



Dynamique spatio-temporelle des changements d'occupation du sol sous incidence anthropique dans la ville de Kinshasa (RDC) de 2001 à 2021
Spatio-temporal dynamics of land use changes under anthropogenic impact in the city of Kinshasa (DRC) from 2001 to 2021

Célestin ADEITO MAVUNDA^{1, 2, 3*}, Madjouma KANDA¹, Fousséni FOLEGA¹, Victor EGBELOU¹, Faustin BOYEMBA BOSELA³, Nicaise AMUNDALA DRAZO⁴, Joseph YOKA⁵, Marra DOURMA¹ & Koffi AKPAGANA¹

Abstract : Nowadays, the cities south of the Sahara are under a strong human influence resulting from a strong demographic growth having as consequence their sprawling.

This research work aims at assessing the anthropic impact on the dynamics of landscape units including the quality of ecosystemic services in Kinshasa and its suburbs.

The methodological approach is based on earth observation data (multidate Landsat-type image) and geospatial techniques through remote sensing software (QGIS, GDAL). These collected data were subjected to a diachronic analysis following a classification operation (maximum likelihood classification) and post-classification, the resulting products having been the subject of a detection change analysis of the landscape units.

The results show that the landscape of Kinshasa is subject to the phenomena of extension and anthropization. Thus, at an interval of twenty years, the areas of meadows / bare soils, gallery forests / dense forests and wooded savannas / shrub savannas have regressed respectively by -2112.09ha, -436.47ha and -151.89ha while those of agglomerations, fields / fallows, open forests / wooded savannas have progressed respectively by 50.19ha, 44.79ha, 64.49ha. The surface areas of the water bodies remain almost unchanged (1.04 ha).

This study is in line with the logic of contributing to SDGs 11, 13 and 15 by 2030.

Keywords: Spatio-temporal dynamics, Human activity, Remote sensing, Land use, City of Kinshasa, Democratic Republic of Congo.

Résumé : De nos jours, les villes au Sud du Sahara sont sous une forte emprise anthropique résultant d'une forte croissance démographique avec pour conséquence leur étalement spatial.

La présente étude vise à évaluer l'impact anthropique sur la dynamique des unités paysagères y compris la qualité des services écosystémiques de l'agglomération de Kinshasa.

L'approche méthodologique est basée sur des données d'observations de la terre (image multidate de type Landsat) et des techniques géospatiales à travers les logiciels de télédétection (QGIS, GDAL). Ces données collectées ont été soumises à une analyse diachronique suite à une opération de classification (classification de vraisemblance maximale) et post-classification, les produits résultants ayant fait l'objet d'une analyse de changement de détection des unités paysagères.

Les résultats révèlent que le paysage de Kinshasa est soumis aux phénomènes d'extension et d'anthropisation. Ainsi, à intervalle de vingt ans, les superficies des prairies/sols nus, galeries forestières/forêts denses et savanes arborées/savanes arbustives ont régressé respectivement de -2112,09ha, -436,47ha et -151,89ha tandis que celles des agglomérations, champs/jachères, forêts claires/savanes boisées ont progressé respectivement de 50,19ha, 44,79ha, 64,49ha. Les superficies des plans d'eau restent presque inchangées (1,04ha).

La présente étude s'inscrit dans la logique de contribution aux ODD 11, 13 et 15 à l'horizon 2030.

Mots-clés : Dynamique spatio-temporelle, Activité anthropique, Télédétection, Occupation du sol, Ville de Kinshasa, République Démocratique du Congo.

¹Centre d'Excellence Régional sur les Villes Durables en Afrique (CERVIDA-DOUNEDON), Laboratoire de Botanique et Ecologie Végétale, Université de Lomé, 1 BP 1515 Lomé 1-Togo

²Institut Supérieur d'Etudes Agronomiques de Bengamisa, Section de Gestion des Ressources Naturelles Renouvelables, B.P 202, RD. Congo

³Laboratoire d'Ecologie et Aménagement Forestier, Faculté des Sciences de l'Université de Kisangani, B.P. 2012 Kisangani, RD. Congo

⁴Université de Kisangani, Faculté des Sciences, Département d'Ecologie et Gestion des Ressources Animales, BP2012, RD. Congo

⁵Laboratoire de Biodiversité, de Gestion des Ecosystèmes et de l'Environnement, Faculté des Sciences et Techniques, Université Marien NGOUABI, Brazzaville, République du Congo

Auteur correspondant. Email : celestin.adeito@yahoo.fr et celestinadeito761@gmail.com

INTRODUCTION

L'urbanisation reste un phénomène indéniable d'anthropisation à l'échelle des paysages (ANDRE *et al.*, 2014). Ce phénomène est accentué par une croissance démographique urbaine galopante. La population urbaine mondiale estimée à 30 % en 1950 est passée à 55 % en 2018 et avoisinera 70 % d'ici 2050 (UNITED NATIONS, 2018). Toutefois, le processus d'urbanisation, ralenti dans les pays développés (TURAN *et al.*, 2010), se produit actuellement à grande vitesse dans les pays en développement (ATTOUMANI, 2019) notamment suite aux effets conjugués de l'accroissement naturel et de l'exode rural causant ainsi la dynamique spatio-temporelle des espaces urbains.

L'étude de l'occupation du sol en milieu urbain par télédétection est une entrée privilégiée dans l'évaluation des interactions entre l'homme et son milieu. Les informations issues de telles analyses sont toujours utiles dans l'identification des stratégies appropriées pour mieux gérer l'état de l'utilisation des terres (LU *et al.*, 2004). L'occupation du sol évolue selon les fluctuations climatiques et les habitudes d'exploitation des terres. Ces informations sont des variables fondamentales pour la planification régionale ainsi que pour l'étude et la compréhension de l'environnement (SORO *et al.*, 2013). Ainsi, le développement économique et la croissance démographique exercent des pressions de plus en plus fortes sur le milieu naturel d'où résultent leur dégradation, leur morcellement ou même leur disparition.

A Kinshasa, la capitale de la République Démocratique du Congo (RDC), la population a connu une croissance forte et continue depuis sa création. À l'arrivée des européens conduits par Stanley en 1881, Kinshasa n'était constituée que de la localité de Kintambo, dont la population était estimée à 5000 habitants (SAINT MOULIN, 2014). L'Institut National de Statistique a estimé la population de la ville, en 2017, à 12 691 000 habitants (INS, 2017). En considérant, les bases d'estimation de certains auteurs (MESSINA NDZOMO, 2019 ; SAMBIENI, 2019), la population en 2021 serait de 15 millions d'habitants.

Signalons que la croissance de Kinshasa n'est pas seulement démographique, elle est aussi spatiale. Parmi les principaux auteurs ayant récemment traité de l'évolution spatiale et socioéconomique de cette ville, nous retrouvons en bonne place les travaux de LELO NZUZI (2008) et ceux de KAYEMBE WA KAYEMBE *et al.* (2015), MESSINA NDZOMO *et al.* (2019) et SAMBIENI (2019). Ces différents auteurs ont abordé des thématiques variées mais ayant toutes trait à la croissance urbaine de Kinshasa. Leurs études conduisent à considérer deux grandes périodes dans la croissance de la ville de Kinshasa: la période coloniale (1885-1960) d'une part et la période postcoloniale (1960-2019) d'autre part ; avec des contrastes à l'intérieur de la seconde période suite à diverses situations socio-économiques et politiques du pays.

Kinshasa a connu une urbanisation très rapide et constitue le pôle d'influence à l'échelle du pays (MESSINA NDZOMO *et al.*, 2019, SAMBIENI, 2019). Il devient donc une nécessité d'évaluer la dynamique spatio-temporelle de la ville à travers la détermination de sa configuration paysagère et de mesurer ses paramètres spatiaux par télédétection en interrogeant les pressions anthropiques sur la dégradation de ses espaces naturels entre 2001-2021 (période supposée de stabilité politique et institutionnelle en RDC). L'étude présume que la dynamique du paysage de la ville entre 2001 et 2021 est caractérisée par une anthropisation favorisée par l'urbanisation (extension de l'agglomération) et la mise en culture des espaces libres (agriculture itinérante sur brûlis).

MATERIEL ET METHODES

Milieu d'étude

La ville de Kinshasa s'étend sur une superficie de 9 965 km² (SAINT MOULIN & KALOMBO, 2005) le long de la rive méridionale du « Pool Malebo » et constitue un immense croissant couvrant une surface plane peu élevée avec une altitude moyenne d'environ 300 m. Située entre les latitudes Sud 4° et 5° et entre les longitudes Est 15° et 16°32', Kinshasa est limitée (Figure 1) à l'Est par les provinces de Mai-Ndombe, Kwilu et Kwango ; à l'Ouest et au Nord par le fleuve Congo formant ainsi la frontière naturelle avec la République du Congo ; au Sud par la province du Kongo Central (RDC/PROGRAMME NATIONAL DE L'ASSAINISSEMENT, 2003).

La population de Kinshasa a connu une croissance forte et continue depuis sa création. Il convient de situer cette croissance démographique dans le cadre mondial d'une croissance sans précédent de la population urbaine (INS, 2017).

Tenant compte de sa basse altitude, Kinshasa se caractérise par un climat tropical chaud et humide, avec une température annuelle moyenne de 25°C et une pluviométrie annuelle moyenne de 1400 mm. Il pleut à Kinshasa en moyenne 112 jours l'an avec un point culminant de 18 jours de pluies en avril (SHOMBA *et al.*, 2015).

La végétation initiale dans plusieurs zones de Kinshasa fut constituée de forêts galeries d'une part et de formations herbeuses d'autre part. Les forêts galeries qui longent les principaux cours d'eau étant dans les vallées humides et de type ombrophile guinéo-congolaise, ne sont plus que des jachères pré-forestières fortement

dégradées, intensivement exploitées et se présentent sous forme des recrus forestiers d'âges divers. Par ailleurs, un petit groupe végétal typiquement rudéral longe les rails de la voie ferrée sur une bande de quelques mètres de largeur (HABARI, 2009).

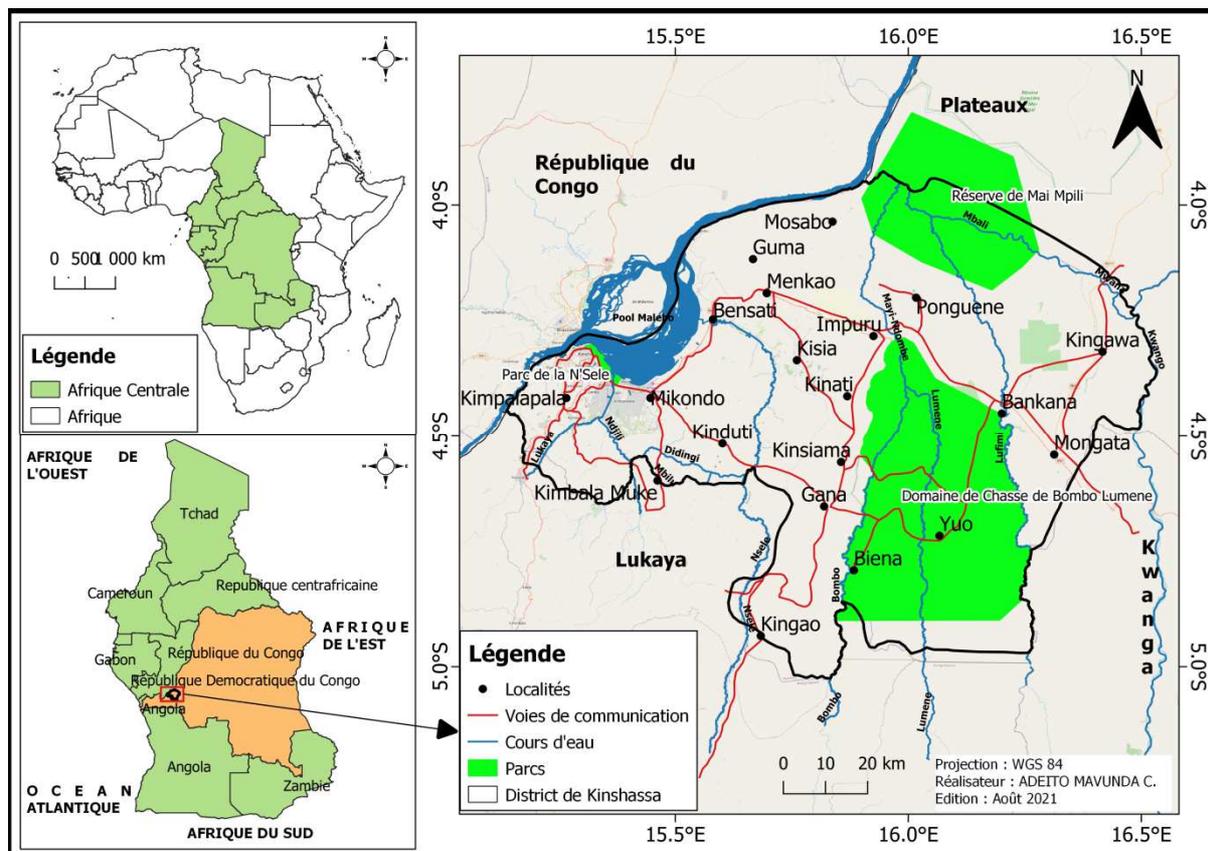


Figure 1 : Localisation de la Ville-Province de Kinshasa, RDC

Méthodologie

Données utilisées

L'étude s'est basée sur l'analyse de quatre scènes Landsat choisies et téléchargées depuis le site de l'USGS en exploitant l'application Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Elles proviennent de deux capteurs différents montés à bord de deux générations successives de la série des satellites Landsat 7 et 8 correspondant aux années 2001 et 2021 avec une résolution spatiale de 30 m x 30 m (Tableau 1). Le choix de cet intervalle d'année fait référence à la période de la stabilité politique (absence des guerres et application d'une vie démocratique) de la ville-province de Kinshasa, preuve de l'absence des déplacements massifs de la population humaine, mais aussi de la bonne gouvernance des Institutions.

Suite à la superficie de la zone d'étude, il était impératif d'utiliser deux scènes par période (année) pour couvrir l'ensemble de la zone.

Tableau 1 : Caractéristiques des images Landsat utilisées.

Caractéristiques des images				
Capteurs	Landsat 7 ETM	Landsat 7 ETM	Landsat 8 OLI_TIRS	Landsat 8 OLI_TIRS
Nombres de bandes	9	9	9	9
Résolution radiométrique	30*30	30*30	30*30	30*30
Date d'enregistrement	03/03/2000	30/04/2001	24/05/2021	15/05/2021

Classification des images

La démarche suivie pour le traitement des images comprend trois étapes.

La première étape correspond à la correction de l'image à l'aide de l'outil "Radiometric Correction" du logiciel ENVI 4.7.

La deuxième étape est la réalisation d'une classification supervisée. Elle a été menée en utilisant l'algorithme du maximum de vraisemblance en faisant l'hypothèse que la probabilité *a priori* de chaque classe soit équivalente. Afin de prendre en compte la diversité des signatures spectrales au sein des classes finales et d'éviter d'accroître les variances et donc aussi les confusions, la règle de décision sur sept sous-classes a été appliquée. Au final, l'analyse de classification a retenu les classes suivantes : agglomérations, prairies/sols nus, champs/jachères, forêts claires/savanes boisées, galeries forestières/forêts denses, plan d'eau, savanes arborées/savanes arbustives. Dans le cas précis de la présente étude, une prairie/sol nu est considérée comme un espace couvert d'herbacées ou une zone destinée au pâturage du bétail. Les sols nus sont considérés comme des espaces dépourvus d'un couvert végétal. Les agglomérations sont un ensemble des bâtis. Les champs/jachères sont des étendues de terres cultivées et/ou des étendues autrefois réservées qui sont abandonnées pour permettre la reconstitution de la fertilité du sol sur des cycles allant jusqu'à 5 ans. Les forêts claires/savanes boisées sont des formations végétales constituées d'une faible densité d'arbres avec un sous-bois tapissé de graminées. Les galeries forestières/forêts denses sont des formations végétales sur les bordures des cours d'eau et/ou formations végétales denses, de plus de 10 m d'hauteur; le plan d'eau comme toutes surface gorgée d'eau et les savanes arborées/savanes arbustives comme une étendue couverte d'un tapis herbeux, à très faible densité d'arbustes. En raison des écarts temporels qui séparent les différentes images et l'évolution de l'occupation du sol que cela engendre, les mêmes zones d'entraînement n'ont pas pu être utilisées sur l'ensemble de la série. Elles ont donc été créées pour chaque image, soit 294 pour l'image de 2001 et 325 pour l'image de 2021.

La troisième étape correspond aux opérations de post-classification. Elles ont consisté à regrouper les sous-classes puis à appliquer un filtre modal exploitant une fenêtre de convolution de neuf pixels (3x3). Cette dernière opération a permis d'éliminer les pixels isolés et de former des ensembles plus ou moins homogènes des classes d'occupation du sol. Ensuite les classifications effectuées ont été validées en générant les matrices de confusion à l'aide d'un échantillon aléatoire stratifié de 87 points de vérité-terrain obtenus à partir des images de Google Earth couplé à la descente sur terrain (Figure 2). Sur cette base, nous avons calculé la précision globale (PPBC), soit la proportion des pixels bien classés exprimée en pourcentage ; la précision de l'utilisateur (complément de la co-omission) et la précision du producteur (complément de l'omission) pour chaque classe et, enfin, le coefficient d'association Kappa global (CK) recommandé par plusieurs chercheurs (CONGALTON & GREEN, 2009).

Dans les relations ci-dessous, n_{ii} représente les éléments de la diagonale de la matrice de confusion d'ordre k , $n_{i\cdot}$ et $n_{\cdot j}$ correspondent respectivement à la somme des pixels de la ligne i et de la colonne j et N est le nombre de pixels total de la matrice.

$$CK = \frac{N \sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i,j=1}^k n_{i,j} n_{j,i}}{N^2 - \sum_{i,j=1}^k n_{i,j} n_{j,i}} \quad (1)$$

Le coefficient Kappa (CK) varie entre -1 et +1. Une valeur nulle signifie que l'algorithme de classification ne performe pas mieux qu'une classification aléatoire. Une valeur de Kappa supérieure à 0,8 représente une forte association entre le résultat de l'algorithme de classification et la référence ; une valeur située entre 0,4 et 0,8 représente une association modérée et une valeur inférieure à 0,4 représente une association faible (LANDIS & KOCH, 1977).

$$PPBC = \frac{\sum_{i=1}^k n_{ii}}{N} \times 100 \quad (2)$$

La précision de l'utilisateur est le pourcentage de pixels d'une classe issue de la classification correspondant à la même classe dans les données de référence. Elle est égale à « 100 % - erreur d'excédents ou de co-omission ». En parallèle, la précision du producteur est le pourcentage de pixels d'une classe de référence affectés à la même classe par la classification. Elle est égale à « 100 % - erreur de déficits ou d'omission ».

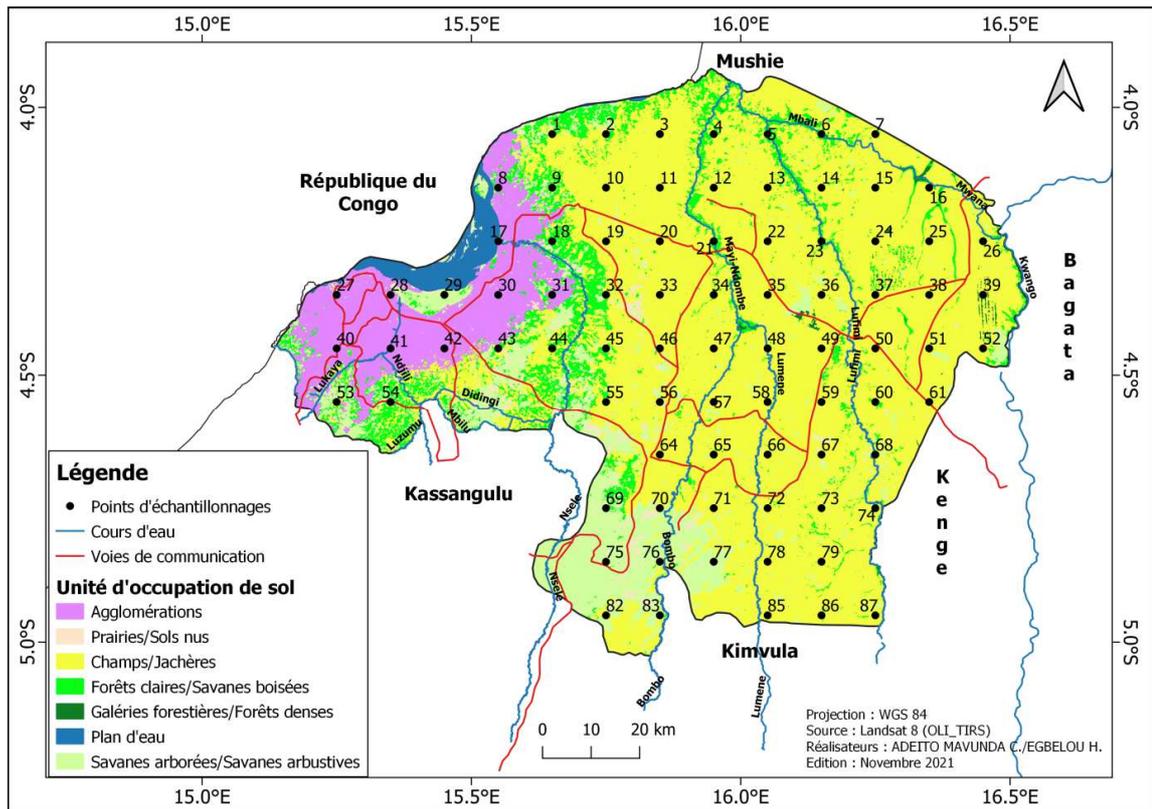


Figure 2 : Distribution des points d'échantillonnage dans les unités d'occupation du sol en 2021 à Kinshasa

Cartographie et configuration du paysage morphologique de la ville de Kinshasa

Les résultats de la classification des images ont permis de différencier deux grandes catégories d'occupation du sol : les pixels correspondant aux espaces « naturels » (classes forêts claires/savanes boisées, galeries forestière/forêts denses, plan d'eau et savanes arborées/savanes arbustives) et les pixels correspondant aux espaces « anthropisés » (Classes « agglomérations, prairies/sols nus et champs/jachères »).

Les paramètres spatiaux pris en compte dans le cadre de la présente étude portent sur les activités anthropiques et le caractère plus ou moins fragmenté de l'occupation du sol. La densité de population est un paramètre classique pour analyser les trajectoires d'extension urbaine. Il est bien connu que la densité diminue lorsque la distance au centre-ville s'accroît (MUTH, 1964). En parallèle, dans un territoire donné, la densité évolue au fil du temps. L'évaluation de ce paramètre à Kinshasa, en fonction du temps dans la zone urbanisée, l'agglomération morphologique de ville et l'étendue provinciale (paysage) permettra de mieux clarifier la tendance d'évolution spatiale de cette ville.

Une projection simple pour l'année 2050 a été faite en fonction de l'évolution des données des superficies des classes d'occupations du sol de 2001 et 2021 afin d'estimer l'impact à moyen terme sur le changement d'occupation si rien n'est fait et en schématisant l'évolution de ces unités au cours de la période d'étude (2001 et 2021).

L'indice de saturation a été étudié pour calculer la fragmentation des occupations du sol. Cet indice, généralement utilisé en écologie du paysage (MCGARIGAL & MARKS, 1994), rend compte de la part d'une occupation du sol sur une superficie donnée. Pour cette étude, nous avons utilisé cet indice afin de suivre la saturation des espaces naturels et des formations anthropisées. Pour ce faire, nous avons simplement calculé le ratio entre, d'une part, la surface des espaces naturels et, d'autre part, les surfaces des formations anthropisées et de la Ville-Province de Kinshasa.

Afin de compléter l'approche densimétrique sur la modification paysagère de la ville de Kinshasa, nous avons étudié le processus de l'évolution paysagère à partir de l'arbre de décision de BOGAERT *et al.*, (2004) avec un seuil de $t = 0,5$ (BARIMA, 2017) ; soutenu par l'indice de perturbation qui est obtenu par le rapport de l'aire cumulée des classes « anthropique » sur l'aire total du paysage ($U = A_{\text{bâti}}/A_{\text{vert}}$, $U \geq 0$). Pour séparer les processus de fragmentation et de dissection, $t_{\text{obs}} = a_{2021}/a_{2001}$ a été calculé et comparé à une valeur prédéfinie ($t = 0,5$; BARIMA, 2007). Le processus dominant est la fragmentation si $t_{\text{obs}} < t$ et dans le cas contraire le processus est la dissection.

RESULTATS

Précision des classifications et dynamique de la composition du paysage entre 2001 et 2021

Partant de la matrice de confusion, les résultats obtenus montrent que la précision globale obtenue pour l'image de 2001 est de 86,47 % avec un indice de Kappa de 81,75 % alors que celle de 2021 indique une précision de 97,44 % et un indice de Kappa de 96,71 %.

Sur l'intervalle de 20 ans, les prairies/sols nus, agglomérations, champs/jachères, forêts claires/savanes boisées, galeries forestières/forêts denses, galeries forestières/forêts denses, plans d'eau, savanes arborées/savanes arbustives ont chacun un taux d'évolution respectivement de -2112,09 % ; 50,19 % ; 44,79 % ; 64,49 % ; -436,47 % ; 1,04 % et -151,89 % (Figure 3). En se servant du test de « t de student » ($t = 0.00032844$, $df = 11.204$, $p\text{-value} = 0.9997 > 0,05 \%$) pour comparer les moyennes entre les unités d'occupation de 2001 et 2021, il n'y a pas de différence significative en terme de superficies sur les cartes thématiques des années 2001 et 2021.

Dans le processus de régression spontanée des espaces naturels (Figure 4), les formations savanes arborées/savanes arbustives et prairies/sols nus occupent une position centrale (Figure 5). Parmi les sept différentes classes d'occupation du sol, seule la superficie du plan d'eau est restée presque inchangée entre 2001 et 2021. Les galeries forestières/forêts denses (-436,47 ha) et savanes arborées/savanes arbustives (-151,89 ha) subissent une régression en termes de superficie et d'évolution végétative. Par contre les champs/jachères (44,79 ha) et forêts claires/savanes boisées (64,49 ha) augmentent en termes de superficie aux dépens des savanes arborées/savanes arbustives et prairies/sols nus (-2112,09 ha) ; et les agglomérations (50,19 ha) bénéficient des superficies des prairies/sols nus, plan d'eau, savanes arborées/savanes arbustives et champs/jachères.

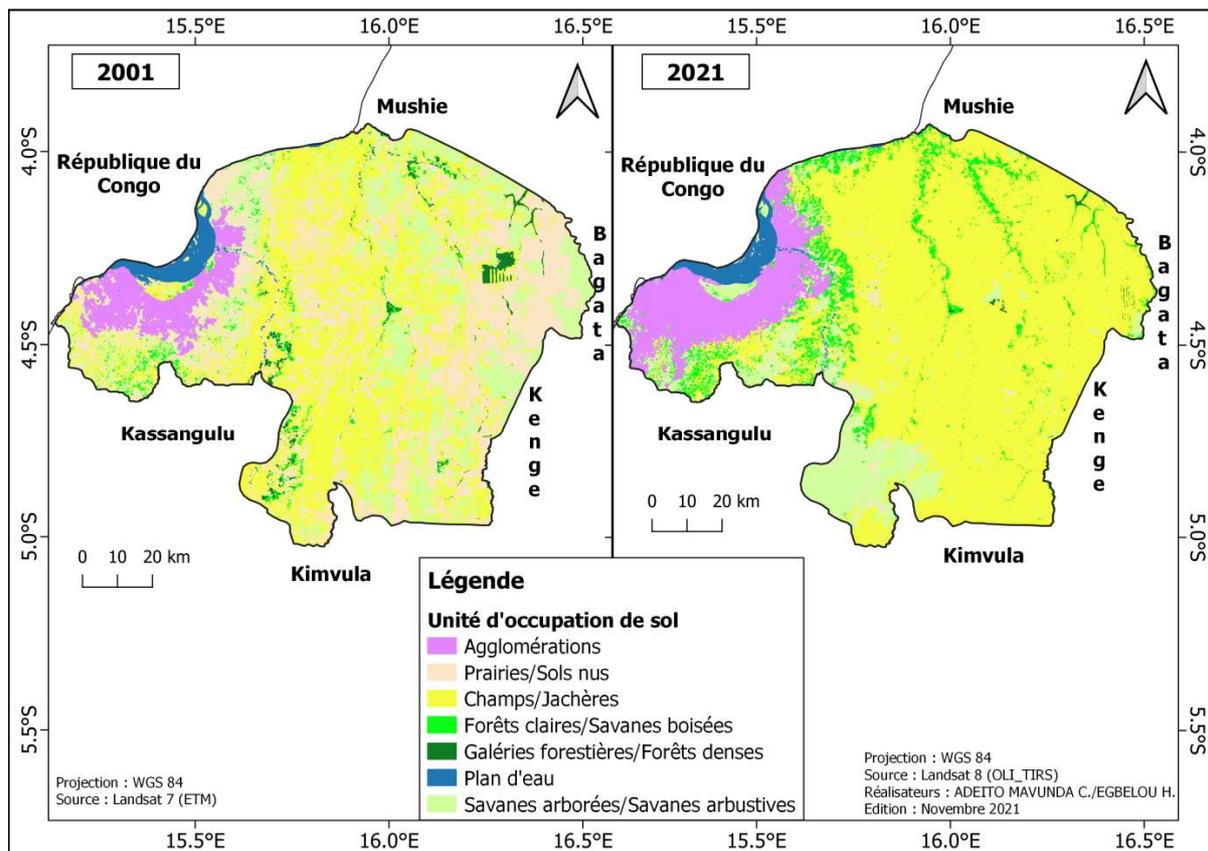


Figure 3 : Dynamique spatio-temporelle des unités d'occupation du sol de la ville de Kinshasa de 2001 et 2021

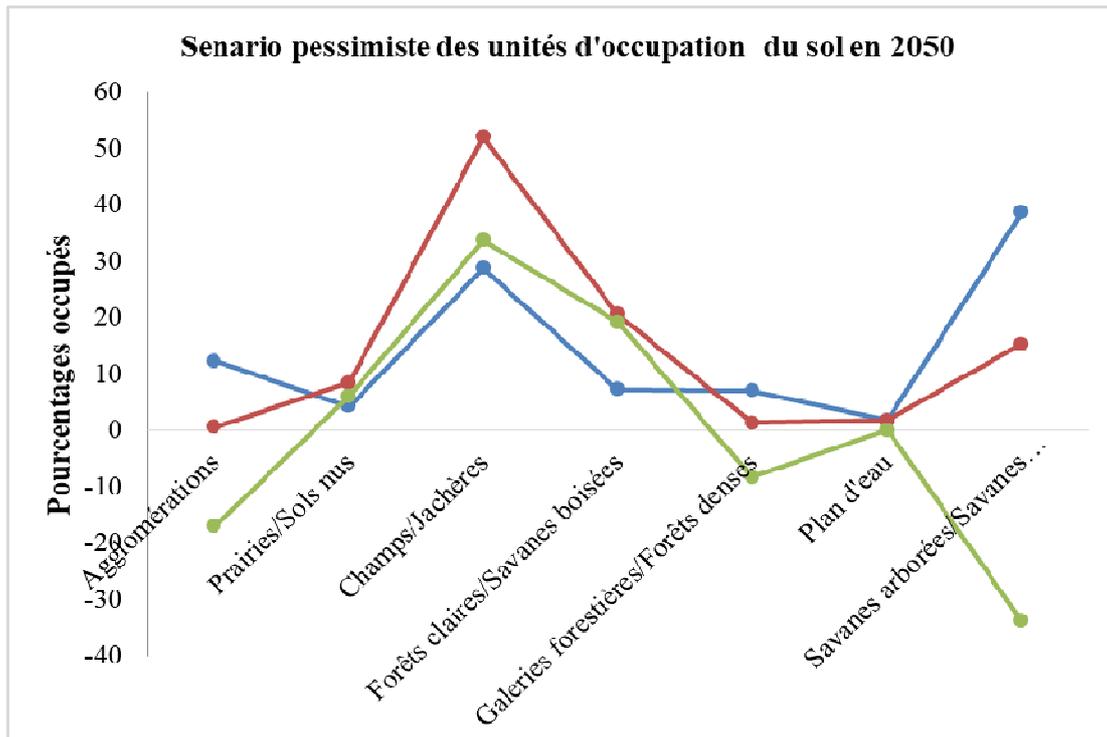


Figure 4 : Tendances évolutives des unités d'occupations du sol de Kinshasa projetées

Influence de la pression anthropique sur les transformations (régressive, conservatrice et progressive) en superficie et composition des unités d'occupation du sol entre 2001 et 2021

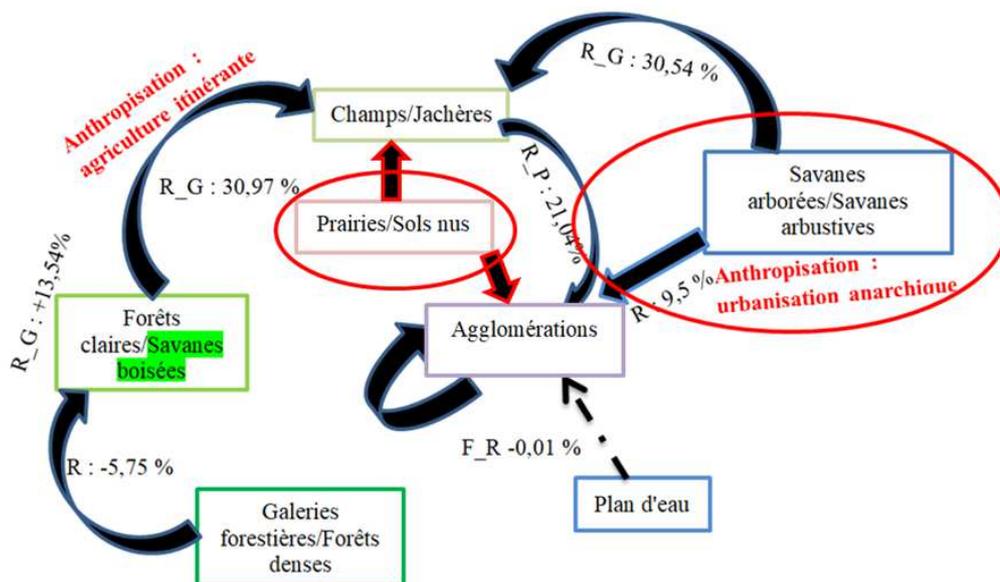


Figure 5 : Principaux taux de transformations de l'occupations du sol à Kinshasa entre 2001 et 2021 et facteurs clés d'anthropisation.

Conversion des classes d'occupation du sol

Le tableau 2 illustre le taux de changement de la couverture du sol de Kinshasa entre 2001 et 2021. Les données de la diagonale représentent les superficies de chaque classe restées intactes, dans lesquelles le plan d'eau (90,03 %) a montré une proportion plus élevée que les agglomérations, champs/jachères, forêts claires/savanes boisées, galeries forestières/forêts denses et savanes arborées/savanes arbustives et les prairies/sols nus (1,01 %) de faible superficie. Elles apparaissent stables entre 2001 et 2021.

Tableau 2 : Matrice de transition de classes d'occupation du sol à Kinshasa entre 2001 et 2021 : Prairies/Sols nus (P/SN), les Agglomérations (A), les Champs/Jachères (C/J), les Forêts claires/Savanes boisées (FC/SB), les Galeries forestières/Forêts denses (GF/FD), Plan d'eau (PE) et les Savanes arborées/Savanes arbustive (SA/Sa).

		2021					
2001	P/SN	A	C/J	FC/SB	GF/FD	PE	SA/Sa
P/SN	1,01	6,42	71,54	7,09	1,47	0,49	11,99
A	0,01	89,86	3,02	1,12	0,00	0,09	5,89
C/J	0,78	2,59	61,20	15,67	0,54	0,10	19,11
FC/SB	0,27	9,39	4,50	69,29	0,68	0,99	14,88
GF/FD	0,18	1,42	8,23	63,61	8,50	0,10	17,96
PE	3,23	2,36	0,00	0,72	0,00	90,03	3,66
SA/Sa	0,30	5,93	63,80	14,36	0,85	0,05	14,72

Processus des transformations spatiales et anthropisation

Les données relatives aux différents processus de transformation spatiale auxquels Kinshasa a fait face pendant 20 ans traduisent la configuration paysagère et démontrent la dissection pour les agglomérations et les Champs/Jachères ; l'agrégation pour les prairies/sols nus, forêts claires/savanes boisées, galeries forestières/forêts denses et savanes arborées/savanes arbustives ; et la déformation pour le plan d'eau (Tableau 3).

La Figure 6 illustre les agrégats issus des processus de transformation spatiale des classes d'occupation du sol à Kinshasa entre 2001 et 2021 à partir de l'arbre de décision de BOGAERT J. *et al.*, 2004 dans lequel les espaces naturels/formations végétales, formations anthropisées et plan d'eau couvrent respectivement 571552,028 ha, 487850,189 ha et 18942,3666 ha en 2001 ; et 401544,025 ha, 658612,462 ha et 19137,0684 ha en 2021 et où l'indice de perturbation passe respectivement de 0,45 à 0,56 entre 2001 et 2021. En utilisant le test de « t de student » ($t = -0.0012496$, $df = 3.9763$, $p\text{-value} = 0.9991 > 0,05 \%$) pour comparer les moyennes entre les agrégats de 2001 et 2021, on constate qu'il n'y a pas de différence significative en termes de superficie des agrégats du paysage de Kinshasa entre 2001 et 2021.

Tableau 3 : Processus de transformation spatiale des classes d'occupation du sol à Kinshasa entre 2001 et 2021 à partir de l'arbre de décision de BOGAERT *et al.*, (2004) :. nombre de taches (n), aire (a) et périmètre (P) du type considéré en 2001 et 2021

Classes d'occupation du sol	(en %)			(en %)			Processus de transformation spatiale
	n ₂₀₂₁	a ₂₀₂₁	P ₂₀₂₁	n ₂₀₀₁	a ₂₀₀₁	P ₂₀₀₁	
Agglomération	35,01	4,33	29,91	64,99	95,67	72,09	Dissection
Prairies/Sols nus	31,32	66,75	30,19	68,68	33,25	69,81	Agrégation
Champs/Jachères	29,55	64,43	30,91	70,45	35,57	69,09	Dissection
Forêts claires/Savanes boisées	41,03	73,80	53,07	58,97	26,20	46,93	Agrégation
Galeries forestières/Forêts denses	25,33	15,71	29,88	74,67	84,29	70,12	Agrégation
Plan d'eau	51,07	50,26	47,95	48,93	49,74	52,05	Déformation
Savanes arborées/Savanes arbustives	46,09	28,42	51,68	53,91	49,98	48,32	Agrégation

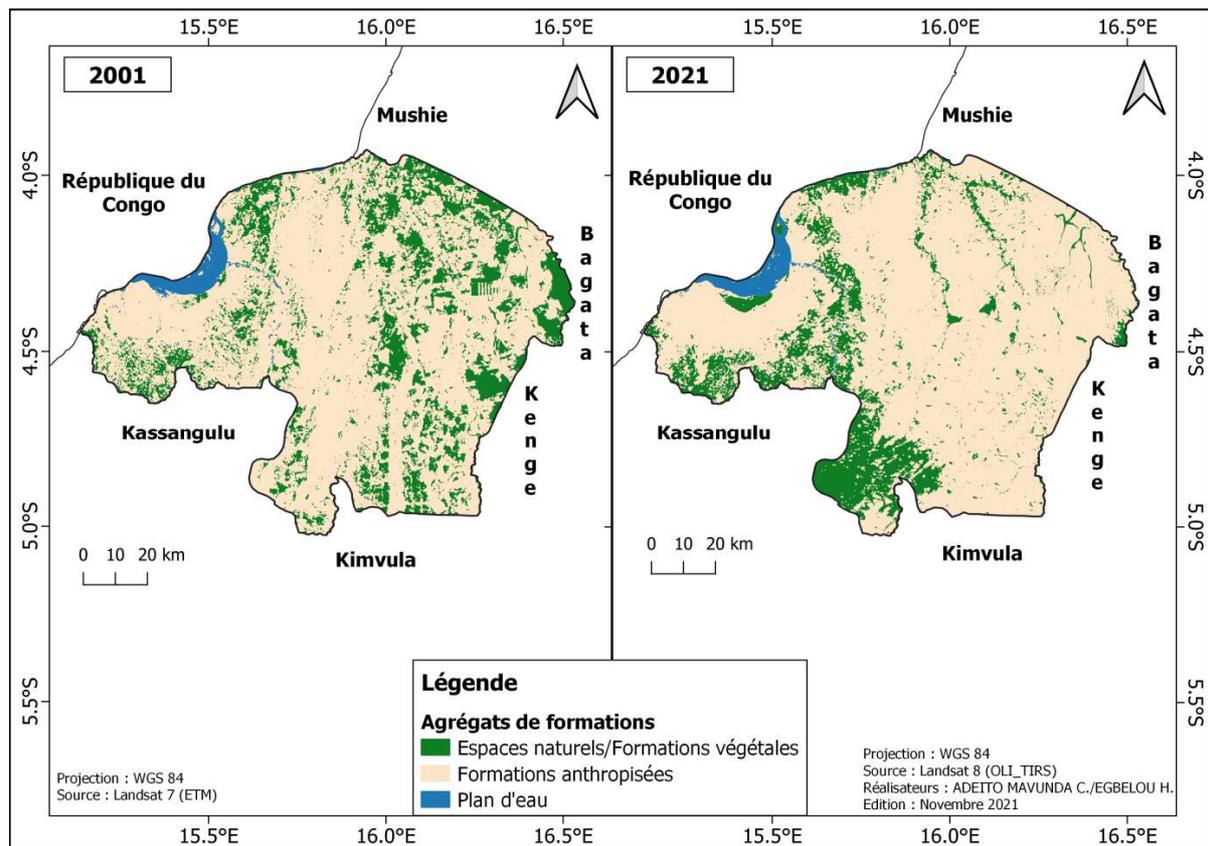


Figure 6 : Agrégats (regroupement des unités d’occupation naturels ou anthropisés) issu du processus de transformation de l’occupation du sol à Kinshasa entre 2001 et 2021

DISCUSSION

Correspondance du résultat de la classification à la réalité spatiale

Pour la présente étude, les valeurs des indicateurs de précision de la classification supervisée obtenues pour les deux images (81,75% pour 2001 et 96,71 % pour 2021) issus de la formule de Coefficient de Kappa (CK) traduisent la bonne correspondance entre le résultat de la classification et la réalité spatiale contenue dans les images et la bonne qualité des échantillons. Ceci est aussi confirmé par bon nombre d’auteurs comme MUNYEMBA & BOGAERT, 2014.

Dans leurs recherches, LANDIS & KOCH, (1977) soulignent que les valeurs de Kappa à retenir sont celles dépassant 60 %. MAMA (2013) continue en précisant qu’une valeur inférieure à 61% nécessitera la reprise des zones d’entraînement. D’autres auteurs comme HALIMO (2016) stipulent que la reclassification de l’image peut aussi contribuer à l’amélioration de la précision de sa classification et augmenter ainsi l’indice de Kappa.

Cependant, selon MESSINA NDZOMO *et al.* (2018) le faible pourcentage du coefficient de Kappa dans une image serait dû à la qualité de l’image choisie pour l’analyse et à l’influence d’une unité d’occupation du sol sur l’autre.

Néanmoins, il convient de noter aussi que la structure des paysages urbains est d’une grande complexité. La conceptualisation de leurs classes d’occupation du sol reste toujours un débat (CADENASSO *et al.*, 2007).

Influence des activités anthropiques (urbanisation et l’agriculture itinérante sur brûlis) sur la dynamique des unités d’occupation du sol entre 2001 et 2021 à Kinshasa

Dans la présente étude, la dynamique de l’occupation du sol montre que les espaces naturels/formations végétales régressent de façon importante au profit des formations anthropisées ; et que les plans d’eau restent presque inchangés. Globalement le taux de régression des espaces naturels/formations végétales est de 24,8 %

entre 2001 et 2021 au profit des formations anthropisées (agglomérations); résultat issu d'une analyse diachronique des images Landsat 2001 et 2021. Les causes de l'extension des formations anthropisées seraient liées aux pratiques traditionnelles telles que les feux de brousse et aussi, surtout, à l'agriculture itinérante et à une urbanisation anarchique. Leurs effets furent particulièrement marqués dans les cuvettes oasiennes et leurs abords du centre-est du Niger (KARIMOU *et al.*, 2018). SAMBIENI *et al.* (2018b) soutiennent le même avis en ce qui concerne Kinshasa, dont la zone périurbaine se démarque par la présence de jardins potagers alors que la zone urbaine présente un bâti de plus en plus homogène à usage collectif le plus souvent. On voit ainsi plus d'espaces verts en zone périurbaine qu'en zone urbaine qui devient la classe la plus stable aux yeux de SAMBIENI *et al.* (2018a).

Ceci est largement en-dessous de la valeur de 63 % donnée par MESSINA NDZOMO *et al.*, (2019) entre 1995-2015 dans la partie active (zone urbanisée) de la ville de Kinshasa ; et de la valeur de 60 % obtenu par TENTE (2005) sur les chaînons du secteur Natitingou Toucountouna au cours de la période 1975-2003. La différence entre le résultat de la présente recherche et celui de MESSINA NDZOMO *et al.*, (2019) serait due aux facteurs socio-économiques de la période de conflit (1995-2005) en RDC qui engendrèrent des déplacements massifs des populations, mais peut-être due aussi à l'espace considéré pour l'analyse des images. Selon TENTE (2005), elle serait due aux habitudes socio-culturelles (agriculture sur brûlis, ...) et au facteur temps.

Prépondérance des formations anthropisées sur les formations naturelles dans la ville de Kinshasa entre 2001 et 2021

Pendant une période de 20 ans (2001 à 2021), le paysage de Kinshasa a connu un certain nombre de processus de transformation spatiale dont la dissection, l'agrégation et la déformation, conclusion issue de l'approche de l'évolution paysagère à partir de l'arbre de décision de BOGAERT *et al.*, (2004). Avec un seuil de $t = 0,5$ (BARIMA, 2017), ces processus de transformation spatiale seraient engendrés par la nécessité de ressource sol – espace (notion de chorologie).

Selon BOGAERT (2018), les types de parcelles associées aux activités anthropiques sont caractérisées par des transformations différentes de celles des parcelles « naturelles » en cas d'anthropisation du paysage. D'où, la déformation peut être observée pour les deux types de taches (anthropiques et naturelles).

Relativement aux résultats présentés dans la présente étude, l'agrégation (fusion des taches) observée dans la classe des prairies /sols nus, forêts claires/savanes boisées, galeries forestières/forêts denses et savanes arborées/savanes arbustives (avec indices de perturbations de 0,45 et 0,56 respectivement à 2001 et à 2021) traduit l'existence des taches anthropiques et corrobore ainsi les résultats obtenus par RFN, 2016. Elle se rapproche aussi du résultat de SAMBIENI *et al.*, (2018a); mais différent partiellement de la présente étude du point de vue activités responsables de ces transformations car selon ces auteurs l'existence des activités anthropiques tels que l'agriculture, l'élevage, l'exploitation minière dans leurs zones d'études seraient responsables de l'agrégation ; alors que selon la présente étude, l'agrégation des différentes classes soulignées ci-dessus serait dû principalement à l'urbanisation anarchique et l'agriculture itinérante. Le changement de forme du plan d'eau serait issu de la présence des activités anthropiques incontrôlées dans la ville de Kinshasa (expansion d'érosion et urbanisation au bord des cours d'eau). La dissection des classes des agglomérations et champs/jachères est d'ordre anthropique, résultat soutenu par SAMBIENI *et al.*, (2018a) malgré l'indépendance des services écosystémiques aux besoins économiques et/ou socio-culturels des populations dans la zone urbaine et périurbaine de Kinshasa.

CONCLUSIONS

L'évaluation par télédétection de l'impact des activités humaines sur le changement d'unités d'occupation du sol dans la ville de Kinshasa entre 2001 et 2021 a conduit à 7 différentes classes d'occupation du sol en 2001 comme en 2021. Les superficies de la classe des prairies/sols subissent une perte de 2112,09 ha, la classe des galeries forestières/forêts denses 436,47 ha et la classe des savanes arborées/savanes arbustives 151,89 ha.

Par contre, la superficie de la classe des forêts claires/savanes boisées ont gagné 64,49 ha, suivie de la classe des agglomérations 50,19 ha, puis de la classe de champs/Jachères avec 44,79 ha. La superficie de la classe plan d'eau est restée presque constante (1,04 ha). Statistiquement la différence n'est pas significative entre les superficies des classes d'occupation du sol de l'année 2001 et 2021. Le changement d'occupation du sol de ces différentes classes serait dû aux activités humaines (démographie, urbanisation anarchique, agriculture itinérante, érosion du sol,...).

Ainsi, le paysage de Kinshasa a connu un certain nombre de processus de transformation spatiale dont la dissection, l'agrégation et la déformation, avec un indice de perturbation respectivement de 0,45 à 0,56 entre 2001 et 2021.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Banque Mondiale et l'Université de Lomé (UL) via le Centre d'Excellence Régional, spécialisé dans le domaine des Villes Durables en Afrique (CERViDA-DOUNEDON) pour leur contribution financière et l'encadrement scientifique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDRE, M., MAHY, G., LEJEUNE, P. & BOGAERT, J., 2014. Vers une synthèse de la conception et une définition des zones dans le gradient urbain-rural. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 18 (1) : 61-74.
- ATTOUMANI, A., VICTOR, R., RANDRIAMAMPANDRY, C. & ANDRIANIRINA, R., 2019. La croissance de la ville d'Antananarivo et ses conséquences, *Madamines*, Vol. 1, 25 p.
- BARIMA, Y.S.S., 2007. Dynamique du paysage d'une zone de transition forêt-savane dans le département de Tanda à l'Est de la Côte d'Ivoire. Mémoire DEA, Université Libre de Bruxelles (ULB), Belgique, 65 p.
- BOGAERT, J., COLINET, G. & MAHY, G., 2018. Anthropisation des paysages katangais: Presses Universitaires de Liège-Agronomie-Gembloux.
- BOGAERT, J., CEULEMANS, R. & VAN EYSENRODE, S.D., 2004. A decision tree algorithm for detection of spatial processes in landscape transformation. *Environmental Management* 33: 62-73.
- CONGALTON, R. & GREEN, K., 2009. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices (2nd Ed.). Boca Raton, London, New York : CRC Press.
- HABARI, M., 2009. Etude floristique, phytogéographique et phytosociologique de la végétation de Kinshasa et des bassins moyens des rivières N'djili et N'sele en RD Congo. Thèse de doctorat, Université de Kinshasa, 221 p.
- HALIMO, E.A., 2016. Méthode d'identification et de cartographie de l'occupation du sol à fine échelle par analyse d'images, Mémoire de Master 2^{ème} année, Université de Marne-la-Vallée.
- INS., 2017. Annuaire statistique 2016. Kinshasa: RDC, Ministère du Plan et Révolution de la Modernité, Institut National de Statistique.
- KARIMOU BARKÉ, M., TYCHON, B., OUSSEINI, I., AMBOUTA, K. J-M. & LAMINO MANZO, O., 2018. Analyse de l'évolution des paysages de cuvettes oasiennes et de leurs alentours dans le centre-est du Niger. *Geo-Eco-Trop*, 42, 2: 259-273.
- KAYEMBE WA KAYEMBE, M. & WOLFF, E., 2015. Contribution de l'approche géographique à l'étude des facteurs humains de l'érosion ravinante intra-urbaine à Kinshasa (R.D. Congo). *Geo-Eco-Trop*, 39 (1): 119-138.
- LANDIS, J. & KOCH, G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174.
- LELO NZUZI, F., 2008. Kinshasa, ville et environnement. Edition Harmattan Paris, 282p.
- MAMA, A., 2013. Anthropisation des paysages au Bénin : dynamique, fragmentation et développement agricole. Thèse de doctorat : Université libre de Bruxelles, Faculté des Sciences, Ecole Interfacultaire des Bioingénieurs, Bruxelles.
- MCGARIGAL, K. & MARKS, B., 1994. Fragstats, Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structures. Corvallis: Forest Science Department, Oregon State University.
- MESSINA NDZOMO, J-P., 2019. Consommation de la ressource foncière, périurbanisation résidentielle et efficacité urbaine à Kinshasa. Thèse de doctorat en cotutelle, ERAIFT (RDC) et ULiège (Belgique), 236p.
- MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'ASSAINISSEMENT (MEA), 2007. Place de la gestion durable des terres au Mali.
- MUNYEMBA, K.F. & BOGAERT, J. 2014. Anthropisation et dynamique spatiotemporelle de l'occupation du sol dans la région de Lubumbashi entre 1956 et 2009. *Revue électronique de l'Université de Lubumbashi, e-revue UNILU* 1 (2014) 3-23.
- RDC/Programme national de l'Assainissement (dir), 2003. La gestion des déchets solides à Kinshasa, Rapport final, avril 2003.
- RFN., 2016. The Future of Forest Conservation, Rainforest Foundation Norway, <https://www.regnskog.no/en/long-reads-about-life-in-the-rainforest/the-future-of-forest-conservation>, consulté le 25 Août 2019.
- SAINT MOULIN, L., 2014. Dynamique démographique de Kinshasa : Ruptures et continuités. Cahiers congolais de l'aménagement et du bâtiment (Numéro Spécial, 003), 30-39.
- SAINT MOULIN, L. & KALOMBO, C., 2005. Atlas de l'organisation administrative de la République Démocratique du Congo, CEPAS, Kinshasa.
- SAMBIENI, K.R., 2019. Dynamique du paysage de la ville-province de Kinshasa sous la pression de la périurbanisation : l'infrastructure verte comme moteur d'aménagement. Thèse de doctorat en cotutelle, ERAIFT (RDC) et ULiège (Belgique), 295p.

- SAMBIENI K.R., BILOSO MOYENE, A., TOYI, M., OCCHIUTO, R., BOGAERT J. & DOSSOU, B., (2018b). La végétation arborée domestique dans le paysage urbain et périurbain de la ville de Kinshasa (République Démocratique du Congo). *Afrique Science*, 14(2) : 197 – 208.
- SAMBIENI, K.R., MESSINA NDZOMO, J.-P., BILOSO MOYENE, A., HALLEUX, J.-M., OCCHIUTO, R. & BOGAERT, J. 2018a. Les statuts morphologiques d'urbanisation des communes de Kinshasa. *Tropicultura*, 36, 3, 520-530.
- SHOMBA KINYAMBA, S., MUKOKA NSENDA, F., OLELA NONGA, D., KAMINAR, T.M. & MBALANDA, W., 2015. Monographie de la ville de Kinshasa. ICREDES Kinshasa-Montréal Washington, 2015.
- SORO, T.D., KOUAKOU, B.D., KOUASSI, E.A., SORO, G., KOUASSI, A.M., KOUADIO K.E., YEI M.O.S. & SORO N., 2013. Hydroclimatologie et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire). [VertigO] *La revue électronique en sciences de l'environnement*, 13 (3) : 22 p.
- TENTE, B., 2005. Recherche sur les facteurs de la diversité floristique des versants du massif de l'Atacora : Secteur Perma-Toucuontouna (Bénin). Thèse de Doctorat unique. EDP/FLASH/UAC, 252 p.
- TURAN, S.O., KADIO ULLARI, A.I. & GUNLU, A., 2010. Spatial and temporal dynamics of land use pattern response to urbanization in Kastumonou, *African Journal of Biotechnology*, 9 (5): 640 – 647.
- UNITED NATIONS., 2018. Department of Economic and Social Affairs, Population Division (UNDESA), *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*, (2018).