

# 15

---

## Interprétation paysagère du processus d'urbanisation à Lubumbashi : dynamique de la structure spatiale et suivi des indicateurs écologiques entre 2002 et 2008

Yannick USENI SIKUZANI, Marie ANDRÉ, Grégory MAHY, Sylvestre CABALA KALEBA, François MALAISSE, François MUNYEMBA KANKUMBI, Jan BOGAERT\*

Lubumbashi est l'une des grandes villes d'Afrique subsaharienne, avec un taux annuel de croissance démographique d'environ 5%. Cette croissance démographique engendre une expansion rapide du bâti associée à plusieurs problèmes environnementaux. La présente étude vérifie l'hypothèse selon laquelle l'expansion du bâti entraîne une réduction d'habitats naturels et crée des conditions favorables à l'expansion des colonies de *Tithonia diversifolia*, une espèce exotique invasive. À partir de deux images SPOT de 2002 et 2008, étayées par des missions de terrain, sept classes d'occupation du sol ont été obtenues et la fiabilité de la classification a été vérifiée. La dynamique paysagère a été mise en évidence à travers une matrice de transition, par le calcul d'indices de structure spatiale et l'identification des processus de transformation spatiale. Il ressort des résultats obtenus que le bâti couvrait 32% du paysage en 2008 contre 23% en 2002. Sa croissance, suivie de celle de *T. diversifolia* et d'une végétation anthropisée, s'opère au détriment des classes naturelles. L'effet de l'anthropisation s'est traduit par l'augmentation de l'indice de perturbation qui est ainsi passé de 1,9 à 3,3 en six ans, confirmant que, dans la zone d'étude, les classes naturelles enregistrent la suppression des taches parallèlement à l'agrégation et la création des taches de classes anthropiques. La région d'étude a subi des changements importants liés à la croissance urbaine, ce qui nécessite une mise en place de politiques efficaces d'aménagement et de gestion urbaine pour inverser cette tendance.

**Interpretation of the urbanization process in Lubumbashi (Democratic Republic of the Congo) at the landscape level: spatial pattern dynamics and ecological indicators from 2002 to 2008**

Lubumbashi is one of the fastest growing African cities with annual population growth rates of 5%. Its population growth leads to a rapid urban growth associated with several environmental problems. This study tests the hypothesis that the rapid built-up growth is followed by natural habitat decrease and that it creates favourable conditions for the spread of *Tithonia*

---

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

*diversifolia*, an invasive species. From two SPOT satellite images from 2002 and 2008 supported by field visits, seven land cover classes were obtained and the accuracy of the classification was verified. Landscape dynamics have been analysed through a transition matrix, by calculating spatial pattern metrics and by the identification of the active spatial transformation processes. The results show that built-up areas covered 32% of the landscape in 2008 against 23% in 2002. Its growth, followed by *T. diversifolia* and anthropogenic vegetation, operates to the detriment of natural land covers. The human impact was illustrated by the increase of the disturbance index from 1.9 to 3.3 in 6 years, confirming the attrition of natural patches in parallel to the aggregation and creation of anthropogenic patches. The study area has undergone significant changes related to urban growth, which necessitates the development of efficient planning and management policies to reverse this trend.

## 1. Introduction

La population urbaine mondiale est passée de 14 % en 1900 à 54 % en 2014 (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2014) et, selon les projections, ce taux devrait être de 70 % en 2050 (Marzluff et al., 2008). Le processus d'urbanisation, considéré lent dans les pays développés (Turan et al., 2010), est cependant au cœur d'actualités dans les pays en développement (Vermeiren et al., 2012). Par la croissance des surfaces bâties, l'urbanisation exerce une pression importante sur les écosystèmes et ressources naturels (Alberti, 2005). Ce problème se pose avec acuité car les zones urbaines, qui n'occupent que près de six millions de km<sup>2</sup> de la surface terrestre, sont attendues d'augmenter de plus d'un million de km<sup>2</sup> d'ici 2030 (Tian et al., 2005).

En Afrique subsaharienne, on assiste à une croissance importante des villes consécutive à une démographie galopante (Kayembe et al., 2009; Vermeiren et al., 2012); ce qui ne va pas sans poser des questions d'ordre environnemental. En effet, consécutivement à l'expansion rapide des villes, il surgit dans cette région, sans contrôle ni assistance technique aucune, des zones d'habitats informels (Augustijn-Beckers et al., 2011) où la pauvreté des citoyens conduit à des pratiques très dégradantes des écosystèmes naturels (UN-Habitat, 2010). À titre d'exemple, en Afrique du Sud, McConnachie & Shackleton (2010) ont montré que les banlieues relativement pauvres se caractérisent par 14 fois moins de couvert végétal que les quartiers où le niveau de vie est plus élevé.

En Afrique subsaharienne, le changement d'utilisation du sol entraîne donc une dynamique de la structure spatiale des paysages matérialisée par la suppression de la couverture végétale et son remplacement par d'autres catégories d'occupation du sol (Bogaert et al., 2008). En effet, comparativement aux pays européens, les travaux de Kestemont et al. (2011) ont montré que les pays africains exercent une pression proportionnellement plus forte sur le changement d'utilisation du sol. Par ailleurs, les perturbations des écosystèmes créent des conditions favorables à l'expansion des espèces invasives (McKinney, 2006), à l'instar du tournesol mexicain (*Tithonia diversifolia* (Hemsley), A. Gray) reporté comme espèce exotique invasive (Tiébré et al., 2012). Pourtant, Vermeulen et al. (2011) s'accordent à dire que les éléments et formations

végétales présents dans les zones périphériques des villes vont devenir très importants pour le développement durable dans un avenir proche.

Comme dans d'autres villes d'Afrique subsaharienne, Lubumbashi enregistre une croissance démographique rapide (UN-Habitat, 2014). De 1984 à 2009, sa population a presque triplé passant de 600 000 (Nkuku Khonde & Rémon, 2006) à 1 500 000 habitants alors que sa surface bâtie a quintuplé dans la même période, passant de 37 km<sup>2</sup> à 170 km<sup>2</sup> (Munyemba Kankumbi & Bogaert, 2014). Dans cette ville, le rythme et les formes actuelles de l'urbanisation entraînent des difficultés et dysfonctionnements dans la planification de l'occupation du sol (Mulongo et al., 2014).

La maîtrise des changements spatiaux rapides induits par l'urbanisation est cruciale afin d'éclairer les conséquences écologiques et de minimiser les impacts d'une urbanisation anarchique (Ramachandra et al., 2013). Pour cette raison, cette étude a pour objectif de caractériser le processus d'urbanisation à Lubumbashi à partir de la télédétection couplée aux méthodes de l'écologie du paysage. Nous vérifions l'hypothèse selon laquelle la croissance urbaine entraîne une réduction d'habitats naturels et crée des conditions favorables à l'expansion de *Tithonia diversifolia*, une espèce exotique invasive.

## 2. Milieu, matériel et méthodes

### 2.1. Milieu d'étude : la ville de Lubumbashi et sa zone périphérique

La ville de Lubumbashi, née de la mise en valeur des gisements cuprifères (Chapelier, 1957), est située au sud-est de la République Démocratique du Congo (11°39'S et 27°28'E) et est le chef-lieu de la province du Haut-Katanga. La ville est composée de 43 quartiers répartis dans les communes de Lubumbashi, Kenya, Kampemba, Katuba, Kamalondo, Ruashi et Annexe. Le climat est du type Cw selon le système de classification de Köppen (Bultot, 1950), caractérisé par une saison de pluie (de novembre à mars) et une saison sèche (mai à septembre); avril et octobre constituent les mois de transition. Les précipitations annuelles s'élèvent à 1 270 mm et la température moyenne annuelle est d'environ 20 °C (Leblanc & Malaisse, 1978). La végétation primaire de la ville de Lubumbashi est la forêt claire du type *miombo* (Malaisse, 1997), actuellement soumise à une forte anthropisation à proximité de la ville (Munyemba Kankumbi & Bogaert, 2014). La couverture pédologique est du type ferrallitique avec un pH<sub>eau</sub> oscillant autour de 5,2 (Kasongo et al., 2013). La ville est située sur une surface d'aplanissement, accidentée par quelques collines d'orientation nord-ouest sud-est et de faible dénivellation (Leblanc & Malaisse, 1978). Le site urbain et périurbain de Lubumbashi se trouve entre 1 200 et 1 300 m d'altitude.

### 2.2. Matériel et méthodes

#### 2.2.1. Données

La zone d'étude de 1 030 km<sup>2</sup>, couvrant la ville de Lubumbashi et son hinterland, a été isolée sur deux images satellitaires SPOT du 16/07/2002 et du 18/06/2008 (résolution spatiale : 10 m) (Images Spot © CNES (2012), distribution Spot Image

S.A). Un GPS a servi pour la reconnaissance des classes d'occupation du sol durant les travaux de terrain. Les logiciels SAGA GIS 2.1.2. et ArcView GIS 3.3 ont été utilisés pour le traitement des données.

### 2.2.2. *Classification des occupations du sol et évaluation de la précision de classification*

Une classification supervisée, validée après vérification des classes d'occupation du sol sur le terrain, a été effectuée par l'algorithme de maximum de vraisemblance (Mama et al., 2013). Des enquêtes de terrain, des entretiens, les connaissances locales et l'expérience de la zone d'étude ont été utilisés comme données de référence dans le choix des zones d'entraînement.

Le choix des classes d'occupation du sol est important parce qu'il influence les résultats et les interprétations ultérieures (Zhou & Wang, 2011). Pour ce faire, compte tenu de la résolution spatiale des images acquises et de l'objectif de l'étude, les occupations du sol ont été classées en «bâti», «sol nu», «végétation anthropisée» (champs, savanes herbeuses, gazon, jeunes jachères), «*Tithonia diversifolia*» (les colonies de tournesol mexicain), «forêt» (forêt claire, forêt dense sèche, forêt galerie, savanes boisées, vieille jachère), «marécages» et «eau». Les classes «bâti», «*T. diversifolia*» et «végétation anthropisée» constituent les classes anthropiques, alors que les classes «forêt» et «marécages» constituent les classes naturelles. L'indice Kappa ( $\kappa$ ) a été appliqué pour vérifier la fiabilité de la classification (Skupinski et al., 2009).

### 2.2.3. *Mise en évidence de la dynamique de la structure spatiale*

Pour réduire l'effet «poivre et sel» observé, un filtre majoritaire à l'aide d'une fenêtre de  $3 \times 3$  pixels a été appliqué comme technique de lissage (Armenteras et al., 2013). En effet, O'Neill et al. (1996) recommandent une taille minimale de tache de 2 à 5 fois plus grande que la résolution des pixels. Les deux images ainsi apprêtées et comparables ont été utilisées pour la mise en évidence des changements entre 2002 et 2008.

Afin d'étudier les rapports entre la structure spatiale du paysage et les processus écologiques en termes quantifiables (Bogaert & Mahamane, 2005), des indices de structure spatiale ont été calculés, à savoir : l'aire maximale ( $a_{max}$ ), l'aire moyenne ( $a$ ), l'aire médiane ( $a_m$ ), l'aire totale ( $a_t$ ), l'indice de dominance ( $D$ ) défini comme le rapport entre l'aire de la plus grande tache de la classe d'occupation du sol et l'aire totale de la même classe (McGarigal et al., 2002), le périmètre total ( $p$ ), le nombre de taches par classe d'occupation du sol ( $n$ ) et l'indice de perturbation ( $U$ ) défini comme le rapport de l'aire cumulative des classes anthropiques dans le paysage et de l'aire cumulative des classes naturelles (O'Neill et al., 1988).

Par ailleurs, l'arbre de décision de Bogaert et al. (2004), basé sur les éléments principaux de la configuration du paysage que sont le nombre de taches, l'aire totale et le périmètre total (Bogaert & Mahamane, 2005), a été appliqué pour identifier les processus de transformation spatiale des classes naturelles et anthropiques (Barima et al., 2009).

Enfin, une matrice de transition a été créée pour identifier les fréquences de transition entre classes au cours de l'intervalle de temps étudié. Cette matrice, obtenue par superposition des cartes d'occupation du sol, indique : i) la proportion de l'occupation du sol en 2002 (lignes) qui a changé en une autre catégorie d'occupation du sol en 2008 (colonnes) et, ii) la stabilité éventuelle des classes sur la diagonale.

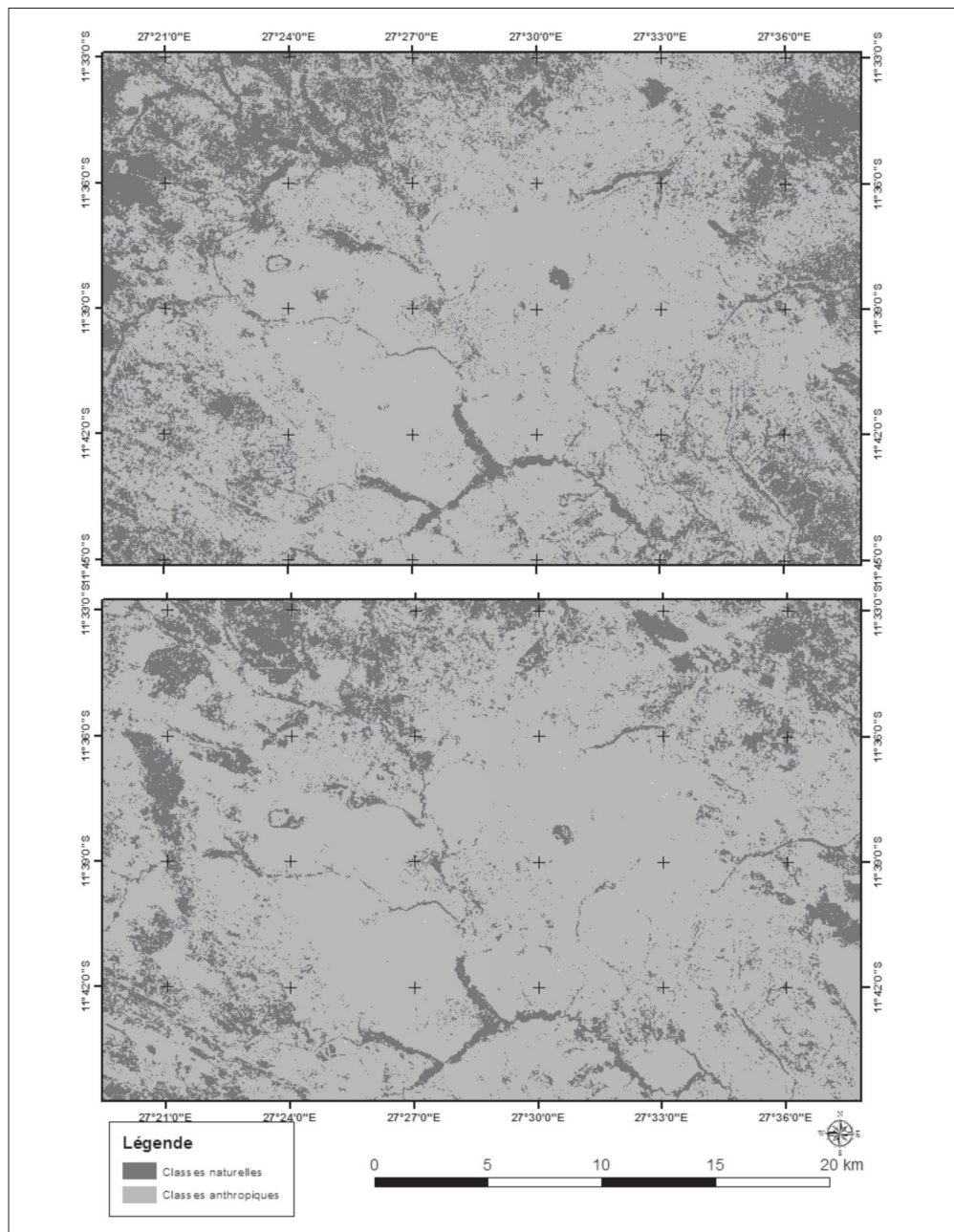
### 3. Résultats

#### 3.1. Cartographie de l'occupation du sol à Lubumbashi de 2002 à 2008

La classification des images SPOT a permis d'obtenir deux cartes montrant l'évolution des classes anthropiques et naturelles entre 2002 et 2008 (Figure 1), illustrant ainsi l'évolution de la perturbation du paysage. Les résultats de l'analyse de la performance de la classification donnent pour chacune des images classifiées des valeurs de précision globale de 87,3% et 86,9% et des valeurs de  $\kappa$  de 75,3% et 74,1% respectivement pour les deux périodes de l'étude (Tableaux 1 et 2). Les classes «forêt» et «eau» ( $Pr = 100\%$ ) sont celles qui n'ont pas été affectées par les échantillons des autres classes. Par contre, la classe «sol nu» semble avoir été plus souvent confondue avec d'autres classes. L'analyse visuelle des cartes montre une diminution de la couverture des classes naturelles en 2008 au détriment des classes anthropiques, par rapport à la situation de 2002. Dans la suite de l'analyse, les classes «eau» et «sol nu» ne seront plus considérées étant donné leur faible proportion dans le paysage (< 5%).

**Tableau 1.** Matrice de confusion de la classification de l'image SPOT de 2002. Tit : *Tithonia diversifolia*; VA : végétation anthropisée; Mar : marécages; Pu : la précision de l'utilisateur; Pr : la précision du réalisateur.

Nombre d'échantillons Données de références	Données classifiées							Total	Pr (%)
	Bâti	Sol nu	Tit	VA	Mar	Forêt	Eau		
Bâti	14	6	0	0	0	0	0	20	70,0
Sol nu	6	12	9	0	0	0	0	27	44,4
Tit	0	0	210	2	0	0	0	212	99,0
VA	0	0	11	10	4	0	0	25	41,6
Mar	0	0	0	3	11	0	0	14	78,6
Forêt	0	0	0	0	0	15	0	15	100,0
Eau	0	0	0	0	0	0	10	10	100,0
Total	20	18	230	15	15	15	10	323	
Pu (%)	70,0	66,7	91,3	66,7	73,3	100,0	100,0	Précision globale = 87,3% $\kappa = 75,3\%$	



**Figure 1.** Évolution des classes naturelles et anthropiques dans le paysage urbain de Lubumbashi de 2002 (en haut) à 2008 (en bas).

**Tableau 2.** Matrice de confusion de la classification de l'image SPOT de 2008. Tit : *Tithonia diversifolia*; VA : végétation anthropisée; Mar : marécages; Pu : la précision de l'utilisateur; Pr : la précision du réalisateur.

Nombre d'échantillons Données de références	Données classifiées							Total	Pr (%)
	Bâti	Sol nu	Tit	VA	Mar	Forêt	Eau		
Bâti	15	3	0	0	2	0	0	20	70,0
Sol nu	5	11	15	0	0	0	0	31	44,4
Tit	0	4	210	3	1	0	0	218	99,0
VA	0	0	5	11	3	0	0	19	41,6
Mar	0	0	0	1	9	0	0	10	78,6
Forêt	0	0	0	0	0	15	0	15	100,0
Eau	0	0	0	0	0	0	10	10	100,0
Total	20	18	230	15	15	15	10	323	
Pu (%)	70,0	66,7	91,3	66,7	73,3	100,0	100,0		Précision globale = 86,9% $\kappa = 74,1\%$

### 3.2. Dynamique de composition

Le paysage est resté dominé par la végétation anthropisée, avec des couvertures respectives de 43 107 et 44 308 ha en 2002 et 2008. Cette dernière a constitué la classe la plus stable, avec 34 094 ha. Entre ces deux périodes, les transformations les plus importantes ont été la croissance des aires totales des classes anthropiques et la réduction de celles des classes naturelles (Tableau 3). Entre 2002 et 2008, 2 308 ha de forêt ont évolué vers le bâti, 8 609 ha en végétation anthropisée et 682 ha ont été colonisés par *T. diversifolia*. Par ailleurs, 2 093 ha de marécages ont évolué vers le bâti et 288 ha en végétation anthropisée. Pendant ce temps, la croissance de *T. diversifolia* s'opère dans la zone bâtie et au détriment de la forêt et de la végétation anthropisée. Les valeurs présentées dans la matrice de transition ont été arrondies et par conséquent les faibles valeurs de remplacement des marécages par les taches de *Tithonia* ont été considérées comme égales à zéro. En somme, on observe quatre grands processus qui se sont déroulés dans le paysage en six ans. Premièrement, la stabilité relative de la végétation anthropisée. Deuxièmement la dégradation des écosystèmes naturels, traduite par la réduction de l'aire totale des forêts et marécages. Troisièmement, l'expansion légère de *T. diversifolia*. Et, enfin, l'expansion du bâti considérée comme le phénomène le plus dominant.

**Tableau 3.** Matrice de transition illustrant la surface des classes (ha), la transformation de leur aire entre 2002 (rangées) et 2008 (colonnes). Les valeurs des classes «sol nu» et «eau» ne sont pas présentées et par conséquent la somme des valeurs des lignes et colonnes ne correspond pas aux aires totales des classes sur les deux périodes d'étude.

	Bâti	Végétation anthropisée	<i>T. diversifolia</i>	Forêt	Marécages	Total 2002
Bâti	21 206	1035	390	356	315	23 331
Végétation anthropisée	1 624	34 094	233	1 594	693	43 107
<i>T. diversifolia</i>	902	164	206	20	3	1 385
Forêt	2 308	8 609	682	17 302	309	29 807
Marécages	2 093	288	0	712	2 575	5 076
Total 2008	33 122	44 308	1 513	19 996	3 721	



### 3.3. Évolution de la configuration du paysage lushois de 2002 à 2008

Les grandes taches de forêts et de *T. diversifolia* ont été morcelées entre 2002 et 2008, ce qui se traduit par la diminution de leur valeur de  $D$  (Tableaux 4 et 5). Pour le bâti, la valeur de  $D$  est passée de 50% en 2002 à 70% en 2008, traduisant une augmentation relative de la taille des grandes taches dans le paysage. La végétation anthropisée et les marécages ont connu une stabilité de la dominance de leurs grandes taches. À côté de la dominance, la tendance à l'anthropisation du paysage est confirmée également par la diminution des aires maximales des taches des classes naturelles et une nette progression des grandes taches des classes anthropiques; sauf pour *T. diversifolia* (Tableau 4). L'aire médiane augmente pour le bâti et pourrait par conséquent traduire une fusion de petites taches en 2008. En revanche, les classes «forêt» et «*T. diversifolia*» enregistrent une diminution de l'aire médiane; une stabilité pour les marécages est aussi observée. Enfin, le tableau révèle que l'aire moyenne diminue pour toutes les classes, sauf pour le bâti dont l'aire moyenne a quasiment doublé en six ans (Tableau 4).

**Tableau 4.** Évolution de l'aire (ha) moyenne, maximale et médiane de taches de différentes classes d'occupation du sol entre 2002 et 2008.  $a$  : aire moyenne;  $a_{max}$  : aire maximale;  $a_m$  : aire médiane.

Classes d'occupation du sol	$a$		$a_{max}$		$a_m$	
	2002	2008	2002	2008	2002	2008
Bâti	1,34	2,24	10984,0	23803,5	0,2	0,3
Végétation anthropisée	1,45	1,08	10631,7	11708,7	0,2	0,2
<i>T. diversifolia</i>	0,05	0,04	8,2	2,2	0,4	0,1
Forêt	0,70	0,54	6887,9	1928,1	0,2	0,1
Marécages	0,31	0,23	178,2	141,6	0,1	0,1

Les classes anthropiques enregistrent l'agrégation et la création comme processus de transformation spatiale, justifiée par l'augmentation de l'aire totale suivie d'une diminution ou augmentation du nombre de taches. En revanche, pour les classes naturelles, une diminution du nombre de taches a été notée en 2008 par rapport à 2002. Le processus de transformation spatiale observé pendant cette période est la suppression (Tableau 5), traduisant ainsi l'importance du phénomène de dégradation du milieu et donc de l'anthropisation des classes naturelles. Cette tendance à l'anthropisation du paysage est confirmée par l'évolution de l'indice de perturbation ( $U$ ) qui est passé de 1,9 à 3,3 en six ans, montrant que les taches des classes naturelles sont davantage remplacées par les taches anthropiques dans le paysage.



**Tableau 5.** Indices de configuration des classes d'occupation du sol en 2002 et 2008 dans le paysage urbain de Lubumbashi. PTS : processus de transformation spatiale; A : agrégation; C : création; S : suppression;  $n$  : nombre de taches;  $p$  : périmètre total (km);  $D$  : indice de dominance (%).

Classes d'occupation du sol	$n$		$p$		$D$		PTS
	2002	2008	2002	2008	2002	2008	
Bâti	17 735	15 031	15 221,6	11 468,5	50	70	A
Végétation anthropisée	29 631	27 057	21 133,1	12 553,1	30	30	A
<i>T. diversifolia</i>	27 760	35 623	2 608,1	2 408,7	1	0	C
Forêt	43 622	39 077	14 707,9	9 340,4	20	9	S
Marécages	15 068	13 683	8 475,1	4 007,3	4	4	S

## 4. Discussion

### 4.1. Approche méthodologique

L'urbanisation est un processus d'expansion spatiale des zones urbaines par l'évolution de l'utilisation du sol, ce qui entraîne le changement de structure spatiale et des processus écologiques des paysages (Antrop, 2001). L'évaluation des propriétés des paysages découle de l'hypothèse centrale de l'écologie du paysage, le *pattern/process paradigm*, selon lequel les processus paysagers et écologiques dépendent des patrons spatiaux et vice versa (Bogaert et al., 2004; Bogaert & André, 2013). Pour vérifier cette hypothèse centrale à Lubumbashi, l'impact de l'urbanisation sur les écosystèmes naturels a été évalué à partir des images SPOT à moyenne résolution spatiale.

La classification supervisée des images SPOT a donné des valeurs de précision acceptables selon l'échelle donnée antérieurement par Skupinski et al. (2009). En effet, dans une étude de l'occupation des sols, lorsque l'indice de Kappa évalué dans les opérations de classification est supérieur à 61 %, la classification adoptée est considérée recevable et les résultats peuvent être judicieusement utilisés (Jessen et al., 1994). La qualité de la classification peut s'expliquer par le regroupement des formations végétales anthropisées en une seule classe et la saison d'acquisition des images satellitaires (Barima et al., 2010; Mama et al., 2013). Toutefois, certaines taches de sols nus ont été confondues avec du bâti lors de l'évaluation de la classification, sans affecter significativement la fiabilité de la classification. Cette source de biais de classification a déjà été signalée par Vermeiren et al. (2012) dans l'étude sur la simulation de la croissance urbaine à Kampala.

La conversion des paysages naturels sous l'influence de l'urbanisation entraîne des changements irréversibles dans la configuration spatiale des paysages (Breuste et al., 2008), dont la quantification nécessite l'utilisation des indices de structure spatiale (Herold et al., 2003). Le choix des indices a porté sur le nombre des taches, l'aire (des taches et des classes) et le périmètre. Ces indices sont considérés comme les éléments essentiels de la configuration du paysage (Bogaert & Mahamane, 2005). En outre, l'indice de perturbation (O'Neill et al., 1988) a été appliqué en vue de quantifier la dégradation des écosystèmes naturels.

Les transformations spatiales des classes naturelles et anthropiques ont été mises en évidence à travers l'arbre de décision de Bogaert et al. (2004). Cette méthode de détermination des processus de transformation structurale du paysage présente de nombreux avantages tels que la simplicité et la rapidité d'exécution (Bogaert et al., 2004; Barima et al., 2009). Par ailleurs, Zhou & Wang (2011) suggèrent en plus l'utilisation des matrices de transition pour quantifier la dégradation des écosystèmes sous l'influence de l'urbanisation. Ainsi, la matrice de transition a permis de réaliser le potentiel de monitoring de l'urbanisation à travers la dynamique spatio-temporelle d'une espèce invasive et des classes naturelles.

#### 4.2. Urbanisation et dynamique paysagère

Les résultats de la dynamique de composition montrent que la croissance des classes anthropiques se fait au détriment des classes naturelles. Le constat le plus remarquable dans l'évolution de l'occupation du sol est l'évolution grandissante du bâti qui s'accompagne d'une suppression d'habitats naturels. En effet, avec un taux annuel de croissance urbaine de 7%, les résultats suggèrent que la ville croît plus rapidement que la population (5% par an entre 2010-2015) (UN-Habitat, 2014). Comparées à d'autres villes en Afrique subsaharienne, le taux annuel de croissance urbaine était de 4% entre 1995 et 2005 à Kinshasa (Kayembe et al., 2009), 6,5% à Harare entre 1984 et 2013 (Kamusoko et al., 2013) et 21,1% à Kampala entre 1989 et 2010 (Vermeiren et al., 2012). Cela confirme la croissance urbaine relativement rapide observée en Afrique subsaharienne par UN-Habitat (2014). Toutefois, cette croissance des vastes surfaces urbaines discontinues et à faible densité de population dans les zones rurales autour des villes (Briggs & Mwamfupe, 2001) conduit au phénomène de dédensification des villes tel qu'observé par Angel et al. (2011) dans la plupart des villes du monde.

Nos résultats montrent une conversion de formations naturelles en espace bâti. Cette situation a été reportée antérieurement à Lubumbashi (Frauman, 2004; Munyemba Kankumbi & Bogaert, 2014) et des observations similaires ont été faites dans d'autres villes (Bamba et al., 2010a; Diallo & Bao, 2010; Ouedraogo et al., 2010). En effet, la forêt a régressé de 33% en six ans, soit une moyenne annuelle de 5,5%, supérieure au taux de régression annuel de 1,4% rapporté par Munyemba Kankumbi & Bogaert (2014) entre 1956 et 2009. Cette différence de taux de régression des forêts se justifie par la différence d'étendue entre notre étude et celle de Munyemba Kankumbi & Bogaert (2014), montrant ainsi l'importance de l'échelle spatiale en écologie du paysage (Bogaert & Mahamane, 2005). En effet, notre milieu d'étude renferme moins de zones rurales et, par conséquent, l'impact de l'urbanisation sur les écosystèmes des zones périphériques est plus significatif.

Outre le couvert forestier, nos résultats montrent également une régression des marécages à un taux annuel de 4,5%. Les corridors marécageux régressent au profit du bâti et cette perturbation pourrait les rendre susceptibles d'être envahis par les colonies de *T. diversifolia*. Ces résultats confirment d'une part les conclusions d'Adeoye (2012) qui indique une progression du bâti sur les espaces marécageux au Nigeria et,

de l'autre, celles de Bigirimana (2012) qui signale la présence des espèces invasives dans les marécages de Bujumbura (Burundi).

La méthode de détermination des processus de transformation structurale du paysage par l'arbre de décision de Bogaert et al. (2004) a révélé que la forêt et les marécages subissent une suppression en faveur de la création et l'agrégation des classes anthropiques. Les diverses pressions anthropiques et la croissance urbaine seraient les principales causes de cette dégradation des écosystèmes naturels. Les résultats obtenus reflètent la réalité de la tendance de la dynamique du paysage à Lubumbashi où la croissance démographique s'accompagne de besoins élevés en espaces (Nkuku Khonde & Rémon, 2006) et en ressources (Munyemba Kankumbi & Bogaert, 2014). De plus, nos résultats corroborent les conclusions de Bogaert et al. (2011) qui indiquent que les classes anthropiques, entre autres les zones urbaines ou industrielles et les cultures, enregistrent des processus de transformations spatiales différents de ceux des classes naturelles. Toutefois, une faible tendance à la régénération de forêts a été enregistrée dans la matrice de transition (13%). À ce niveau, il convient de signaler que la conversion du bâti en forêt est attribuable à la confusion entre le bâti (constitué entre autres des routes en terre battue) et le sol nu lors de la classification. Il s'agirait en effet d'une présence d'arbres d'ornement sur des sols nus bordant certaines routes, notamment les plantations d'*Acacia* sp. mises en place par la municipalité. Toutefois, cette tendance de la conversion du bâti en végétation est signalée par Frauman (2004) comme une présence de la végétation hydrophile herbacée que la classification ne permet pas de différencier des forêts.

La progression des classes anthropiques modifie la composition du paysage lushois, ce qui se traduit par l'augmentation de l'indice de perturbation entre 2002 et 2008. Ces résultats corroborent ceux de Munyemba Kankumbi & Bogaert (2014) qui indiquent une anthropisation progressive des paysages dans la région de Lubumbashi entre 1956 et 2009. Une tendance similaire a été observée dans d'autres villes africaines (Jansen et al., 2008; Bamba et al., 2010b; Ouedraogo et al., 2010). Mama et al. (2014) indiquent que les pressions humaines actuelles sur les ressources forestières sont en rupture avec les capacités de régénération des formations végétales naturelles qui sont ainsi sérieusement menacées.

Par ailleurs, dans ce paysage fortement anthropisé, les colonies de *T. diversifolia* ont enregistré une croissance de 9% entre 2002 et 2008. En effet, l'anthropisation des paysages s'accompagne de changements de composition et configuration (Breuste et al., 2008) et certaines espèces, les espèces invasives notamment, profitent de ces dégradations pour coloniser de nouveaux habitats (Vanderhoeven et al., 2005). Toutefois, la progression relativement modeste de *T. diversifolia* est due au fait que l'espèce est souvent rasée sur les terrains vagues pour ériger le bâti, en même temps qu'elle s'installe sur de nouveaux sites perturbés. En plus, le milieu d'étude inclut également les éléments ruraux alors que l'espèce est notamment plus concentrée en zone (péri)urbaine. Par conséquent, l'aire totale de *T. diversifolia* est importante comme indicateur de l'anthropisation du paysage; ce qui implique que sa structure spatiale dans le paysage est davantage déterminée par les actions anthropiques que par les processus naturels.

### 4.3. Implications pour l'aménagement des zones vertes en milieux urbain et périurbain

Notre étude a révélé que la ville de Lubumbashi s'étend au détriment des écosystèmes naturels présents autour de la ville, ce qui est typique pour la plupart des villes des pays en développement en général (Bogaert et al., 2014) et plus particulièrement des villes congolaises telles que Kisangani (Bamba et al., 2010b), Kinshasa (Vermeulen et al., 2011), Mweka et Moba (Potapov et al., 2012). En effet, les transformations spatiales rapides, entraînées par l'expansion urbaine rapide à Lubumbashi, sont responsables de la suppression des forêts et marécages en même temps que de la propagation de *T. diversifolia*. Cela a des profondes implications pour la gestion des écosystèmes naturels à Lubumbashi, de même que des terres agricoles présentes autour de la ville (Nkuku Khonde & Rémon, 2006). En effet, au Bénin, les études de Toyi et al. (2013) ont montré que la vitesse de l'anthropisation des paysages est telle que les plantations d'arbres ne pourront même pas compenser les pertes de formations végétales boisées dans les décennies à venir.

Les résultats de notre étude impliquent que les écosystèmes qui résistent à la pression de l'urbanisation et ceux colonisés par les espèces invasives ne pourraient pas remplir des fonctions écologiques fournies par les écosystèmes originels, cela suite à la différence de structure et composition des espèces (Li et al., 2013). Par conséquent, il est important de conserver les écosystèmes naturels dans le paysage urbain à Lubumbashi où la faiblesse de l'organisation et de l'administration de l'espace urbain est criante (GROUPE HUIT, 2009).

Ainsi, tout plan d'aménagement durable devra intégrer des zones vertes dans et autour de la ville de Lubumbashi, étant donné que la végétation influence directement le sol et le climat urbain (Alberti, 2005) et fournit des services écosystémiques bénéfiques aux citoyens (Bolund & Hunhammar, 1999). En effet, la suppression du couvert végétal entraîne une recrudescence d'inondations, l'augmentation de la température et la dégradation des écosystèmes naturels en augmentant ainsi leur sensibilité aux invasions biologiques (Bolund & Hunhammar, 1999; Zhou et al., 2004; Alberti, 2005).

Les débats sur l'urbanisme durable, intégrant la nature dans le développement urbain, sont plus que des sujets d'actualité en Afrique subsaharienne où il a été démontré que la proportion du couvert végétal diminue rapidement (Cilliers et al., 2013). Pourtant, avec des politiques efficaces d'aménagement et de planification des infrastructures vertes, les villes pourraient jouer un grand rôle dans le maintien des espèces et la fourniture des services écosystémiques (Hostetler et al., 2011). Il est donc important de pouvoir concilier ces résultats de l'anthropisation des paysages avec la politique d'aménagement de la municipalité dans l'optique d'un développement durable.

## 5. Conclusions

Ce travail avait pour objectif l'interprétation du processus d'urbanisation dans la ville de Lubumbashi entre 2002 et 2008, à partir des méthodes d'écologie du paysage associées à la télédétection et aux Systèmes d'Informations Géographiques.

Nos résultats confirment que la zone d'étude comporte des milieux dynamiques et en forte mutation. L'équilibre écologique des forêts et marécages est fortement perturbé par l'expansion du bâti, de *T. diversifolia* et de la végétation anthropisée. Trois grands processus de transformation spatiale ont été identifiés : l'agrégation du bâti et de la végétation anthropisée, la création de nouvelles taches de *T. diversifolia*, et la suppression des marécages et des forêts. La configuration spatiale du paysage a changé en six ans, en dépit du fait que la matrice du paysage est restée dominée par la végétation anthropisée. Le taux de croissance annuel du bâti est de 7% alors que la forêt et les marécages ont régressé à des taux annuels de 5,5% et 4,5% respectivement, durant la même période.

La matrice de transition révèle que la croissance du bâti s'est principalement opérée au détriment de la végétation anthropisée, de la forêt et des marécages. En revanche, la réduction du nombre de taches et des aires totales des classes naturelles parallèlement à la progression des classes anthropiques traduit une anthropisation du paysage urbain de Lubumbashi.

Ces informations devraient permettre aux décideurs et aux aménageurs du territoire de prendre des mesures adéquates pour inverser la tendance actuelle de l'urbanisation en vue de préserver les écosystèmes naturels, tout en empêchant la propagation de *T. diversifolia*.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'ARES-CCD pour l'appui financier à cette étude par le PRD CCPGU et pour la bourse de thèse de S. Cabala (programme AI-UNILU).

## Bibliographie

- Adeoye O.N., 2012. Spatio-temporal analysis of land use/cover change of Lokoja – A confluence town. *J. Geogr. Geol.*, **4**(4), 40-51.
- Alberti M., 2005. The effects of urban patterns on ecosystem functions. *Int. Reg. Sci. Rev.*, **28**(2), 168-192.
- Angel S., Parent J., Civco D.L. & Blei A., 2011. *Making room for a planet of cities*. Cambridge, MA, USA: Policy focus Report, Lincoln Institute of Land Policy.
- Antrop M., 2001. The language of landscape ecologists and planners. A comparative content analysis of concepts used in landscape ecology. *Landscape Urban Plan.*, **55**, 163-173.
- Armenteras D., Rodriguez N. & Retana J., 2013. Landscape dynamics in Northwestern Amazonia: an assessment of pastures, fire and illicit crops as drivers of tropical deforestation. *PLoS ONE*, **8**(1), e54310.
- Augustijn-Beckers E.W., Flacke J. & Retios B., 2011. Simulating informal settlements growth in Dar es Salaam, Tanzania: an agent-based housing model. *Comput. Environ. Urban Syst.*, **35**, 93-103.
- Bamba I., Barima Y.S.S. & Bogaert J., 2010a. Influence de la densité de la population sur la structure spatiale d'un paysage forestier dans le bassin du Congo en République Démocratique du Congo. *Trop. Conserv. Sci.*, **3**(1), 31-44.
- Bamba I., Yedmel M.S. & Bogaert J., 2010b. Effets des routes et des villes sur la forêt dense dans la province orientale de la République Démocratique du Congo. *Eur. J. Sci. Res.*, **43**(3), 417-429.

- 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., 2010. Modélisation de la dynamique du paysage forestier dans la région de transition forêt-savane à l'est de la Côte d'Ivoire. *Télédétection*, **9**(2), 129-138.
- Bigirimana J., 2012. *Plant diversity pattern, processes and conservation value in Bujumbura (Burundi), an urban ecology study in subsahara Africa*. Thèse de doctorat : Université Libre de Bruxelles, Bruxelles.
- 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.
- Bogaert J. & Mahamane A., 2005. Écologie du paysage : cibler la configuration et l'échelle spatiale. *Ann. Sci. Agron. Bénin*, **7**, 39-68.
- Bogaert J. et al., 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*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Bogaert J. et al., 2011. A methodological framework to quantify anthropogenic effects on landscape pattern. In: Hong S-K., Wu J., Kim J-E. & Nakagoshi N. (Eds). *Landscape ecology in Asian cultures*. Tokyo: Springer Japan.
- Bogaert J. & André M., 2013. L'écologie du paysage : une discipline unificatrice. *Tropicultura*, **31**(1), 1-2.
- Bogaert J., Vranken I. & André M., 2014. Anthropogenic effects in landscapes: historical context and spatial pattern. In: Hong S-H., Bogaert J. & Min Q. (Eds). *Biocultural landscapes. Diversity, functions and values*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Bolund P. & Hunhammar S., 1999. Ecosystem services in urban areas. *Ecol. Econ.*, **29**, 293-301.
- Breuste J., Niemela J. & Snep R.P.H., 2008. Applying landscape ecological principles in urban environments. *Landscape Ecol.*, **23**(10), 1139-1142.
- Briggs J. & Mwamfupe D., 2001. The changing nature of the periurban zone in Africa: evidence for Dar-Es-Salaam, Tanzania. *Scott. Geogr. J.*, **115**, 269-282.
- Bultot F., 1950. *Carte des régions climatiques du Congo Belge établie d'après les critères de Köppen*. Bruxelles : Institut National pour l'Étude Agronomique au Congo-Belge, Bureau climatique.
- Chapelier A., 1957. *Elisabethville, essai de géographie urbaine*. Tome VI, fasc. 5. Bruxelles : Académie Royale des Sciences Coloniales, Classes des Sciences Naturelles et Médicales.
- Cilliers S., Cilliers J., Lubbe R. & Siebert S., 2013. Ecosystem services of urban green spaces in African countries – perspectives and challenges. *Urban Ecosyst.*, **16**, 681-702.
- Diallo B.A. & Bao Z., 2010. Land cover change assessment using remote sensing: case study of Bamako, Mali. *Researcher*, **2**(4), 7-17.
- Frauman E., 2004. L'agriculture périurbaine. In : Petit P. (Ed.). *Byakula. Approche socio-anthropologique de l'alimentation à Lubumbashi*. Bruxelles : Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer.
- GROUPE HUIT, 2009. *Élaboration du plan urbain de référence de Lubumbashi*. Rapport final. Kinshasa : Ministère infrastructures, travaux publics et reconstruction.
- Herold M., Goldstein N.C. & Clarke K.C., 2003. The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. *Remote Sensing Environ.*, **86**, 186-302.
- Hostetler M., Allen W. & Meurk C., 2011. Conserving urban biodiversity creating green infrastructure is only the first step. *Landscape Urban Plan.*, **100**, 369-371.
- Jansen L.J.M., Bagnoli M. & Focacci M., 2008. Analysis of land-cover/use change dynamics in Manica Province in Mozambique in a period of transition (1990-2004). *Forest Ecol. Manage.*, **254**, 308-326.



- Jessen L.I.F., Frans J.M. & Wel V.D., 1994. Accuracy assessment of satellite derived land-cover data: a review. *Photogramm. Eng Remote Sens.*, **60**, 410-432.
- Kamusoko C., Gamba J. & Murakami H., 2013. Monitoring urban spatial growth in Harare Metropolitan province, Zimbabwe. *Advances Remote Sens.*, **2**, 322-331.
- Kasongo L.M.E. et al., 2013. Réponse de la culture de soja (*Glycine max* L. (Merril)) à l'apport des biomasses vertes de *Tithonia diversifolia* (Hemsley) A. Gray comme fumure organique sur un Ferralisol à Lubumbashi, R.D. Congo. *J. Appl. Biosci.*, **63**, 4727-4735.
- Kayembe W.-K.M., De Maeyer M. & Wolff E., 2009. Cartographie de la croissance urbaine de Kinshasa (R.D. Congo) entre 1995 et 2005 par télédétection satellitaire à haute résolution. *Belgeo*, **3-4**, 439-455.
- Kestemont B., Frendo L. & Zaccari E., 2011. Indicators of development on environment: a comparison of Africa and Europe. *Ecol. Indic.*, **11**, 848-856.
- Leblanc M. & Malaisse F., 1978. *Lubumbashi, un écosystème urbain tropical*. Lubumbashi, RDC : Centre International de Sémiologie, Université Nationale du Zaïre.
- Li X. et al., 2013. Spatio-temporal pattern of urbanization in Shanghai, China between 1989 and 2005. *Landscape Ecol.*, **28**, 1545-1565.
- Malaisse F., 1997. *Se nourrir en forêt claire africaine. Approche écologique et nutritionnelle*. Gembloux, Belgique : Les Presses agronomiques de Gembloux.
- Mama A. et al., 2013. Anthropisation et dynamique des paysages en zone soudanienne au nord du Bénin. *Tropicultura*, **31**(1), 78-88.
- Mama A. et al., 2014. Déforestation, savanisation et développement agricole des paysages des savanes-forêts dans la zone soudano-guinéenne du Bénin. *Bois Forêts Trop.*, **322**, 65-75.
- Marzluff J.M. et al., 2008. *Urban ecology. An international perspective on the interaction between human and nature*. New York, NY, USA : Springer.
- McConnachie M.M. & Shackleton C.M., 2010. Public green space inequality in small towns in South Africa. *Habitat Int.*, **34**, 244-248.
- McGarigal K., Ene E. & Holmes C., 2002. *FRAGSTATS (Version 3): FRAGSTATS Metrics*. Amherst, MA, USA: University of Massachusetts-Produced Program.
- McKinney M.L., 2006. Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Biol. Conserv.*, **127**(3), 247-260.
- Mulongo S. et al., 2014. L'urbanisation et l'environnement géologique de la ville de Lubumbashi (Katanga, R.D. Congo). *E-revue UNILU* **1**(1), 24-39.
- 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), 1-23.
- Nkuku Khonde C. & Rémon M., 2006. *Stratégies de survie à Lubumbashi (R.D. Congo). Enquête sur 14 000 ménages urbains*. Paris : L'Harmattan.
- O'Neill R.V. et al., 1988. Indices of landscape pattern. *Landscape Ecol.*, **1**(3), 153-162.
- O'Neill R.V. et al., 1996. Scale problems in reporting landscape pattern at the regional scale. *Landscape Ecol.*, **11**, 169-180.
- Ouedraogo I. et al., 2010. Land cover change and its relation with population dynamics in Burkina Faso, West Africa. *Land Degrad. Dev.*, **21**(5), 453-462.
- Popatov P.V. et al., 2012. Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of Congo, 2000-2010, with Landsat ETM+ data. *Remote Sens. Environ.*, **122**, 106-116.
- Ramachandra T.V., Bharath H.A. & Sowmyashree M.V., 2013. Analysis of spatial patterns of urbanization using geoinformatics and spatial metrics. *Theor. Empirical Res. Urban Manage.*, **8**(4), 5-24.



- Skupinski G., Tran D.B. & Weber C., 2009. Les images satellites Spot multi-dates et la métrique spatiale dans l'étude du changement urbain et suburbain le cas de la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin, France). *Cybergeo : Eur. J. Geogr.* (en ligne). <http://cybergeo.revues.org/21995>
- Tian G. et al., 2005. Analysis of spatio-temporal dynamic pattern and driving forces of urban land in China in 1990s using TM images and GIS. *Cities*, **22**(6), 400-410.
- Tiébré M.-S., Kassi N.J., Kouadio Y.J.-C. & N'guessan K.E., 2012. Étude de la biologie reproductive de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray (Asteraceae) : Espèce non indigène invasive en Côte d'Ivoire. *J. Asian Sci. Res.*, **2**(4), 200-211.
- Toyi M.S. et al., 2013. Tree plantation will not compensate natural woody vegetation cover loss in the Atlantic department of southern Benin. *Tropicultura*, **31**(1), 62-70.
- Turan S.O., Kadio Gullari A.I. & Gunlu A., 2010. Spatial and temporal dynamics of land use pattern response to urbanization in Kastamonu. *Afr. J. Biotechnol.*, **9**(5), 640-647.
- UN-Habitat, 2010. *The state of African cities 2010. Governance, inequality and urban land market*. Nairobi: United Nations, Human Settlements Programs.
- UN-Habitat, 2014. *The state of African cities 2014. Re-imagining sustainable urban transition*. Nairobi: United Nations, Human Settlements Programs.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2014. *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352)*. New York, NY, USA: United Nations.
- Vanderhoeven S., Dassonville N. & Meerts P., 2005. Increased topsoil mineral nutrient concentrations under exotic invasives plants in Belgium. *Plant Soil*, **275**, 169-179.
- Vermeiren K. et al., 2012. Urban growth of Kampala, Uganda: pattern analysis and scenario development. *Landscape Urban Plan.*, **106**, 199-206.
- Vermeulen C. et al., 2011. Enjeux fonciers, exploitation des ressources naturelles et forêts des communautés locales en périphérie de Kinshasa, RDC. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **15**(4), 535-544.
- Zhou L. et al., 2004. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. *Proc. Natl Acad. Sci. U.S.A.*, **101**(26), 9540-9544.
- Zhou X. & Wang Y.-C., 2011. Spatial-temporal dynamics of urban green space in response to rapid urbanization and greening policies. *Landscape Urban Plan.*, **100**, 268-277.