

Influence de la densité de la population sur la structure spatiale d'un paysage forestier dans le bassin du Congo en R. D. Congo

Authors: Bamba, Issouf, Barima, Yao Sadaïou Sabas , and Bogaert, Jan

Source: Tropical Conservation Science, 3(1) : 31-44

Published By: SAGE Publishing

URL: <https://doi.org/10.1177/194008291000300104>

BioOne Complete (complete.BioOne.org) is a full-text database of 200 subscribed and open-access titles in the biological, ecological, and environmental sciences published by nonprofit societies, associations, museums, institutions, and presses.

Your use of this PDF, the BioOne Complete website, and all posted and associated content indicates your acceptance of BioOne's Terms of Use, available at www.bioone.org/terms-of-use.

Usage of BioOne Complete content is strictly limited to personal, educational, and non - commercial use. Commercial inquiries or rights and permissions requests should be directed to the individual publisher as copyright holder.

BioOne sees sustainable scholarly publishing as an inherently collaborative enterprise connecting authors, nonprofit publishers, academic institutions, research libraries, and research funders in the common goal of maximizing access to critical research.

Research Article

Influence de la densité de la population sur la structure spatiale d'un paysage forestier dans le bassin du Congo en R. D. Congo.

Issouf Bamba¹, Yao Sadaïou Sabas Barima¹ and Jan Bogaert¹

¹Université Libre de Bruxelles, Service d'Ecologie du Paysage et Systèmes de production végétale. Bruxelles, Belgique.

Emails: Issouf Bamba <bambisso@yahoo.fr>, Jan Bogaert <jan.bogaert@ulb.ac.be>

Résumé

La fragmentation des habitats forestiers, induisant une réduction de l'aire totale et une augmentation du nombre de taches forestières constitue l'une des menaces majeures pour le maintien de la biodiversité. La présente étude menée dans la province orientale de la République Démocratique du Congo s'articule autour de l'hypothèse selon laquelle, dans les zones forestières, la variation de la densité de la population entraîne un changement de la structure du paysage. Nous avons déterminé la classe forestière à partir de la classification d'une image de type Landsat ETM+ datant de 2001. Après avoir subdivisé la zone en 266 cellules de 10 km x 10 km, quatre indices de structures spatiales quantifiant la fragmentation de la forêt (classe forêt) ont été calculés : le nombre d'îlots de forêt (taches de forêt), la proportion de couverture forestière, la dominance de la plus grande tache et la dimension fractale. La densité de la population dans chaque cellule a été obtenue à partir des données de l'UNEP de l'année 2000. Les résultats ont montré l'existence de corrélations hautement significatives entre la densité de la population et les indices de fragmentation confirmant ainsi l'influence de la densité de la population sur la dégradation de l'écosystème naturel matérialisée par la fragmentation forestière.

Mots clés : fragmentation, biodiversité, structures spatiales, densité de la population

Abstract

Habitat fragmentation reduces total forest area and increases of the number of forest patches; it constitutes one of the major threats for biodiversity. The hypothesis according to which, in forest zone, the change in population density leads a change of landscape structure was verified by means of a study area situated in the Oriental Province of the Democratic Republic of the Congo. We determined forest cover using a classified Landsat ETM+ scene of 2001. After subdivision of the study area in 266 grid cells of 10 km x 10 km, four landscape metrics quantifying the degree of forest fragmentation were calculated: the number of forest patches, the total proportion covered by forest, the index of the largest patch, and the fractal dimension. Population density for each grid cell was based on 2000 UNEP data. Highly significant correlations between population density and the aforementioned fragmentation metrics were observed, which confirms the influence of population density on the degradation of natural ecosystems, evidenced by the appearance of isolated forest patches in the landscape.

Keys words: fragmentation, biodiversity, landscape spatial pattern, population density

Received: 14 September 2009; Accepted: 2 February 2010; Published: 31 March 2010

Copyright: © Issouf Bamba, Yao Sadaïou Sabas Barima and Jan Bogaert. This is an open access paper. We use the Creative Commons Attribution 3.0 license <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/> - The license permits any user to download, print out, extract, archive, and distribute the article, so long as appropriate credit is given to the authors and source of the work. The license ensures that the published article will be as widely available as possible and that the article can be included in any scientific archive. Open Access authors retain the copyrights of their papers. Open access is a property of individual works, not necessarily journals or publishers.

Cite this paper as: Bamba I., Barima Y. S. S. and Bogaert, J. 2010. Influence de la densité de la population sur la structure spatiale d'un paysage forestier dans le bassin du Congo en R. D. Congo. *Tropical Conservation Science* Vol. 3 (1):31-44. Available online: www.tropicalconservationscience.org

Introduction

La fragmentation et la perte d'habitats qui résulte de cette transformation du paysage sont une des menaces majeures pesant actuellement sur la diversité biologique [1]. Elles modifient profondément la configuration du paysage. Le milieu forestier est considéré comme l'habitat le plus affecté par la fragmentation [2]. Ainsi, si l'on s'intéresse à la sauvegarde des espèces qui dépendent de cette forme d'habitat, la fragmentation du couvert forestier est la principale variable à considérer [3].

Le bassin du Congo contient le deuxième plus grand massif forestier tropical mondial [4]. Malgré son importance dans les stratégies d'atténuation des changements climatiques par l'absorption du dioxyde de carbone, ce massif, situé en plein cœur de la forêt équatoriale, fait face à de multiples menaces [5]. Les pressions démographiques, l'agriculture, les activités minières, l'urbanisation et la déforestation sont autant de facteurs qui pèsent sur sa conservation et sur celle de toute la biodiversité qu'il abrite [6]. Selon Williams [3], en zone tropicale, la superficie couverte par la forêt et sa dégradation sont en étroite corrélation avec les densités de la population. Au niveau régional, en Afrique centrale, Bogaert [7] montrent qu'il existe une causalité négative entre la pression démographique et la couverture forestière. D'autres travaux ont montré que la densité de la population doit plutôt être considérée comme une cause sous-jacente de modification du paysage forestier en zone tropicale [8] car les causes seraient essentiellement économiques et guidées par les opportunités politiques et socio-économiques des pays [9].

Dans la présente étude, nous voulons vérifier l'hypothèse selon laquelle dans les zones forestières, la variation de la densité de la population entraîne un changement de la structure du paysage forestier.

L'étude a été réalisée dans la province orientale de la République Démocratique du Congo (R. D. Congo), située dans la forêt équatoriale du bassin du Congo. Le but est de déterminer les relations entre la variation de la densité de la population et la fragmentation de la forêt sur base d'indices utilisés pour caractériser la fragmentation. Pour la forêt (classe forêt), la fragmentation sera quantifiée par le nombre d'îlots (taches), l'aire totale, la dimension fractale et la dominance de la plus grande tache.

Données et Méthodologie

Présentation de la zone d'étude et cartographie

La zone d'étude se situe dans la province Orientale de la R. D. Congo (Fig. 1). La végétation dominante est la forêt dense humide qui correspond au « closed evergreen lowland forest » [10]. Du fait de la densité croissante de la population et des activités anthropiques, ces forêts subissent des pressions d'ordre divers : agriculture, chasse et récolte, bois de chauffe, charbon de bois entre autres (Fig. 2).

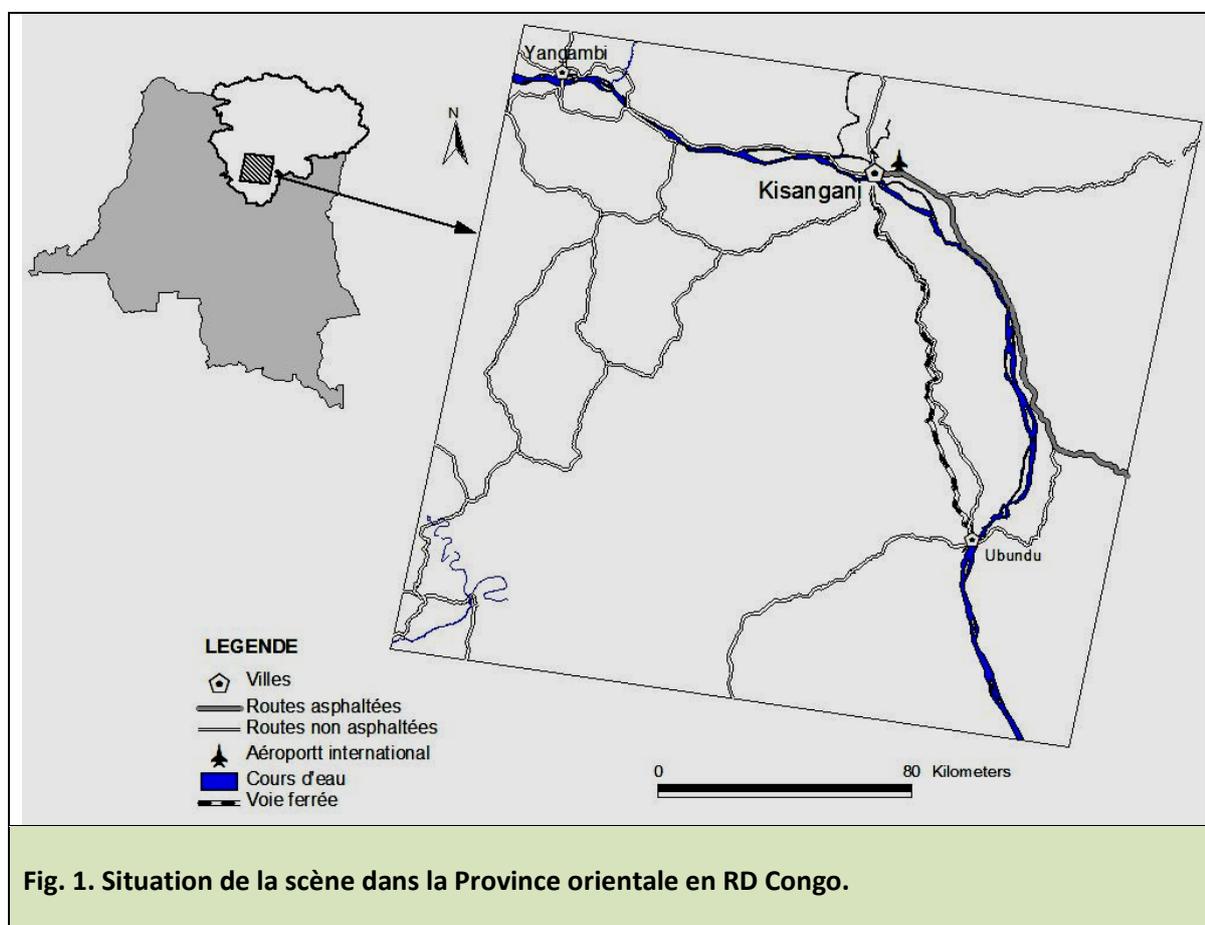


Fig. 1. Situation de la scène dans la Province orientale en RD Congo.

La détermination de la classe forêt a été réalisée à partir de la classification d'une image de type Landsat ETM+ (Path : 176 ; Row : 060), de 185 km x 185 km d'étendue, 30 m de résolution et datant du 03 mars 2001. Le point central de cette image a pour coordonnées 0°0'N et 25°0'E et contient dans sa partie nord, la ville de Kisangani (0°31'N et 25°11'E) qui est la troisième ville économique de la R. D. Congo et la capitale de la province orientale (Fig. 1). Cette zone d'étude est la plus densément peuplée de toute la province du fait de la proximité de cette ville qui est la principale agglomération (682 600 habitants en 2004) de la région avec de nombreuses infrastructures socio-économiques telles qu'un aéroport international, un port sur le fleuve Congo.

La classification, d'abord non supervisée a été effectuée par le module ISOCLUST du logiciel Idrisi 3.2 avec les bandes 4, 3 et 2. Ces bandes désignent respectivement les longueurs d'onde du proche infrarouge (0,75-0,90 μm), du rouge (0,63-0,69 μm) et du vert (0,52-0,60 μm). Six classes d'occupation du sol ont été obtenues. Ensuite, la validation de la définition des classes a été faite grâce à la comparaison avec la carte de l'occupation du sol de la R. D. Congo produite à l'échelle 1:2 500 000 par le Musée Royal d'Afrique Centrale [11]. Pour les besoins de l'étude, trois classes

d'occupation du sol ont finalement été définies: la classe eau qui représente les cours d'eau, la classe forêt représentant la forêt dense humide et la troisième classe regroupant l'ensemble des autres types d'occupation du sol (sol nu, zone agricole et infrastructure, forêt dégradée, végétation aquatique).



Fig. 2. Illustration de l'anthropisation du milieu forestier en République Démocratique du Congo : culture de manioc à l'intérieur de la forêt (à gauche) ; jachère dans la forêt (à droite) ; la présence d'arbres morts sur pieds traduit le passage du feu dans ce milieu (agriculture itinérante sur brûlis ou feu de forêt). Photo : BAMBAM Issouf

La scène a ensuite été subdivisée comme l'ont fait Sader et *al.* [12], en cellules de 10 km x 10 km afin d'analyser la structure du paysage de la zone d'étude, soit un total de 266 cellules pour l'ensemble de la zone d'étude.

Densité de la population

Les densités de la population dans chacune des cellules ont été déterminées à partir de la carte de la densité de la population de l'Afrique de l'année 2000 de 2,5 km de résolution publiée par l'United Nations Environment Programme [13]. Les valeurs de la densité ont été extraites pour chaque cellule dans ArcGis 9.2. Pour cette étude, ont été retenues les cellules dans lesquelles la densité de la population est inférieure ou égale 100 habitants par km² soit 246 cellules représentant plus de 91% de l'ensemble. Les 20 cellules restantes sont situées dans la zone urbaine de Kisangani (la superficie de cette ville est de 1910 km²). Ce choix a été fait afin d'éviter de biaiser les résultats par l'influence de cette zone urbaine où il n'existe plus de contact direct avec la forêt du fait de l'urbanisation. A l'aide de la fonction « Interpolate » du logiciel ArcGis 9.2, une interpolation a été effectuée à partir de la valeur de la densité de la population dans les cellules. L'interpolation a permis d'obtenir un champ de valeurs continues de densité de la population dans toute la zone d'étude à partir des valeurs ponctuelles mesurées dans chaque cellule [14].

Indices de structure spatiale

La caractérisation de la structure paysagère a été faite par le calcul d'indices dans chacune des cellules. Il existe un nombre important d'indices que l'on pourrait utiliser pour décrire et quantifier la structure du paysage [15, 16]. Dans le cas de cette étude, nous en avons choisi quatre permettant aussi de quantifier la fragmentation forestière.

Premièrement, le nombre de taches (n) appartenant à la classe forêt a été déterminé.

Ensuite, l'aire totale (a_t) occupée par la classe forêt a été calculée dans chaque cellule. La surface totale d'une cellule étant de 100 km², nous avons décidé de l'exprimer en pourcentage (%).

Puis, la dominance D (a) qui indique la proportion d'aire occupée dans l'aire totale (a_t) par la plus grande tache de la classe forêt, notée a_{\max} [17] :

$$D(a) = \frac{a_{\max}}{a_t} \times 100 \quad (1)$$

avec $0 < D(a) \leq 100$. Plus la valeur de la dominance est grande, moins la classe est fragmentée. Enfin la dimension fractale Df de la classe forêt dense a été utilisée. Cet indice est considéré comme une mesure du degré d'anthropisation des taches dans une classe du paysage [18]. En effet, les objets naturels sont caractérisés par des formes complexes avec une valeur de dimension fractale élevée ($Df \approx 2$) tandis que les objets modelés par l'Homme ont des formes caractéristiques régulières (carré, rectangle...) et une valeur de dimension fractale faible ($Df \approx 1$) [18]. Mesure de complexité du paysage, la dimension fractale permet de quantifier le degré d'irrégularité et de fragmentation d'un objet [19]. Elle est déterminée par la relation qui existe entre le périmètre et l'aire de l'ensemble des taches de la classe [19, 20]:

$$p_i = k \cdot a_i^{Df/2} \quad (2)$$

où k est le facteur de graduation aussi appelé « préfacteur » [20] défini comme une constante et reflétant les formes des taches [21], a_i et p_i sont respectivement l'aire et le périmètre de la i -ème tache de la classe forêt. La reformulation de l'équation (2) en utilisant une transformation logarithmique donne :

$$\log p_i = \log k + (Df/2) \cdot \log a_i \quad (3)$$

Dans la pratique, la régression linéaire logarithmique entre les aires ($\log a_i$) et les périmètres ($\log p_i$) de l'ensemble des taches de la classe permet d'obtenir la dimension fractale par la détermination de la pente [22]. La dimension fractale de la classe équivaut ainsi au double de la pente de cette droite de régression.

L'effet de la densité de la population sur la structure spatiale de la forêt s'est faite via l'analyse des relations et l'ajustement de modèles entre la densité de la population et les différents indices calculés pour la classe forêt dense (nombre de taches n , l'aire totale a_t , la dominance de la grande tache $D(a)$ et la Dimension fractale Df). Les courbes de tendance ont été tracées dans Excel dans lequel le programme calcule en permanence l'ajustement du nuage de points par la méthode des moindres carrés. Le choix d'un modèle a été fait suivant la disposition du nuage de points et surtout la valeur du coefficient de détermination (R^2). Ce coefficient a été utilisé pour mesurer la qualité de l'ajustement des estimations de l'équation de régression [23]. Il permet d'avoir une idée globale de l'ajustement du modèle et s'interprète comme la part de la variance de l'indice pris en compte expliquée par la variation de la densité de la population. Il varie entre 0 et 1 et s'exprime souvent en pourcentage. L'ajustement sera d'autant meilleur que R^2 est proche de 1 ou 100%.

Pour établir ces relations, à chaque valeur de la densité d_j allant de 0 à 100 habitants/km², il a été attribué une valeur unique de l'indice qui est la valeur moyenne de l'indice considéré (Ind) pour les x cellules ayant la même densité d_j et obtenue suivant (4) :

$$Ind = \frac{1}{x} \sum_{i=1}^x Ind_i \quad (4)$$

où Ind_i est la valeur de l'indice calculée dans la cellule i de densité de population d_j .

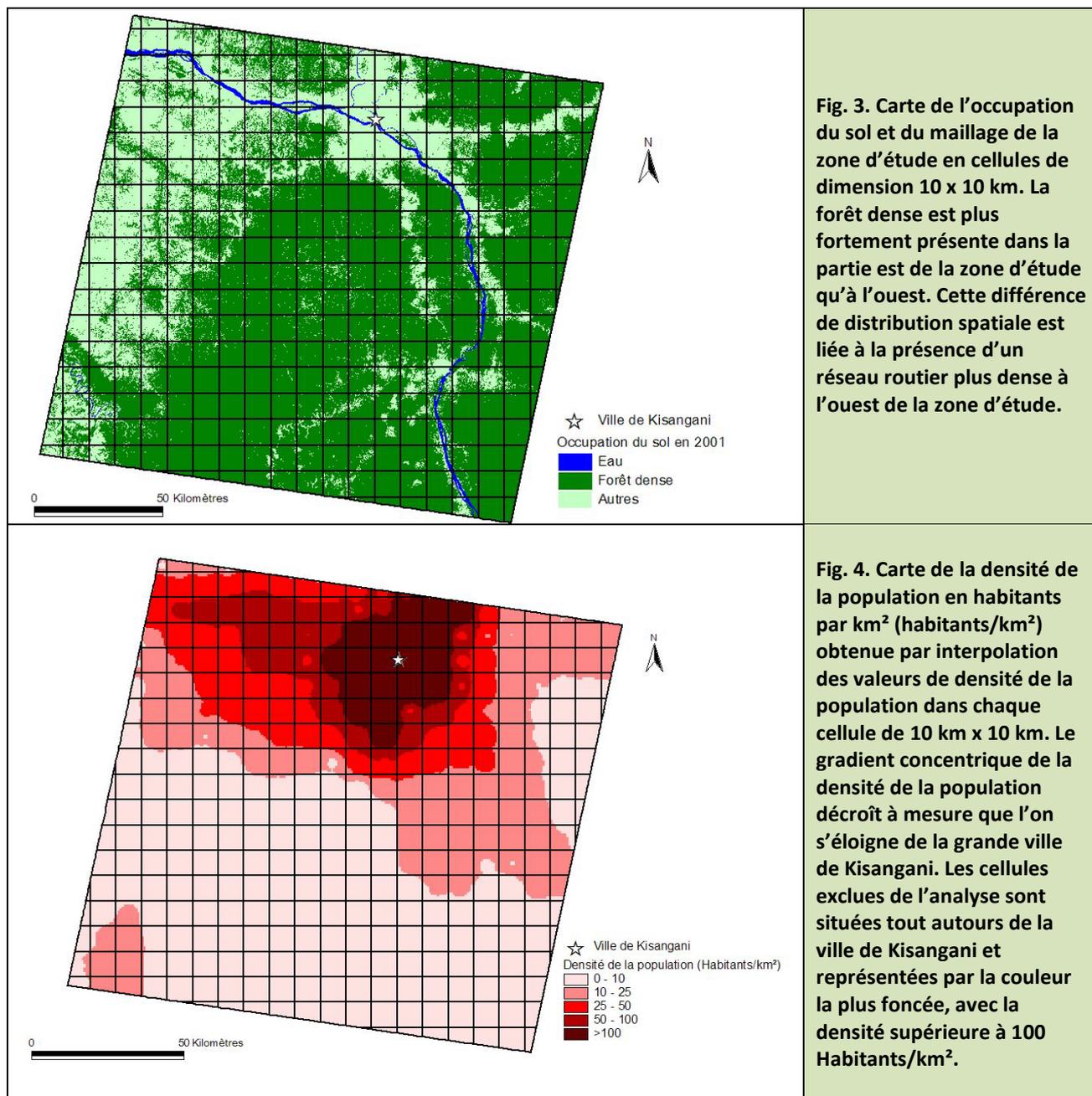
Les valeurs moyennes des indices ont été retenues afin de présenter la tendance générale de l'effet de la densité de la population sur la structure de la classe forêt. Procédant ainsi, c'est l'ensemble des cellules de la grille qui a été pris en considération. En plus, dans la pratique, certaines valeurs de densité de la population avaient des fréquences très élevées tandis que d'autres n'étaient présentes que dans très peu de cellules. La moyenne a donc été utilisée pour donner le même poids aux valeurs de l'indice à partir de nombreuses observations. Ainsi, l'utilisation de la moyenne a permis à

chaque groupe de cellules ayant la même densité de population d'être représenté par une seule valeur de l'indice pris en compte.

Résultats

Cartographie

Les résultats de la classification (Fig.3) montre que la scène d'étude se situe en zone forestière. Il n'existe pratiquement plus de forêt dans la proximité de la ville de Kisangani et dans la partie ouest de la scène.



En effet, plus des deux tiers du paysage (68%) est occupé par cette classe forêt (Table 1). La forêt est plus dominante dans la partie est de la zone d'étude qu'à l'ouest où on note la présence d'un réseau routier plus ou moins dense (Fig. 1).

La répartition de la densité de la population dans la scène (Fig. 4) montre que les plus grandes valeurs de la densité de la population sont surtout observées autour de la ville de Kisangani avec plus de 100 habitants au km².

Table 1: Proportion des classes d'occupation du sol dans le paysage complet de la scène. La forêt dense reste encore dominante dans le paysage.

Occupation du sol	Surface (km ²)	Proportion (%)
Eau	537.33	1.57
Forêt dense	23255.89	67.95
Autres	10431.78	30.48

Effet de la densité de la population sur la structure spatiale de la forêt

Les variations des indices de structure spatiale de la forêt en fonction de la densité de la population sont illustrées par des courbes de tendance (Fig. 5). En fonction de la qualité de l'ajustement donnée par la valeur du coefficient de détermination R², trois modèles de régression ont été retenus: le modèle linéaire (Dimension fractale, aire totale), modèle parabolique (nombre de taches) et le modèle polynomial (Dominance). Toutes les relations de cette figure sont hautement significatives ($p < 0.01$).

Nombre de taches des classes

La figure 5A montre l'existence d'une relation de type parabolique entre le nombre de taches dans les grilles et la densité de la population. Le coefficient de détermination ($R^2 = 0.50$) indique que la densité de la population explique 50% des variations du nombre de taches dans le paysage. La courbe parabolique de la régression illustre une augmentation du nombre de taches de forêt à mesure que la valeur de la densité croît et cela jusqu'à un certain seuil (environ 60 habitants/km²). Au-delà de cette valeur, le nombre de taches commence à diminuer.

Aire totale occupée dans les paysages

La figure 5B montre que les proportions occupées dans le paysage par la forêt dense évoluent suivant une corrélation linéaire négative avec la densité de la population. En effet, plus la densité de la population est élevée, plus l'aire occupée par la forêt dense dans le paysage diminue. Cette régression est exprimée par un coefficient de détermination de plus de 0.53 démontrant que densité de la population explique à plus de 53%, la variation de l'aire occupée par la classe forêt dans le paysage.

Dominance de la plus grande tache

La dominance de la plus grande tache et la densité de la population sont inversement liées suivant une régression polynomiale d'ordre 3 (Fig. 5C). Ce modèle a présenté le coefficient de détermination le plus élevé ($R^2=0.76$) contrairement à un modèle linéaire ou polynomial. Trois groupes de valeurs de la dominance en fonction de la densité de la population peuvent être décelés. Pour une densité de la population inférieure à 30 habitants au km² (Fig. 5Ca), les valeurs de dominances sont concentrées entre 70% et 100%, avec une valeur moyenne de la dominance dans cette classe qui est de 86.2 ± 15.12 . Entre 30 et 60 habitants au km² (Fig. 5Cb), les valeurs sont dispatchées entre 75% et 5% pour une moyenne de $36.43\% \pm 26.65$. Enfin, au delà de 60 habitants au km² (Fig. 5Cc), elles

restent plus ou moins constantes autour de la dominance moyenne de $7\% \pm 6.05$. Aux faibles densités de la population, la classe forestière reste donc dominante dans le paysage. Plus les valeurs de la densité sont élevées, plus cette dominance diminue jusqu'à se stabiliser à une très faible valeur. Lorsque la densité de la population continue de s'accroître, la grande amplitude observée entre les tailles des grandes taches et les autres taches diminue, occasionnant plus d'équitabilité entre les taches dans le paysage.

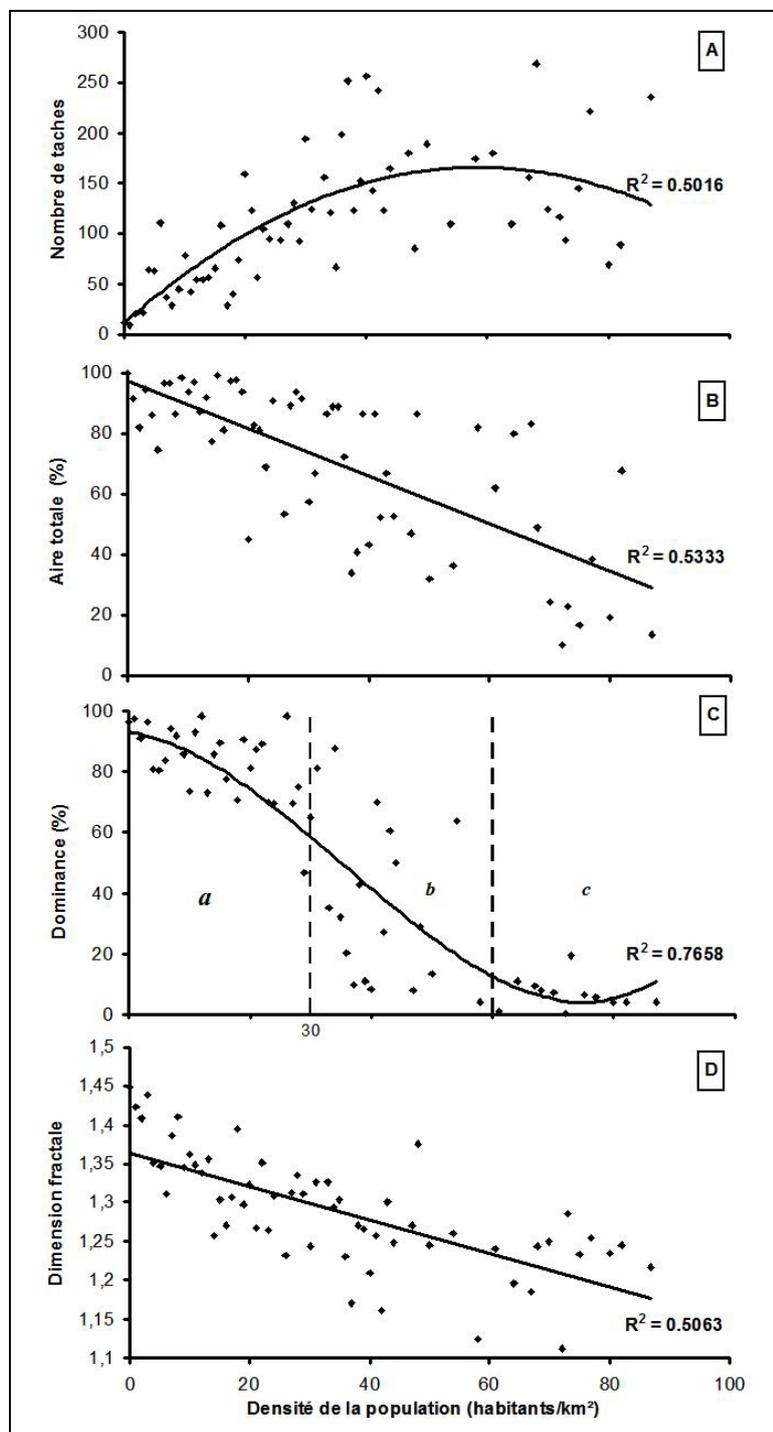


Fig. 5. Relations entre la densité de la population et les indices de structure spatiale

Dimension fractale

Les valeurs de la Dimension fractale de la classe forestière dans les cellules sont comprises entre 1.5 et 1.1 (Fig. 5D). Les valeurs les plus élevées de cet indice correspondent à des densités de population faibles. Ces deux variables sont inversement corrélées avec un coefficient de détermination $R^2=0.51$. Plus la densité de la population atteint des valeurs élevées, plus faible devient la valeur de la dimension fractale ; l'effet de l'anthropisation du paysage devient alors plus manifeste. Les grandes taches forestières avec une valeur de dimension fractale plus élevée due à leurs formes naturelles plus complexes sont remplacées par de petites taches aux formes de plus en plus régulières et donc à valeur de Dimension fractale plus faible.

Le calcul des corrélations linéaires entre ces indices pris deux à deux a révélé que tous les quatre indices sont corrélés entre eux. Ces corrélations hautement significatives ($p < 0.01$) ont des coefficients de détermination (R^2) supérieurs à 0.31. Le nombre de taches est inversement corrélé aux autres indices que sont l'aire totale de la classe, la dominance de la plus grande tache et aussi la dimension fractale de la classe.

Discussion

Approche méthodologique

La présente étude a permis de montrer l'influence de la densité de la population sur la structure paysagère en zone forestière congolaise. Pour mieux comprendre les processus de changement de la couverture végétale, nous avons considéré la densité de population comme le principal facteur potentiellement responsable de ce changement. Le choix de la densité de la population n'est pas fortuit. En effet, il est admis que l'augmentation ou la diminution de la densité de la population dans une zone donnée a un impact sur l'environnement immédiat [24]. D'autres études sur les facteurs influençant la vulnérabilité des forêts du bassin du Congo ont également identifié la densité de la population comme une variable importante à considérer [25].

Le choix d'un système de maillage dans de telles études n'est pas nouveau. Les cellules permettent de subdiviser la zone en plusieurs échantillons afin de générer une base de données de proximité qui relate au mieux les informations sur la zone d'étude. Cette approche de maillage avec des cellules de dimension 10 km x 10 km a aussi été utilisée par Laporte [26] pour créer une carte nationale de déforestation en R. D. Congo par le calcul de la probabilité de déboisement. Mais cette méthode est limitée par la forte proportion d'autocorrélation spatiale qui pourrait exister entre les cellules voisines. En effet, dans cette étude, une même contrée de superficie supérieure à 100 km² a été subdivisée en plusieurs cellules avec des densités de population identiques. Il est alors évident que la valeur de la densité dans une cellule quelconque puisse exercer une influence sur les autres cellules proches ou même à quelque distance à cause de l'autocorrélation spatiale [27, 28, 29]. C'est aussi pour atténuer cet effet d'autocorrélation spatiale entre les cellules que la moyenne des indices a été attribuée à chaque valeur de densité de population entre 0 et 100 habitants par km².

Choix de la zone d'étude

Située dans la proximité du bassin du Congo, la zone d'étude est soumise à la pression exercée par la population en croissance permanente sur la ressource forestière [7]. La proximité de Kisangani, troisième ville économique de la R D Congo, à travers son pouvoir attractif de grand centre urbain, influence cette densité. L'impact de l'homme sur les paysages devient alors détectable [30]. En effet, la dégradation forestière est surtout remarquable le long des grandes voies de communication (fleuves, routes, pistes) ainsi qu'autour des agglomérations [31, 32]. Dans le cas de cette étude, les plus faibles proportions de forêt dense sont localisées autour de Kisangani ainsi que dans la partie ouest de la zone d'étude (Fig. 3). Cette partie (ouest) dispose d'un réseau routier, constitué de routes non asphaltées et de pistes reliées directement ou indirectement aux villes de Yangambi et

de Kisangani (Fig. 1). En outre, la figure 3 indique clairement que les plus fortes densités de la population sont observées dans cette même partie, surtout autour de la ville de Kisangani, pôle économique de la province. Dans la zone d'étude, la pression démographique s'exerce à partir d'un noyau qu'est la métropole de Kisangani. On assiste au modèle de dynamique paysager défini par Forman [33] comme le modèle nucléaire avec pour centre de pression, la ville de Kisangani. Suite à la croissance démographique et aux faibles possibilités de diversification économique, la population exerce des activités diverses indispensables à sa subsistance et cela, au détriment des ressources environnantes dont la forêt. En effet, les forêts sont converties progressivement en terres agricoles, en plantations, en routes ou alors modifiées par l'exploitation du bois d'œuvre, du bois de chauffe, du charbon de bois, par l'agriculture itinérante sur brûlis et/ou d'autres activités d'extraction [34]. La pression démographique croissante exercée sur les ressources naturelles, en bouleversant l'équilibre délicat entre les méthodes de production traditionnelles et les ressources naturelles disponibles cause de la dégradation du couvert forestier [26, 32, 35].

Choix des indices de structures spatiales

De nombreux indices ont été proposés pour quantifier et mesurer la structure paysagère (e.g., FRAGSTATS, [36, 37]). Dans la présente étude, nous avons utilisé des indices découlant directement de la définition de la fragmentation. En écologie du paysage en particulier et en écologie de façon générale, la fragmentation forestière est devenue un thème de recherche très important pour la conservation [38]. En effet, la fragmentation entraîne une réduction de l'aire totale et une augmentation du nombre de taches [15]. Ce sont donc ces variables que nous avons mesurées et analysées. En plus, la dominance de la plus grande tache de la classe a été prise en compte car la fragmentation suppose le morcellement et donc la diminution de la taille des taches vers de petites taches de tailles similaires. Et pour montrer l'effet anthropique, la dimension fractale a été utilisée. Avec l'intervention de l'Homme, les formes des taches deviennent plus régulières et cela est quantifié par des valeurs de la dimension fractale plus faibles. L'existence de corrélation entre ces indices, même si elle indique une redondance de l'information [16], constitue un argument pour mettre en évidence le fait que les observations ne sont pas dues au hasard. En effet, la fragmentation est un processus bien précis qui implique plusieurs paramètres et variables à considérer ensemble. Pendant que le nombre de taches augmente, les grandes taches sont morcelées, réduisant l'aire totale de la classe. Le tout est occasionné par l'influence anthropique illustrée par la diminution des valeurs de la dimension fractale. Ce sont donc ces paramètres qui s'accompagnent pour aboutir à la fragmentation comme résultat.

Effet de la densité de la population et la structure paysagère

Cette étude a montré que la densité de la population a une influence sur la structure du paysage forestier. En effet, la variation de la densité de la population entraîne aussi une variation des indices de structures spatiales. Aux valeurs de plus en plus élevées de la densité de la population sont associées, l'accroissement du nombre de taches, la réduction de l'aire totale, la diminution de la dominance au niveau des taches et la réduction de la dimension fractale (Fig. 5). La fragmentation est aussi caractérisée par le même sens de variation de ces quatre indices. Concernant le nombre de taches dans la classe forestière, il augmente jusqu'à une valeur seuil de la densité de la population avant de diminuer. Cela indique pour cette classe, qu'il y a d'abord le morcellement des taches existantes puis l'amorce de la réduction de la surface des taches de la classe jusqu'à leur disparition progressive. Ce constat est confirmé par la diminution de l'aire totale de la classe. La courbe de tendance de la dominance, bien que décroissante avec les valeurs élevées de la densité de la population présente deux paliers (Fig. 5Ca et c). Cela peut s'expliquer par le fait qu'à faible densité, l'influence de la population n'est pas significative sur les grandes taches qui de ce fait continuent d'être dominantes dans le paysage. Mais lorsque la densité devient plus forte, ces taches deviennent des cibles privilégiées [39]. Leurs tailles diminuent jusqu'à l'obtention d'un certain équilibre en taille

entre toutes les taches, matérialisé par le deuxième palier observé dans la Fig. 5Cc. La dimension fractale tendant vers la valeur 1 montre bien une influence anthropique manifeste sur la classe forestière à mesure que la densité de la population prend de grandes valeurs. Il a été montré par O'Neill [40] que, plus la pression humaine sur la forêt est forte, plus faibles seront les valeurs de la dimension fractale. En effet, les taches de forêts avec des formes initialement complexes, sont remplacées par d'autres de formes plus régulières illustrant l'effet anthropique.

L'existence de seuils de densité impliquant des changements de la structure spatiale du paysage est une information intéressante dans cette étude. Aussi bien pour le nombre de taches (n) que la dominance de la plus grande tache ($D(a)$), le maximum de leur relation avec la densité de la population dans la zone d'étude est atteint pour 60 habitants par km² (Fig. 5A et Fig. 5C). Ces deux indices (n et $D(a)$) apportent une information complémentaire dans les relations entre la densité de la population et la structure spatiale. Avec le coefficient de détermination le plus élevé ($R^2=0.76$), la dominance de la plus grande tache pourrait être considérée comme l'indice qui exprime au mieux le phénomène de la fragmentation dans cette région. En effet, la fragmentation est caractérisée par le morcellement des grandes taches initiales dominantes occasionnant l'apparition de petites taches aux tailles plus ou moins similaires dans le paysage.

Les résultats obtenus à partir de la variation de ces indices en fonction de la densité de la population montrent qu'il existe dans la zone d'étude, une relation significative entre la densité de la population et les indices de structures spatiales utilisés aussi pour quantifier la fragmentation. Ces relations indiquent que la densité de la population, en modifiant la structure du paysage de cette zone, favorise le processus de fragmentation de la forêt et cela se fait via les activités humaines. Ces résultats rejoignent ceux de August [32] qui a montré qu'à mesure que la population augmente, les besoins en alimentation, en espace, en production de bois d'exportation ou de chauffage augmentent [32], engendrant une incidence directe sur le paysage forestier. Ce constat confirme notre hypothèse et rejoint les conclusions de Williams [3] et Bogaert [7] selon laquelle la densité de la population favorise la dégradation et la diminution de la superficie forestière en zone tropicale.

Implication pour la conservation

Cette étude a été réalisée dans la province orientale de la République Démocratique du Congo. La zone d'étude est située dans le bassin du Congo, en forêt équatoriale et dans la proximité de la ville de Kisangani, troisième ville économique du pays. Elle nous a permis grâce aux indices utilisés pour caractériser la fragmentation, de montrer qu'il existe une relation significative entre la densité de la population la fragmentation forestière. En effet, l'influence de la densité de la population sur la structure spatiale de ce paysage a été mise en évidence par le fait qu'aux valeurs croissantes de densités de la population sont associées un accroissement du nombre de taches, le fractionnement des grandes taches, la réduction de la proportion occupée par la classe forestière dans le paysage. L'impact anthropique est également illustré par des valeurs de la Dimension fractale avoisinant 1, indiquant que les formes des taches constituant la classe forêt deviennent de moins en moins complexes. A l'instar de la province orientale de la R.D Congo, la population de la zone d'étude est essentiellement rurale [5]. Pour assurer sa subsistance et faire face aux besoins en alimentation et en bois de chauffe des villes en expansion démographique, cette population exerce de fortes pressions sur les ressources forestières. Cette étude remet en selle l'épineuse problématique de gestion des ressources naturelles face à l'expansion démographique. Cette gestion ne peut être durable qu'à condition de prendre en compte dans les programmes de développement, l'amélioration du niveau de vie et de revenu de la population rurale [41].

La zone d'étude se situe dans la grande forêt équatoriale de la partie congolaise du bassin du Congo qui, en outre, constitue après l'Amazonie, le deuxième plus grand massif forestier au monde.

Cependant, à l'instar de la plupart de forêts d'Afrique tropicale, les forêts du bassin du Congo sont en train de subir des processus de dégradation ou de déforestation plus ou moins sévères [4] entraînant des impacts notables sur les écosystèmes et les modes de vie des populations locales. Il y a certes, de plus en plus un consensus en ce qui concerne la nécessité d'assurer la conservation de ces forêts, mais celle-ci dépend en premier lieu de l'analyse précise et approfondie des causes qui sont à la base de ces processus de dégradation et/ou de déforestation.

La présente étude montre qu'il existe une relation très significative entre la densité de la population et la fragmentation forestière. Bien que cette relation ne veuille pas forcément dire que la densité de la population soit la seule cause de la fragmentation des forêts tropicales, elle permet de retenir cette variable (densité de la population) comme un paramètre à considérer dans l'étude de la fragmentation forestière. Selon le PNUD [42], entre 1984 et 2005, la population de la province orientale essentiellement agricole a augmenté de 51%. Dans la ville de Kisangani, pour la même période, le nombre d'habitants a plus que doublé. La situation socio-économique révèle une paupérisation croissante de cette population suite à la destruction du tissu économique et la réduction de la main-d'œuvre subséquente à la fermeture ou à la délocalisation des quelques industries locales du fait de l'instabilité liée aux guerres et pillages. Ainsi, elle n'a trouvé comme palliatif logique, que de s'adonner à l'agriculture et principalement l'agriculture itinérante sur brûlis (Fig. 2).

Cette technique ancestrale est fortement consommatrice de terre et est tributaire de la forêt entraînant son anthropisation. La conséquence de cette anthropisation du paysage est la diminution de la proportion de l'habitat forestier environnant. Ces modifications agissent aussi sur l'humanité toute entière car la perte de la forêt réduit son pouvoir de séquestration du carbone et favorise ainsi le réchauffement climatique global et perte de biodiversité [6]. En effet, la densité de la population entraîne indirectement via les activités humaines, la modification de la configuration du paysage forestier, facilitant ainsi différents processus de transformation spatiale de ce paysage. Ces processus aboutissent à la dégradation et la réduction du couvert forestier. Cette analyse est donc un argument supplémentaire qui permettra aux décideurs d'aborder la conservation des forêts du bassin du Congo à travers des mesures appropriées et durables qui tiennent compte de l'amélioration du niveau de vie et de revenu de la population rurale.

Remerciements

Les auteurs remercient le Gouvernement de Côte d'Ivoire pour les bourses doctorales octroyées à I. Bamba et S. Barima et le programme Glovis pour la mise à disposition gratuite de l'image satellite.

Références bibliographiques

- [1] Henle, K., Lindenmayer, D. B., Margules, C. R., Saundres, D. A. and Wissel, C. 2004. Species survival in fragmented landscapes: Where are we now? *Biodiversity and Conservation* 13:1-8.
- [2] Pereboom, V. 2006. *Mode d'utilisation du milieu fragmenté par une espèce forestière aux habitudes discrètes, la martre des Pins Martes martes*. Thèse de Doctorat, Spécialité : Biologie des organismes ; Université d'Angers, France.
- [3] Williams, M. 2000. Dark ages and dark areas: global deforestation in the deep past. *Journal of Historical Geography* 26(1): 28-46.
- [4] Mayaux, P., Gond, V., Massart, M., Pain-Ordet, M. and Achard, F. 2003. Évolution du couvert forestier du bassin du Congo mesurée par télédétection spatiale. *Bois et Forêts des Tropiques*, 277(3): 45-52.
- [5] Nshimba, S. W. M. 2008. *Etude floristique, écologique et phytosociologique des forêts de l'île Mbiyé à Kisangani, R. D. Congo*. Thèse de doctorat, Faculté Sciences Université libre de Bruxelles, Belgique.

- [6] P.F.B.C. 2006. *Les forêts du bassin du Congo : état des forêts 2006*. Le Partenariat pour les Forêts du Bassin du Congo. <http://www.cbfp.org/>.
- [7] Bogaert, J., Bamba, I., Kabulu, J. P., Koffi, K. J., De Cannière, C., Visser, M. and Sibomana, S. 2008. Fragmentation of Forest Landscapes in central Africa : causes, consequences and management. In: *Patterns and Processes in Forest Landscapes: Multiple Use and Sustainable Management*. Laforteza, R., Chen, J., Sanesi, G., Crow, Th. R. (Eds.), pp. 67-87. Springer, Verlag, New York.
- [8] Geist, H. J. and Lambin, E. F. 2001. *What Drives Tropical Deforestation? A Meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on sub-national case study evidence*. LUCC, Report serie N°4, Louvain-la-Neuve. Belgium.
- [9] Hecht, S. B. 1985. Environment, development, and politics: capital accumulation and the livestock sector in Amazonia. *World Development* 13 (6): 663-684.
- [10] Bartholomé, E., Belward, A. S., Achard, F., Bartalev, S., Carmona-Moreno, C., Eva, H., Fritz, S., Grégoire, J.-M., Mayaux, P. and Stibig, H.-J. 2002. *GLC 2000: Global Land Cover mapping for the year 2000*. EUR 20524 EN, European Commission, Luxembourg.
- [11] Laghmouth, M. and Hardy, B. 2008. *Carte de l'occupation du sol de la République Démocratique du Congo*. Musée Royal de l'Afrique centrale, Tervuren, Belgique.
- [12] Sader, S. A., Server, T., Smoot, J. C. and Richards, M. 1994. Forest change estimates for the northern Petén region of Guatemala-1986-1990. *Human Ecology* 22 (3): 317-332.
- [13] UNEP. 2004. *Africa Population Distribution Database*. UNEP/GRID Sioux Falls Dataset, SD, USA. <http://na.unep.net/datasets/datalist.php>
- [14] Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailles, J., Hilal, M. and Wavreski, P. 2008. Interpolation par recherche d'information locale, *Climatologie* 5 : 27- 48.
- [15] Davidson, C. 1998. Issues in measuring landscape fragmentation. *Wildlife Society Bulletin* 26: 32-37.
- [16] Bogaert, J. 2003. Lack of agreement on fragmentation metrics blurs correspondence between fragmentation experiments and predicted effects. *Conservation Ecology* 7(1) www.consecol.org/vol7/iss1/
- [17] McGarigal, K. and Marks, B. J. 1995. *Fragstats: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Structure*. Department of Agriculture, Pacific Northwest Research Station General Technical Report PNW-GTR-351. Oregon, USA. ([http:// www.fs.fed.us/pnw/pubs/gtr_351.pdf](http://www.fs.fed.us/pnw/pubs/gtr_351.pdf))
- [18] Krummel, J. R., Gardner, R. H., Sugihara, G., O'Neill, R. V. and Coleman, P. R., 1987. Landscape pattern in a disturbed environment. *Oikos* 48: 321-324.
- [19] Mandelbrot, B. B. 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. W.H.Freeman and Company, New York.
- [20] Halley, J. M., Hartley, S., Kallimanis, A. S., Kunin, W. E., Lennon, J. J. and Sgardelis, S. P. 2004. Uses and abuses of fractal methodology in ecology. *Ecology Letters* 7: 254-271.
- [21] Imre, A. R. 2006. Artificial fractal dimension obtained by using perimeter area relationship on digitalized images. *Applied Mathematics and Computation* 173: 443-449.
- [22] Imre, A. R. and Bogaert, J. 2004. The fractal dimension as a measure of the quality of habitats. *Acta Biotheoretica* 52: 41-56.
- [23] Rambaud, F. 2007. *Caractérisation, analyse et modélisation statistiques de fragments osseux crâniens pour la prédiction de paramètres mécaniques lésionnels*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis. France.
- [24] Lambin, E. F., Turner II, B. L., Geist, H., Agbola, S., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P. S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E. F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P. S., Richards, J. F., Skånes, H., Steffen, W., Stone, G. D., Svedin, U., Veldkamp, T., Vogel, C. and Xu, J. 2001. The Causes of Land-Use and -Cover Change : Moving beyond the Myths. *Global Environmental Change* 11: 261-269.

- [25] Zhang, Q., Justice, C. O., Jiang, M., Brunner, J. and Wilkie, D. 2006. A GIS-based assessment on the vulnerability and future extent of the tropical forests of the Congo Basin. *Environmental Monitoring and assessment* 114: 107-121.
- [26] Laporte, N., Merry, F., Baccini, A., Goetz, S., Stabach, J. and Bowman, M. 2007. *Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD): Reducing CO₂ Emissions from Deforestation and Degradation in the Democratic Republic of Congo - A First Look*. A Report for the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) Conference of the Parties (COP), Thirteenth Session, 3-14 December 2007, Bali, Indonesia. Woods Hole Research Center, Falmouth, MA. <http://whrc.org/policy/BaliReports/index.htm>
- [27] Élie, D. and Legendre, P. 1992. Autocorrélation spatiale et déplacement de la criminalité. *Criminologie* 25 (2): 139-154.
- [28] McIntire, E. J. B. and Fajardo, A. 2009. Beyond description: the active and effective way to infer processes from spatial patterns. *Ecology* 90 (1): 46-56.
- [29] Barima, Y. S. S. 2009. Dynamique, fragmentation et diversité végétale des paysages forestiers en milieux de transition forêt-savane dans le Département de Tanda (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Faculté Sciences Université libre de Bruxelles, Belgique.
- [30] Shapiro, D. 1995. Population growth, changing agricultural practices, and environmental degradation in Zaire. *Population and Environment* 16 (3): 221-236.
- [31] FAO, 2004. *Développement des Forêts dans les pays du Bassin du Congo. Stratégie d'action de la FAO*. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- [32] August, P., Iverson, L. and Nugranad, J. 2002. Human Conversion of Terrestrial Habitats. In *Applying landscape ecology in biological conservation*. Gutzwiller, K. J. (Eds.), pp. 198-224. Springer, Verlag, New York.
- [33] Forman, R. T. T. 1995. *Land Mosaics: the ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [34] Clark, L. E. and Sunderland, T. C. H. 1999. A Regional Market Survey of the Non-Wood Forest Products traded in Central Africa. In: *Non-Wood Forest Products of Central Africa: current research issues and prospects for conservation and development*. FAO, (eds), pp. 207-210. CARPE-USAID-FAO.
- [35] Bamba, I., Mama, A., Neuba, D. F. R., Koffi, K. J., Traore, D., Visser, M., Sinsin, B., Lejoly, J. and Bogaert, J. 2008. Influence des actions anthropiques sur la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la province du Congo central (R.D. Congo). *Sciences et Nature*, 5(1): 49-60.
- [36] Forman, R. T. T. and Godron, M. 1986. *Landscape ecology*. John Wiley & sons, New York, USA.
- [37] Burel, F. and Baudry, J. 2003. *Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*. Tec & Doc. Paris, France.
- [38] Haila, Y. 2002. A conceptual genealogy of fragmentation research: from island biogeography to landscape ecology. *Ecological Applications* 12:321-334.
- [39] Wickham, J. D., Jones K. B., Riitters, K. H., Wade, T. G. and O'Neill, R. V. 1999. Transitions in forest fragmentation: implications for restoration opportunities at regional scales. *Landscape Ecology* 14: 137-145.
- [40] O'Neill, R. V., Milne, B. T., Turner, M. G. and Gardner, R. H. 1988. Resource utilization scales and landscape pattern. *Landscape Ecology* 2: 63-69.
- [41] BAD. 2002. *Rapport sur le Développement en Afrique 2002*. La Banque Africaine de Développement, Abidjan, Côte d'Ivoire.
- [42] PNUD. 2009. *Province Orientale, profil, résumé, pauvreté et conditions de vie des ménages*. Programme des Nations Unis pour le développement RDC, Rapport Mars 2009. RDC, 20 p. Site http://www.undp.org.cd/Downloads/profil/Profil_Province%20Orientale_Final.pdf.