spatiale a été complétée à l'aide de la typologie proposée par Bogaert et al. (2004). La prise de décision se base sur les valeurs du nombre de taches et de l'aire de la classe (n et a). Dans le cas où on a une augmentation du nombre de taches (n) et une diminution de l'aire totale (a), la conclusion 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 (Barima et al., 2009) pour distinguer le processus de fragmentation de celui de dissection. Ainsi, lorsque $t_{\text{observé}} < 0,5$, la fragmentation est mise en évidence tandis que lorsque $t_{\text{observé}} > 0,5$, c'est la dissection qui est révélée. Pour représenter ces évolutions graphiquement, une conversion des indices en valeur relative (rapport de la valeur de l'indice à une période donnée par la valeur maximale du même indice) a été effectuée.

3. Résultats

3.1. Classification supervisée

Une zone d'étude évaluée à 8 877 km² a été isolée dans la Plaine de Lubumbashi à partir de la carte de Schmitz (1971) sur trois images Landsat.

Après composition colorée et classification non supervisée des images, des zones d'entraînement ont été choisies pour la classification supervisée en utilisant l'algorithme du maximum de vraisemblance. Ces classifications ont été validées par les calculs du coefficient Kappa après une vérification des données de terrain (Tableau 1).

Tableau 1. Valeurs de la précision globale et du coefficient Kappa issues de la classification supervisée des images Landsat ETM+ de 2001, 2005 et 2011 à partir de 130 points prélevés sur le terrain. Zone d'étude : Plaine de Lubumbashi.

| Images Landsat ETM+ | Précision globale (%) | Coefficient Kappa (%) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| 2001 | 82 | 80 |
| 2005 | 82 | 81 |
| 2011 | 81 | 80 |

Les résultats de l'analyse de la qualité de la classification sont généralement similaires pour les années considérées.

Trois classes d'occupation de sol ont été par conséquent retenues (Figure 1) :

- «habitats-sol nu» : ce complexe représente le bâti, les routes, carrières et mines à ciel ouvert ; c'est ce que Forman (1995) appelle les espaces fortement anthropisés ou civilisés ;
- la «forêt claire» : elle constitue la matrice paysagère caractéristique de la Plaine de Lubumbashi ; sous l'effet de la déforestation, elle devient disséquée, fragmentée et donne lieu à une savane boisée, arbustive puis à une savane herbeuse ; lorsque la dégradation continue, le sol nu finit par apparaître (Munyemba Kankumbi, 2010 ; Kabulu, 2011) ;

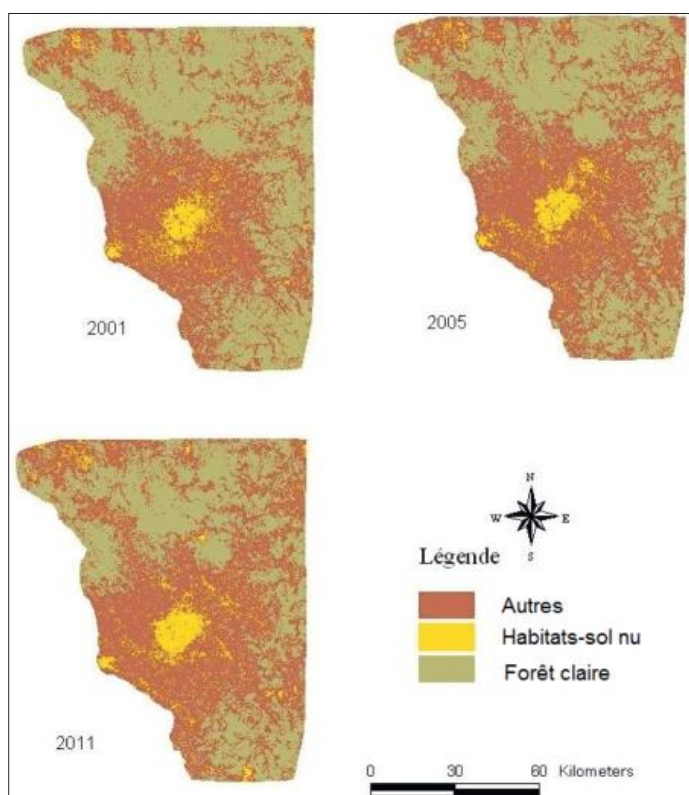


Figure 1. Cartes d'occupation du sol de la zone d'étude (Plaine de Lubumbashi) obtenues après classification supervisée d'images Landsat ETM+ de 2001, 2005 et 2011.

- «autres» : cette classe regroupe les savanes boisées et/ou arbustives, les cultures, les marécages, les surfaces d'eau (rivières, lacs, étangs); elle correspond partiellement à une zone périurbaine ou encore à une zone de transition caractérisée par des éléments naturels (ruraux) et anthropiques (urbains).

La «forêt claire» est bien distinguée des autres classes et est en général éloignée de la classe «habitats-sol nu» par une auréole constituant la classe «autres», laquelle forme une zone périurbaine.

3.2. Analyse des changements

3.2.1. Dynamiques de conversions

Changements entre 2001 et 2005

Le tableau 2 donne les pourcentages des échanges qui se sont opérés entre les différentes classes d'occupation du sol de 2001 et 2005 dans la zone d'étude. Il ressort de ce tableau que la proportion de la classe «forêt claire» est passée de 52,6% en 2001 à 44,8% en 2005. La proportion du complexe «habitats-sol nu» n'a pas connu de changement important entre ces deux dates, soit 5,2%; tandis que la classe «autres» est passée de 42,1% en 2001 à 49,8% en 2005. La classe «forêt claire» constitue la principale pourvoyeuse en espace aux autres classes. En outre, environ 10,1% du paysage occupé par la forêt claire en 2001 s'est dégradé en classe «autres» alors que le complexe «habitats-sol nu» n'a bénéficié que de 0,1% en 2005. Dans cette période, le taux de déforestation annuelle a été estimé à 1,95%. En outre, il a été observé une augmentation des sites abandonnés constituant la zone périurbaine (2,1%). Enfin, 2,4% de la classe «autres» ont évolué vers la forêt claire contre 2,0% de la classe «autres» qui ont évolué vers le complexe «habitats-sol nu».

Tableau 2. Matrice de transition illustrant, en pourcentage de la zone d'étude, la transformation de leur aire entre 2001 (rangées) et 2005 (colonnes) dans la Plaine de Lubumbashi (1% correspond à 88,77 km²).

| 2001 — 2005 | Forêt claire | Habitats-sol nu | Autres | Totaux |
|-----------------|--------------|-----------------|--------|--------|
| Forêt claire | 42,4 | 0,1 | 10,1 | 52,6 |
| Habitats-sol nu | 0,0 | 3,1 | 2,1 | 5,2 |
| Autres | 2,4 | 2,0 | 37,6 | 42,1 |
| Totaux | 44,8 | 5,2 | 49,8 | 100 |

Changements entre 2005 et 2011

Entre 2005 et 2011, la proportion de la classe forêt claire a diminué, passant de 44,9% en 2005 à 41,7% en 2011 (Tableau 3). Quant au complexe «habitats-sol nu», sa proportion a augmenté de 5,2% en 2005 à 6,3% en 2011. De même, la classe «autres» a connu une augmentation allant de 49,8% en 2005 à 52,0% en 2011. Et, comme entre 2001 et 2005, la forêt claire a gardé sa place de principale pourvoyeuse d'espaces aux autres classes, avec 0,2% qui ont été occupés par le complexe «habitats-sol nu» et 6,8% qui se sont dégradés en classe «autres», et bien que cette dernière se

soit convertie en partie en forêt claire (3,7%). Entre 2005 et 2011, le taux de déforestation annuelle dans la Plaine de Lubumbashi a été de 0,5%; ce qui implique une baisse par rapport à la période de 2001 à 2005.

Tableau 3. Matrice de transition illustrant, en pourcentage de la zone d'étude, la transformation de leur aire entre 2005 (rangées) et 2011 (colonnes) dans la Plaine de Lubumbashi (1% correspond à 88,77 km²).

| 2005 — 2011 | Forêt claire | Habitats-sol nu | Autres | Totaux |
|-----------------|--------------|-----------------|--------|--------|
| Forêt claire | 37,9 | 0,2 | 6,8 | 44,9 |
| Habitats-sol nu | 0,0 | 3,5 | 1,7 | 5,2 |
| Autres | 3,7 | 2,6 | 43,5 | 49,8 |
| Totaux | 41,7 | 6,3 | 52,0 | 100 |

3.2.2. Analyse de la dynamique structurale

L'évolution du nombre de taches et de l'aire des classes d'occupation du sol pour les trois années (2001, 2005 et 2011) est représentée sur les figures 2, 3 et 4 à partir des valeurs relatives. Il ressort de ces figures que les valeurs maximales de l'aire et du nombre de taches de la forêt claire n'ont été enregistrées qu'en 2001 et ont diminué sur l'ensemble des trois périodes d'étude, à l'exception d'une légère augmentation du nombre de taches entre 2005 et 2011. Par contre, la valeur relative des indices augmente de 2001 à 2011 pour le complexe «habitats-sol nu», en dépit d'une diminution du nombre de taches entre 2001 et 2005. Il est à remarquer que l'aire pour la classe complexe «habitats-sol nu» a présenté une légère différence pouvant nous conduire à une considération alternative de "non changement". Enfin, la classe «autres» est celle qui enregistre une augmentation des valeurs relatives du nombre de taches et de l'aire totale entre 2001 et 2011. Les valeurs de ces indices sont présentées dans le tableau 4.

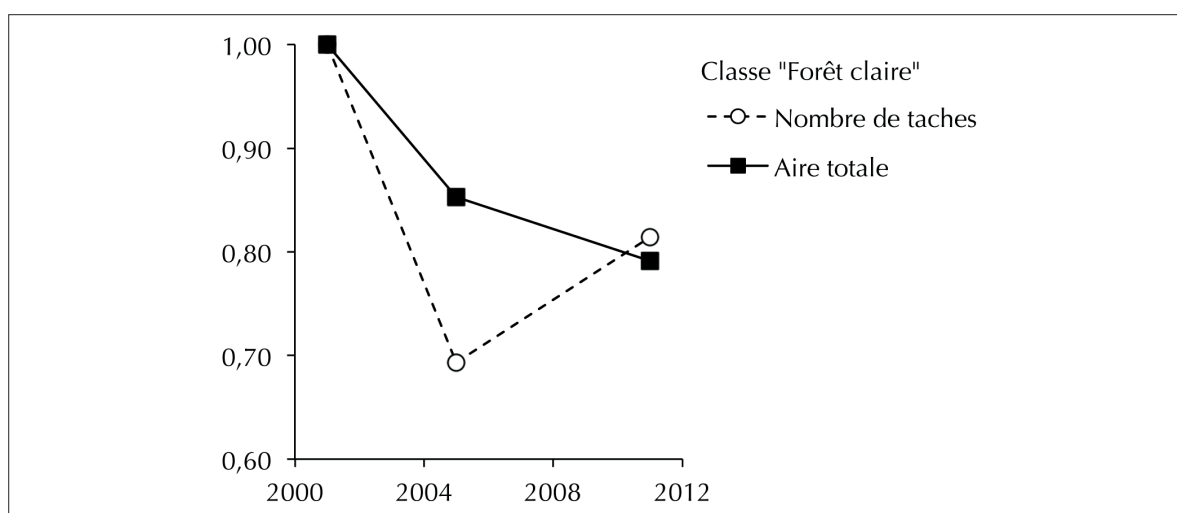


Figure 2. Évolution du nombre de taches et de l'aire de la classe «forêt claire» de 2001 à 2011. Zone d'étude : Plaine de Lubumbashi. Analyse faite sur base d'images Landsat ETM+.

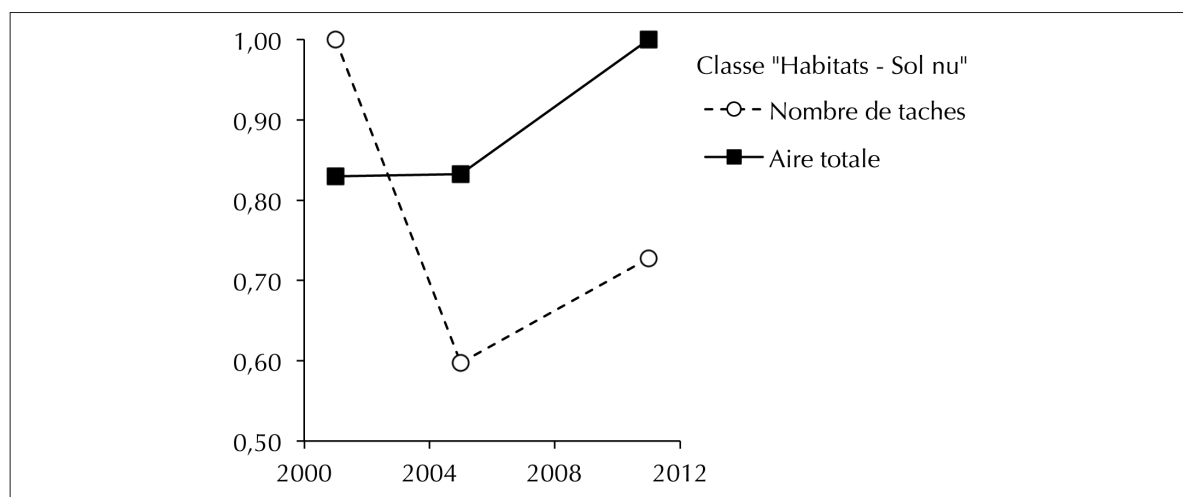


Figure 3. Évolution du nombre de taches et de l'aire du complexe «habitats-sol nu» de 2001 à 2011. Zone d'étude : Plaine de Lubumbashi.

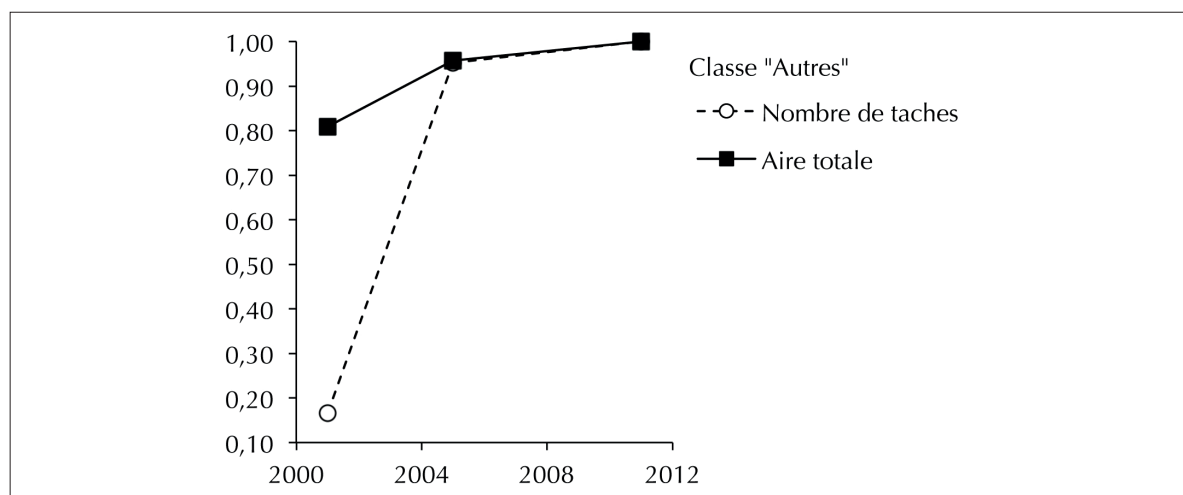


Figure 4. Évolution du nombre de taches et de l'aire de la classe «autres» de 2001 à 2011. Zone d'étude : Plaine de Lubumbashi

Tableau 4. Tableau récapitulatif des indices de structure spatiale : nombre de taches (n), surface (a) de différentes classes d'occupation de sol en 2001, 2005 et 2011. Zone d'étude : Plaine de Lubumbashi.

| | Forêt claire | Habitats-sol nu | Autres |
|-------------------------------|--------------|-----------------|--------|
| n_{2001} | 39854 | 30628 | 5687 |
| a_{2001} (km ²) | 4675,3 | 463,4 | 3738,6 |
| n_{2005} | 27628 | 18286 | 32739 |
| a_{2005} (km ²) | 3987,8 | 465,0 | 4424,4 |
| n_{2011} | 32437 | 22289 | 34385 |
| a_{2011} (km ²) | 3698,5 | 558,6 | 4620,2 |

Les tendances des valeurs relatives du nombre de taches et de l'aire des classes sont confirmées par l'analyse des processus de transformation spatiale illustrés dans le tableau 5.

Entre 2001 et 2005, il s'agit de la « création » pour la classe « autres » pendant que la classe « forêt claire » a connu le processus de « suppression ». En effet, la forêt claire a connu une diminution en nombre de taches et en surface (Tableau 4). Quant au complexe « habitats-sol nu », comme l'aire est restée relativement la même malgré la diminution en nombre de taches, le processus de transformation observé est l'agrégation. En revanche, entre 2005 et 2011, le nombre de taches pour l'ensemble des classes a augmenté ainsi que l'aire, à l'exception de la classe « forêt claire » qui a connu une réduction en surface. Le processus de transformation observé (Tableau 5) pour les classes « autres » et « habitats-sol nu » pendant cette période est la « création ». La forêt claire a connu pendant cette période une augmentation en nombre de taches suivie d'une perte en surface. Pour détecter le processus qui a prévalu, le rapport a_{2011}/a_{2005} (soit $3698,5/3987,8 = 0,9$) a permis de conclure que le processus de transformation spatiale observé est la dissection (Tableau 5).

Tableau 5. Processus de transformation spatiale observé après application de la typologie de l'arbre de décision de Bogaert et al. (2004) pour chacune des classes d'occupation du sol entre 2001-2005 et 2005-2011. Zone d'étude : Plaine de Lubumbashi.

| Occupation du sol | 2001-2005 | 2005-2011 |
|-------------------|-------------|------------|
| Forêt claire | Suppression | Dissection |
| Habitats-sol nu | Agrégation | Création |
| Autres | Création | Création |

4. Discussion

Le début du mois de mai dans la Plaine de Lubumbashi se démarque par une couverture vert pâle de la végétation; le ciel est moins couvert et les objets au sol se distinguent nettement. De ce fait, les images prises dans cette période offrent une bonne visibilité des patrons paysagers (Kalamba et al., 1998; Mas, 2000; Conghe et al., 2001).

L'avantage reconnu des images Landsat, en plus de leur disponibilité (Mas, 2000; Bamba, 2010; Mama, 2013) et malgré leur résolution grossière, est qu'elles sont acquises gratuitement et en même temps préconisées pour des études à grande échelle. Elles permettent d'avoir une vision globale de tout le paysage, et offrent la possibilité de se combiner au modèle numérique de terrain (Barima et al., 2011). Comme Mui-How et al. (2008) et Tomislav et al. (2011), le logiciel SAGA GIS 1.3 a été utilisé dans cette étude pour traiter les images Landsat jusqu'à la production d'une classification supervisée acceptable en utilisant l'algorithme du maximum de vraisemblance (Eastman, 1997; Mama, 2013). Dans cette étude, les valeurs du coefficient Kappa variant entre 80 et 81 % prouvent que les classifications produites sont fiables en se référant à l'échelle de Landis & Koch (1977). Les résultats de l'analyse de fiabilité montrent qu'il n'y a globalement pas eu de forte confusion entre les classes. Cela s'explique par l'interaction entre la qualité des images et le choix des classes

thématiques. Un compromis entre qualité des images, complexité du paysage et les résultats statistiques doit être trouvé. Cependant les données de terrain récoltées et la connaissance de la zone d'étude ont facilité les analyses et les interprétations visuelles des images (Inoussa et al., 2011).

Un grand nombre d'indices sont proposés en écologie du paysage. Le choix des indices plus pertinents est recommandé à cause des redondances des mesures qu'ils suscitent (Bogaert & Mahamane, 2005). En effet, deux indices ont été utilisés pour quantifier et caractériser la dynamique de la forêt claire : le nombre de taches et l'aire des classes.

La forêt claire constitue la matrice paysagère d'occupation de sol dans la Plaine de Lubumbashi. C'est la classe pourvoyeuse d'espace aux autres classes d'occupation du sol. La classe «autres», constituée d'autres types de formations végétales, peut être en mesure de reconstituer la forêt claire (Ilunga Wa Ilunga, 2014). L'agriculture itinérante sur brûlis exercée dans les environs des centres urbains serait responsable de 70% de la déforestation en Afrique (Tshibangu, 2001; FAO, 2007; FAO, 2010). Cependant les études de Malaisse (1997) et de Kabulu (2011) tendent à montrer une importance secondaire de l'impact de l'agriculture par rapport à celui de la coupe du bois de feu dans la Plaine de Lubumbashi. L'amélioration des techniques culturales fait que les superficies emblavées sont de plus en plus exploitées plusieurs années (Kasongo, 2009), et ceci réduirait les pertes annuelles de surface de forêt (De Wasseige et al., 2012). Les zones déboisées sont abandonnées, se savanisent (Ilunga Wa Ilunga, 2014) ou sont converties en complexe habitats-sol nu relativement à leur distance par rapport à une agglomération. Rautner et al. (2013) affirment que dans les zones périurbaines, la collecte de bois de chauffage et la production du charbon de bois sont parmi les facteurs déterminants de la dégradation et de la disparition des forêts. Ces facteurs sont amplifiés par une pression démographique de plus en plus croissante. Malgré les efforts consentis pour protéger cette forêt claire, l'insuffisance en fourniture d'énergie électrique y est substituée par du bois de feu et du bois de chauffe (Malaisse, 1997; Tshibangu, 2001).

Les résultats de cette étude rejoignent donc ceux de Munyemba Kankumbi (2010) obtenus dans la région de Lubumbashi et de Mama (2013) au Bénin où ils ont observé une régression de la forêt (claire) au profit du complexe «habitats-sol nu» et de la classe «autres» constituant la zone périurbaine.

Le calcul des indices de structure spatiale a permis de mettre en évidence la dynamique de la structure spatiale du paysage. Il a été révélé que le taux annuel de déforestation est passé de 1,9% entre 2001 et 2005 à 0,5% entre 2005 et 2011.

La suppression des surfaces de forêt claire démarque bien qu'il n'y a aucune application de mesure de préservation dans la gestion de cet habitat alors que les classes anthropisées connaissent une progression. Dans cette période d'étude, la République Démocratique du Congo a connu une instabilité politique et économique (guerres, rébellions, inflation, réfugiés). Pour subvenir à leurs besoins en espaces et ressources, les déplacés de guerre n'avaient que la forêt claire comme ressource principale. En effet, une étude récente conduite au Burundi a mis en évidence l'impact de l'instabilité sociopolitique sur la dynamique et l'anthropisation des écosystèmes forestiers

(Havyarimana, 2015). Cette période a été caractérisée en outre par une anarchie dans l'octroi des concessions minières aux exploitants miniers et artisanaux.

Par ailleurs, l'analyse des changements entre 2005 et 2011 a fait ressortir un processus de dissection de la forêt claire. Elle a connu une augmentation en nombre de taches et une réduction de surface. Cette période s'est démarquée par l'ouverture et l'aménagement des routes existantes, l'installation de beaucoup d'entreprises d'exploitation minière et/ou artisanale dans les forêts katangaises (Kabulu, 2011 ; Megevand, 2013). L'impact des activités minières sur la déforestation a été également quantifié et démontré en Inde (Kumar & Pandey, 2013). Dans notre étude, les classes naturelles (forêt claire) ont subi la suppression et la dissection contre l'agrégation et la création des classes anthropiques («autres» et complexe «habitats-sol nu»), corroborant ainsi les observations de Bogaert et al. (2011b).

Sous l'influence des actions anthropiques, les transformations du paysage naturel commencent souvent par une perforation ou dissection (Bogaert et al., 2011a). Pour Bogaert et al. (2004) ceci augmente l'accessibilité aux formations naturelles qui va déclencher la dynamique du paysage sans laquelle l'impact des effets anthropiques sur le paysage serait limité (August et al., 2002). Bogaert et al. (2008) précisent que les villes constituent les noyaux de transformation à partir desquels les activités anthropiques se diffusent suivant un système linéaire à proximité des routes. Notre zone d'étude est caractérisée par deux modèles de séquence paysagère : le modèle nucléaire prôné par Forman (1995) qui a pour source les agglomérations, et le modèle corridor favorisé par la proximité des routes. Plus une agglomération est importante, plus grande est son influence sur les ressources naturelles du fait de l'extension de sa zone périurbaine (Vranken et al., 2013) représentée ici par la classe «autres». En outre, l'exploitation minière par les entreprises et/ou les artisans ouvre de nouvelles pistes qui permettent la pénétration dans la forêt (Munyemba Kankumbi, 2010) et les villages s'installent le long des routes et s'y maintiennent (Kabulu, 2011).

5. Conclusions

Dans cette étude, la dynamique de l'occupation du sol entre 2001 et 2011 dans la Plaine de Lubumbashi a révélé des modifications profondes du paysage. Il ressort que la forêt claire reste la principale pourvoyeuse d'espace aux autres classes d'occupation du sol. En effet, quatre processus de transformation spatiale ont caractérisé cette décennie pour les trois classes : la création pour les classes «autres» et le complexe «habitats-sol nu», l'agrégation pour uniquement ce complexe, tandis que la suppression et la dissection ont été observées pour la classe «forêt claire». Ces mutations seraient principalement dues aux activités anthropiques : la construction de bâtis, les activités minières, la coupe de bois de feu et de chauffe, l'agriculture itinérante et l'exploitation du bois. Ces perturbations des écosystèmes ont des conséquences sur la conservation de la biodiversité. Les investigations devront être poursuivies avec des images postérieures à 2011 et, dans la mesure du possible, de haute résolution pour parfaire les observations sur les classes minoritaires.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ONG Biodiversité Au Katanga (BAK asbl) et l'ARES-CCD pour leur appui financier. Le professeur Philippe Lejeune (ULiège, GxABT) est également remercié pour son assistance technique.

Bibliographie

- August P., Iverson L. & Nugranad J., 2002. Human conversion of terrestrial habitats. *In*: Gutzwiller K.J. (Ed.). *Applying landscape ecology in biological conservation*. New York, NY, USA: Springer Verlag.
- Bamba I., 2010. *Anthropisation et dynamique spatio-temporelle des paysages forestiers en République Démocratique du Congo*. Thèse de doctorat : Université libre de Bruxelles, Bruxelles.
- Barima Y.S.S. et al., 2009. Dynamique paysagère en milieu de transition forêt-savane ivoirienne. *Bois For. Trop.*, **299**(1), 15-25.
- Barima Y.S.S. et al., 2011. Deforestation in Central and West Africa: landscape dynamics, anthropogenic effects and ecological consequences. *In*: J.A. Daniels (Ed.). *Advances in environmental research – Volume 7*. Hauppauge, NY, USA: Nova Science Publishers.
- Bogaert J., Ceulemans R. & Salvador-Van Eysenrode D., 2004. Decision tree algorithm for detection of spatial processes in landscape transformation. *Environ. Manage.*, **33**(1), 62-73.
- Bogaert J. & Mahamane A., 2005. Écologie du paysage : cibler la configuration et l'échelle spatiale. *Ann. Sci. Agron. Bénin*, **7**(1), 1-15.
- Bogaert J. et al., 2008. Fragmentation of forest landscapes in Central Africa: Causes, consequences and management. *In*: Laforteza R., Chen J., Sanesi G. & Crow Th.R. (Eds). *Patterns and processes in forest landscapes: multiple use and sustainable management*. New York, NY, USA: Springer, Verlag.
- Bogaert J. et al., 2011a. 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*. Beijing: Higher Education Press; Berlin: Springer.
- Bogaert J. et al., 2011b. A methodological framework to quantify anthropogenic effects on landscape pattern. *In*: Hong S-K., Wu J. & Nakagoshi N. (Eds). *Landscape ecology in Asian cultures*. New York, NY, USA: Springer Verlag.
- Davidson C., 1998. Issues in measuring landscape fragmentation. *Wildl. Soc. Bull.*, **26**, 32-37.
- 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. Kinshasa : FAO.
- De Wasseige C. et al., 2012. *Les forêts du Bassin du Congo : États des forêts 2010*. Luxembourg : OSFAC, Office de publication de l'union européenne.
- FAO, 2007. *Situation des forêts en 2007*. Rome : FAO, (<http://www.fao.org/docrep/009/a0773f/a0773f00.htm> 5 octobre 2014).
- FAO, 2010. *Évaluation des ressources forestières mondiales*. Département des forêts. Rome : FAO.
- Forman R.T.T., 1995. *Land mosaics: the ecology of landscapes and regions*. Cambridge, UK: University Press.
- Frauman E., 2004. L'agriculture périurbaine. *In* : Petit P. (Ed.). *Byakula. Approche socio-anthropologique de l'alimentation à Lubumbashi*. Lubumbashi : Université de Lubumbashi, Coopération universitaire au développement.

- Godard V., 2005. Typologie des paysages forestiers du sud du massif de Fontainebleau après la tempête de décembre 1999. Évaluation des dégâts forestiers à l'aide d'un semis de points et d'imagerie satellitale optique. *Rev. Int. Géomat.*, **15**(3), 281-302.
- Havyarimana F., 2015. *Contribution de l'instabilité sociopolitique dans l'anthropisation des paysages au Burundi : dynamique spatiale et biodiversité*. Thèse de doctorat : Université Libre de Bruxelles, Bruxelles.
- Ilunga Wa Ilunga E., 2014. *Les communautés végétales des affleurements des roches métallifères : une ressource biologique pour la restauration des mines et des sols dégradés par les activités minières dans le Haut-Katanga (R.D. Congo)*. Thèse de doctorat : Université de Lubumbashi, Lubumbashi (RDC).
- Inoussa M.M. et al., 2011. Dynamique spatio-temporelle des forêts claires dans le parc national du W du Niger (Afrique de l'Ouest). *Sécheresse*, **22**(2), 108-116.
- Kabulu D.J., 2011. *Impacts des activités minières sur les écosystèmes au Katanga (République Démocratique du Congo)*. Thèse de doctorat : Université libre de Bruxelles, Bruxelles.
- Kabulu D.J. et al., 2008. Analyse de la structure spatiale des forêts au Katanga. *Ann. Fac. Agro. Lubumbashi*, **12**, 12-18.
- Kalamba T., Khonde M., Ilunga N. & Mansinsa M., 1998. *Monographie de la Province du Katanga. Kĩnshasa* : PNUD/UNOPS. Programme national de relance du secteur agricole et rural (PNSAR).
- Karimoune S., Alexandre J. & Ozer A., 1993. Suivi par télédétection de l'évolution de la désertification dans la région de Zinder (Niger). In : Dubois J-M. et al.. (Eds). *Télédétection des milieux urbains et périurbains*. Montréal, Québec, Canada : AUPELF-UREF.
- Kasongo L., 2009. *Système d'évaluation des terres à multiples échelles pour la détermination de l'impact de la gestion agricole sur la sécurité alimentaire en R.D. Congo*. Thèse de doctorat : Université de Gent, Gent (Belgique).
- Koné M. et al., 2007. Suivi diachronique par télédétection spatiale de la couverture ligneuse en milieu de savane soudanienne en Côte d'Ivoire. *Télédétection*, **7**, 433-446.
- 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**(1), 183-197.
- Landis J.R. & Koch G.G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, **33**, 159-174.
- Li M. et al., 2015. Impacts of road expansion on deforestation and biological carbon loss in the Democratic Republic of Congo. *Environ. Resource Econ.*, **60**, 433-469.
- Mama A., 2013. *Anthropisation des paysages au Bénin : dynamique, fragmentation et développement agricole*. Thèse de doctorat : Université libre de Bruxelles, Bruxelles.
- Malaisse F., 1973. Contribution à l'étude de l'écosystème forêt claire (Miombo). Note 8. Le projet Miombo. *Ann. Fac. Sci. Abidjan Ser. Ecol.*, **6**, 227-250.
- Malaisse F., 1997. *Se nourrir en forêt claire africaine. Approche écologique et nutritionnelle*. Gembloux, Belgique : Les Presses agronomiques de Gembloux.
- Megevand C., 2013. *Dynamiques de la déforestation dans le bassin du Congo. Réconcilier la croissance économique et la protection de la forêt*. Washington, DC : World Bank.
- Mertens B. & Lambin E.F., 1997. Spatial modelling of deforestation in southern Cameroon. Spatial disaggregation of diverse deforestation processes. *Appl. Geogr.*, **17**, 143-162.
- Munyemba Kankumbi F., 2010. *Quantification et modélisation de la dynamique paysagère dans la région de Lubumbashi : évaluation de l'impact écologique des dépositions issus de la pyrométallurgie*. Thèse de doctorat : Université de Lubumbashi, Lubumbashi (RDC).
- Munyemba Kankumbi 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**(1), 3-23.

- Phua M.-H. et al., 2008. Multitemporal fragmentation analysis of peat swamp forest in the Klias Peninsula, Sabah, Malaysia using GIS and remote sensing techniques. *In*: Böhner J., Blaschke T. & Montanarella L. (Eds). *SAGA – Seconds Out*. Hamburg: Universität Hamburg Institut für Geographie.
- Potapov P.V. et al., 2012. Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000-2010, with Landsat ETM+ data. *Remote Sens. Environ.*, **122**, 106-116.
- Rautner M., Leggett M. & Davis F., 2013. *Le Petit Livre des grands moteurs de déforestation*. Oxford, UK: Global Canopy Programme.
- Ronald J., 1997. *Dicticiel IDRISI pour windows*. Worcester, MA, USA: Clark University.
- Sader S.A. & Joyce A.T., 1988. Deforestation rates and trends in Costa Rica, 1940 to 1983. *Biotropica*, **20**, 11-19.
- Schlaepfer R., 2002. *Analyse de la dynamique du paysage*. Fiche d'enseignement 4.2. Lausanne, Suisse : Laboratoire de Gestion des Écosystèmes, École Polytechnique de Lausanne.
- Schmitz A., 1971. *Végétation de la Plaine de Lubumbashi. Région d'Élisabethville (Haut-Katanga)*. Bruxelles : INEAC.
- Sys C. & Schmitz A., 1959, *Notice explicative de la carte des sols et de la région d'Élisabethville (Haut-Katanga)*. Bruxelles : INEAC.
- Tomislav H., Gérard B.M., Melita P. & Edzer J., 2011. Spatio-temporal prediction of daily temperatures using times series of MODIS LST image. *Theor. Appl. Climatol.*, **107**(1-2), 265-277.
- Tshibangu K.W.T., 2001. *Étude 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, Bruxelles.
- UMR TETIS, 2005. *Note sur la recherche et l'utilisation d'images Landsat gratuites*. Ciradamis, Maison de télédétection.
- Vranken I. et al., 2013. The spatial footprint of the non-ferrous mining industry in Lubumbashi. *Tropicultura*, **31**(1), 22-29.