MODÉLISATION DE LA DYNAMIQUE DU PAYSAGE FORESTIER DANS LA RÉGION DE TRANSITION FORÊT-SAVANE À L'EST DE LA CÔTE D'IVOIRE

Yao Sadaiou Sabas BARIMA[1], Mathieu Wadja EGNANKOU[2], Claude Thierry Aké N'DOUMÉ[3], François N'guessan KOUAMÉ[4], Jan BOGAERT[5]

[1]Université Libre de Bruxelles, Service d'Écologie du paysage et Systèmes de production végétale, CP 169, 50, avenue F. D. Roosevelt, 1050 Bruxelles (Belgique). Téléphone : (+32)26504897, Fax : (+32)26502125, Courriel : ybarima@ulb.ac.be
Unité de Recherche et d'Enseignement Supérieur de Daloa, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire.
[2]Université de Cocody-Abidjan, Laboratoire de Botanique. 22 BP 508 Abidjan 22. Téléphone : (+225) 07769202, Courriel : wadjaegnankou@hotmail.com
[3]Bureau National d'Études Techniques et de Développement, Centre de Cartographie et de Télédétection, 01 B.P. 3862 Abidjan 01(Côte d'Ivoire). Téléphone : (+225)22442204, Fax : (+225) 22442886, Courriel : ndoumec@yahoo.fr
[4]Université de Cocody-Abidjan, Laboratoire de Botanique, 31 BP 165 Abidjan 31 (Côte d'Ivoire). Téléphone (+225) 07009566, Courriel : fnkouame@hotmail.com
[5]Université Libre de Bruxelles, Service d'Écologie du paysage et Systèmes de production végétale, CP 169, 50, avenue F. D. Roosevelt, 1050 Bruxelles- Belgique. Téléphone : (+32)26504897, Fax : (+32)26502125, Courriel : jan.bogaert@ulb.ac.be

Soumis le 24 mars 2009 ; accepté le 20 octobre 2010 - © *Revue Télédétection*, 2010, vol. 9, n° 2, p. 129-138

Résumé :

Les pressions anthropiques ont modifié la composition et la structure spatiale du paysage forestier de la zone de transition forêt-savane du département de Tanda en Côte d'Ivoire, et pourraient compromettre leur avenir. Cette étude avait pour objectif de déterminer la dynamique paysagère des forêts de cette région de 1986 à l'horizon 2050, à partir d'une chaîne de Markov de premier ordre. Pour y arriver, la région d'étude a été divisée en deux zones : la zone nord proche des savanes Guinéennes et la zone sud proche des forêts Guinéennes. Une matrice de transition a permis de simuler la composition du paysage jusqu'en 2050. Les résultats ont montré que les superficies forestières progresseraient dans la partie nord de la région alors qu'elles sont réduites au sud au profit des savanes et des exploitations agricoles.

***Mots clés** : transition forêt-savane, matrice de transitions, matrice de probabilités annuelles, simulation de Markov, dynamique paysagère.*

Modelling forest landscape dynamics in a forest-savannah transition region of eastern Ivory Coast.

Abstract

Anthropogenic pressure has modified both the composition and the spatial pattern of the forest landscapes of the forest-savannah transition zone in the Tanda department of Côte d'Ivoire, which constitutes a menace for their future development. The objective of this study was to disentangle the landscape dynamics of the forests of this region between 1986 to 2050 based upon a first order Markov chain model. For this purpose, the study area was divided in two parts: a northern zone bordering the Guinean savannahs and a southern zone closely situated to the Guinean forests. Based on a probability matrix for the class areas the landscape composition up to 2050 was simulated. Results showed that forest areas would increase in the northern zone while they decrease in the southern zone where substitution by savannah vegetations and cultivated lands is observed.

***Keywords**: forest-savannah transition, transition matrix, probability matrix, Markov simulation, landscape dynamics.*

1. INTRODUCTION

De nombreuses régions intertropicales africaines subissent des transformations radicales de plus en plus rapides de leur paysage. Ces changements sont principalement dus aux systèmes agricoles inadaptés, à l'exploitation anarchique des bois tropicaux et à la forte pression démographique et secondairement, au désir d'industrialisation des pays entraînant une augmentation des surfaces anthropisées et une réduction des paysages naturels (Wright, 2005 ; FAO, 2006). Ces

transformations induisent des modifications souvent irréversibles dans le paysage et affectent les zones de transition forêt-savane africaines en générale et ivoiriennes en particulier. Les dynamiques spatiales sont souvent difficilement perceptibles dans ces milieux de transition que dans d'autres milieux du fait de la mixité de la forêt et de la savane et de l'existence d'un écosystème de lisière particulier (Smith et al., 1997 ; Barima et al., 2009). Dans les zones de transition forêt-savane ivoirienne, deux dynamiques sont observées. Dans le centre du pays, une tendance à la densification de la végétation a été observée dans une réserve écologique dont une portion du territoire a été mise sous protection des feux depuis 20 ans (Gautier, 1989). Dans d'autres parties de cette même région, l'embuissonnement des lisières s'est effectué spontanément (Avenard et al., 1974 Dauget et Menaut, 1992) et a même été de plus grande ampleur sur les parcelles mises temporairement en culture (Spichiger et Pamard, 1973 ; Spichiger et Lassailly, 1981). Des études dans le nord de la Côte d' Ivoire ont confirmé ces résultats (Goetze et al., 2006). Par contre des recherches ont relevé une avancée significative des savanes au détriment des forêts dans les zones de contact forêt-savane du centre-ouest (Chatelain, 1996 ; N'guessan et al., 2003) et de l'est de la Côte d'Ivoire (Barima et al., 2009). Au regard de ces résultats contrastés, le débat sur l'afforestation ou au contraire la déforestation des régions de transition est loin d'être terminé. La proximité de ces régions des forêts denses de la moitié sud (qui était une des principales zones de cultures de caféiers et de cacaoyers) ou des savanes de la moitié nord est souvent citée comme étant une des raisons de ces dynamiques (Barima et al., 2009). La description et la compréhension des changements qui s'opèrent dans ces paysages ainsi que la maîtrise de l'évolution de ces transformations devraient faire donc partie des priorités en écologie et en aménagement du territoire afin d'imaginer des solutions qui permettront d'influencer sur les conséquences de cette évolution (Antoni, 2006).

Pour maîtriser l'évolution de ces transformations, on doit s'appuyer sur des outils d'études cinématiques ou prospectifs permettant l'anticipation de l'évolution du risque et parmi ces méthodes, la modélisation apparaît comme un réel outil d'aide à la décision. Parmi les procédés de modélisation, le modèle de Markov a été préféré dans le cadre de cette étude. Suivant ce modèle, il existe un temps T tel que les probabilités de transition au temps t conditionnellement à $t-1$, $t-2$, ... sont égales aux probabilités de transition conditionnellement à $t-1$, $t-2$, ..., $t-T$. Autrement dit, la prédiction du futur connaissant le présent, n'est pas rendue plus précise par des éléments d'information supplémentaires concernant le passé (Berchtold, 1998). Il a l'avantage de fournir une méthode de complexité limitée par laquelle un système dynamique pourrait être détaillé et examiné. En plus de mesurer les changements d'utilisation du territoire qui se sont produits, cette approche permet de faire ressortir les tendances qui étaient non-évidentes dans le jeu de données de départ (Muller and Middleton, 1994).

L'objectif de cette étude est de déterminer, à partir d'une chaîne de Markov de premier ordre, la dynamique spatio-temporelle des forêts et leur tendance évolutive à l'horizon 2050 dans deux parties contiguës d'une région de transition forêt-savane du département de Tanda en Côte d'Ivoire. Cet objectif permettra de vérifier les hypothèses selon lesquelles : (1) les forêts proches des savanes du domaine soudanais ont des taux de déforestation plus importants que les forêts de la partie sud de la région, proches des forêts denses du domaine guinéen ivoirien parce qu'une forêt proche d'une savane a des risques plus élevés d'être secondarisée ; (2) la détermination et la prédiction de la structure et de la composition du paysage permettra de mieux comprendre son fonctionnement et fournira ainsi des données utiles pour la mise en place de politiques de gestion de la zone de transition forêt-savane ivoirienne. De façon spécifique, il s'agira de déterminer la structure et la composition du paysage de deux zones contiguës dans une région de transition forêt savane, de quantifier les changements annuels intervenus dans les classes d'occupation du sol et de prédire l'avenir des forêts de cette région.

2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

Localisé à l'est de la Côte d'Ivoire, le milieu d'étude est situé plus exactement dans la zone formée par le quadrilatère de coordonnées (UTM 30 N) suivantes : x (449 718 ; 517 719) ; y (831 806 ; 891 817). Il se trouve dans la partie septentrionale du domaine Guinéen de la Côte d'Ivoire. La végétation est constituée d'une forêt dense semi-décidue soumise à un climat tropical sub-humide, appartenant au secteur mésophile (Guillaumet et Adjanohoun, 1971). La végétation climacique est la forêt dense humide semi-décidue. Le relief présente un gradient altitudinal qui passe progressivement de 200 m dans le sud-ouest à 700 m dans le nord-est de la région (Avenard, 1971). La végétation, à l'instar de celle de toute la Côte d'Ivoire forestière, a subi d'importantes modifications dans sa structure et sa composition du fait des actions anthropiques principalement et secondairement de l'instabilité climatique croissante (Brou et al, 2005). Dans le cadre de cette étude, la région a été divisée en deux parties égales afin de faire ressortir les particularités de chacune d'elle. En effet, vouloir étudier l'ensemble de la région en un seul tenant pourrait entrainer des biais dans l'extrapolation des résultats. La zone septentrionale de la région (zone nord) est plus en contact avec les savanes Guinéennes quand la zone méridionale (zone sud) est proche des régions forestières du domaine Guinéen ivoirien. Sur base d'observations visuelles, ces deux zones semblent avoir des évolutions différentes quant à leur occupation du sol en 1986 et en 2002 (figure 1). Les analyses qui seront réalisées seront par conséquent effectuées sur chacune de ces régions afin de vérifier ces observations.

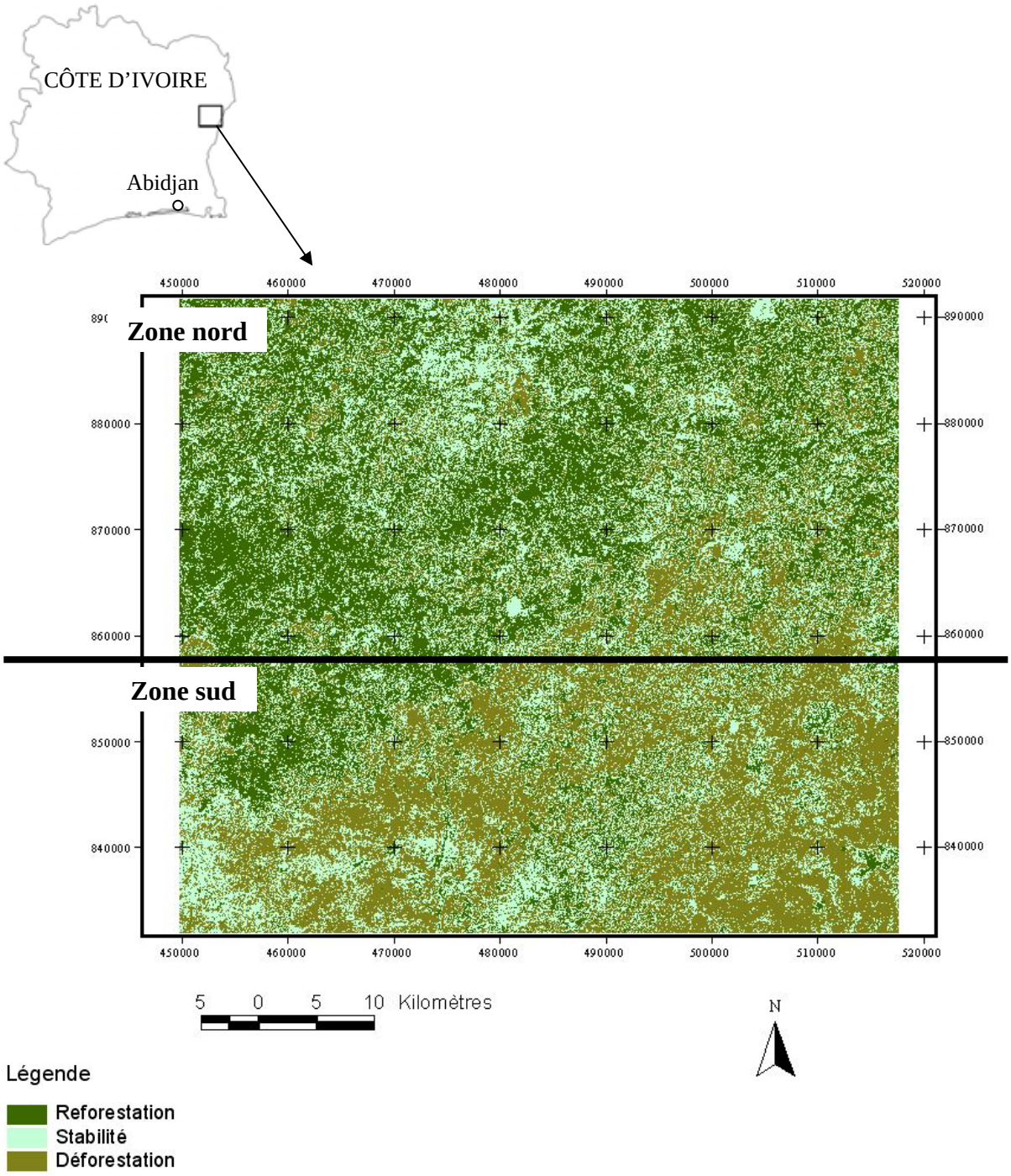


Figure 1 : Situation de la zone d'étude et dynamique de l'occupation du sol de 1986 à 2002.
Situation of the study area and its land cover dynamics between 1986 and 2002.

3. MÉTHODES

3.1. Caractéristiques et traitement des images satellitaires.

Les classes d'occupation du sol retenues dans cette étude ont été obtenues suite à une classification supervisée de deux images satellites : TM de Landsat datant du 02 février 1986 (TM Landsat 1986) et ETM+ de Landsat du 26 décembre 2002 (ETM+ Landsat 2002). Ces images ont été prises pendant la saison sèche et reflètent ainsi les valeurs minimales de la biomasse. L'orthorectification de l'image ETM+ Landsat 2002 a été réalisée avec les coordonnées géographiques de points invariants. L'image TM Landsat 1986 a ensuite été orthorectifiée en référence à l'image ETM+ Landsat 2002. La précision géométrique du décalage entre les deux scènes était finalement inférieure à 1 pixel, le minimum requis pour une analyse des changements (Mas, 2000). La correction radiométrique a été faite à travers des méthodes de régression linéaire basées sur des invariants radiométriques (Song et al., 2001). Seize classes ont tout d'abord été créées suite à une classification automatique (Bonn et Rochon, 1992) de l'image ETM+ Landsat 2002. Ce nombre de classes

relativement élevé offrait la possibilité de fusionner ultérieurement des classes similaires radiométriquement. Le regroupement des classes a été fait sur base d'une carte d'occupation du sol obtenue après classification et validation sur le terrain d'une image ETM+ de Landsat datant de février 2000 (Barima et al., 2009). Les caractéristiques spectrales des classes d'occupation du sol obtenues suite à la classification finale de l'image ETM+ Landsat 2002 ont été utilisées comme base pour une classification supervisée par maximum de vraisemblance de l'image TM Landsat 1986. Le traitement des images satellites a été réalisé à partir des logiciels ENVI 4.2 (RSI, 2002) et ArcGis 9.2 (ESRI 2006). Un coefficient de kappa ($\hat{K}$) a été calculé pour estimer l'exactitude de la classification. Ce coefficient mesure l'intensité de la concordance réelle entre deux jugements catégoriels appariés. Il est proche de 0 lorsque la concordance est peu significatif et de 1 lorsque la concordance est très forte (Girad et Girard, 1999). Les dénominations des classes ont suivi la classification de Yangambi (Trochain, 1957).

3.2. Composition du paysage

Pour déterminer les affectations de l'occupation du sol en termes de fréquences, l'aire (A) de chaque classe du paysage ont été déterminés à partir du logiciel FRAGSTATS (McGarigal et al., 2001). Leur proportion a été calculée pour chaque date et pour chacune des classes de paysage. Rappelons que l'aire et le nombre de taches sont parmi les éléments principaux de la configuration paysagère (Giles and Trani, 1999 ; Bogaert et Mahamane, 2005).

3.3. Matrice de transition – matrice de probabilité

Le paysage a été considéré comme un ensemble de pixels dont chacun peut être classé dans une classe de paysage. Chacun des pixels peut changer d'état pendant la période étudiée (1986-2002) suivant des règles précises de transition. La matrice de transition permet de décrire de manière condensée, les changements d'état des pixels pendant une période donnée (Schlaepfer, 2002). Elle a servi à construire une matrice de probabilités (Mp_A) qui contient les transitions observées (Urban and Wallin, 2002). Les taux des superficies des classes du paysage en 1986 ont été transcrits en un vecteur notée $M_A(t)$. En considérant l'occupation du sol comme un processus stochastique (Moore, 1990), et les différents changements comme des états de cette chaîne (Stewart, 1994 ; Weng, 2002), le produit de la matrice Mp_A et du vecteur $M_A(t)$, a servi à construire un modèle de simulation de la superficie des classes du paysage à une date $t+1$, notée $M_A(t+1)$, à partir d'une chaîne de Markov suivant l'équation ci après:

$$M_A(t) \times Mp_A = M_A(t+1) \qquad (1)$$

Soit :

$$\begin{bmatrix} A_1(t) \\ \cdots \\ A_k(t) \\ \cdots \\ A_m(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_{1,1} & \cdots & A_{1,k} & \cdots & A_{1,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{k,1} & \cdots & A_{k,k} & \cdots & A_{k,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{m,1} & \cdots & A_{m,k} & \cdots & A_{m,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(t+1) \\ \cdots \\ A_k(t+1) \\ \cdots \\ A_m(t+1) \end{bmatrix} \qquad (2)$$

Où $A_i(t)$ représente la proportion de l'aire appartenant à la classe i au temps t, $A_{i,j}$ est la probabilité pour qu'un point appartenant à la classe i au temps t soit convertie dans la classe j au temps $t+1$ et m représente le nombre total de classe.

3.4. Validation du modèle

Pour vérifier la fiabilité de la modélisation effectuée, les proportions d'aires attendues sous la chaîne de Markov en 2000 ont été comparées aux valeurs observées à cette date par Barima et al. (2009) à partir d'un test d'ajustement de Chi-deux (χ^2) à $m-1$ degrés de liberté, au seuil de confiance de $\alpha = 5\ \%$.

4. RÉSULTATS

4.1. Classification des images

La classification des images Landsat a permis d'obtenir deux cartes d'occupation du sol avec chacune 4 classes. Il s'agit d'une classe « forêt dense », d'une classe « forêt claire », d'un complexe « savane-exploitation agricole » (qui renferme la savane herbeuse, la savane boisée, les jachères herbeuses et les exploitations agricoles), et d'une classe « sol nu-habitat ». La précision de la classification de l'image ETM+ Landsat 2002 est $\hat{K} = 85\ \%$. D'après Pontius (2000), une étude de l'occupation du sol peut être validée si $\hat{K} > 50\ \%$ suivant les cas.

4.2. Composition du paysage

Les proportions des classes d'occupation du sol en 1986 et en 2002, pour chacune des zones d'étude sont représentées à la figure 2. Dans la zone nord, la forêt dense est la classe dominante du paysage en 2002 alors que le complexe savane-exploitation agricole était majoritaire en 1986. Au sud, le complexe savane-exploitation agricole se substitue aux classes forestières et domine nettement le paysage avec un taux de 53,65 % alors que cette zone était dominée par la forêt claire en 1986. Avec 85,57 % de progression le complexe savane-exploitation agricole est la classe qui a connu le plus fort accroissement entre 1986 et 2002. Le taux de régression le plus important est aussi observé dans la zone sud avec 44,25 % de recul pour la forêt claire. Ces résultats montrent que globalement, les forêts denses ont connu une expansion de taille dans la zone nord alors qu'elles sont fortement réduites dans la zone sud. Cette diminution au sud se fait au profit du complexe savane-exploitation agricole et de la classe sol nu-habitat.

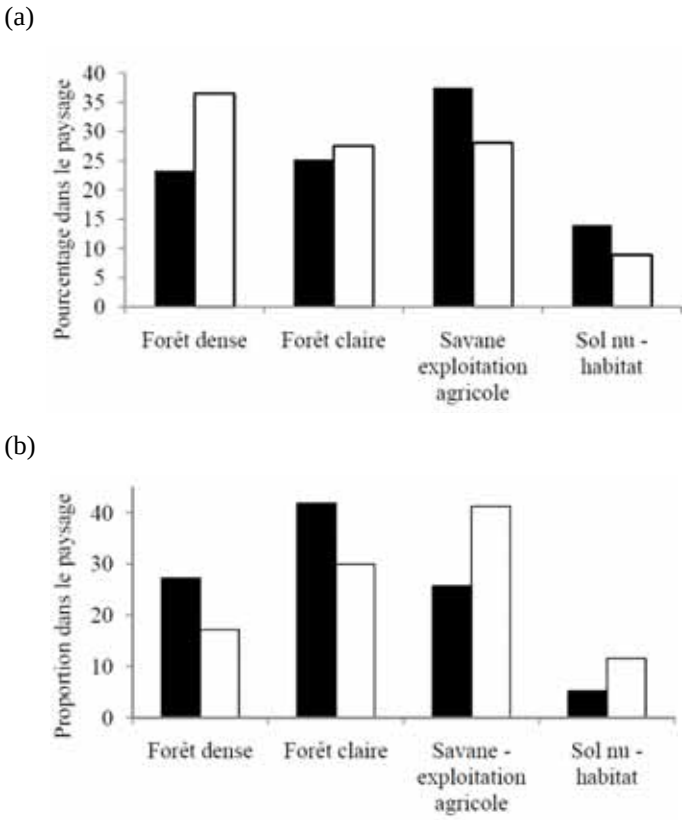


Figure 2. Composition du paysage en 1986 et en 2002. Evolution de l'aire dans la zone nord(a) et dans la zone sud (b).
Landscape composition in 1986 and 2002. Area evolution of the northern (a) and southern (b) zone.

4.3. Matrices de transitions

Le tableau 1 présente la matrice de transition des classes d'occupation du sol entre 1986 et 2002. Les colonnes de chaque matrice représentent les classes en 2002 et les lignes celles de 1986. Chaque valeur du tableau correspond à la proportion de l'aire convertie, entre 1986 et 2002, de la classe indiquée sur la ligne vers la classe en tête de colonne. Par exemple, 26,98 % expriment la fraction de la superficie de forêt dense dans la zone nord en 1986, qui a été convertie en forêt claire en 2002. Les valeurs en gras indiquent les taux de permanences des classes pour la zone donnée. Par exemple 22,96 % représente la proportion de l'aire de forêt dense qui est restée telle dans la zone sud entre 1986 et 2002. Les valeurs en dessous de la ligne formée par les chiffres en gras, en fonction de la région d'étude, représente les dynamiques de densification de la végétation et celles au dessus les dynamiques de savanisation. Ainsi, dans la zone nord, 46,06 % des forêts claires en 1986 ont évolué vers des forêts denses en 2002 alors que 20,94 % ont été dégradées et sont converties dans le complexe savane-exploitation agricole.

Toutes les classes ont connues des changements notables pendant la période d'étude. Dans la zone nord, le complexe savane-exploitation agricole s'est révélé être la classe qui a subi la plus grande conversion. Ainsi, 68,39 % de l'aire de cette classe ont évolué vers d'autres classes et en particulier vers les forêts claires (34,77 %) et denses (31,19 %). Ce résultat montre que cette classe a subi une reforestation (évolution vers la forêt claire et la forêt dense) pendant la période d'étude. De même, 68,07 % des surfaces des taches de forêt claire ont été converties en d'autres classes et particulièrement en forêt dense (46,06 %). Ce qui montre que cette classe a également subi une reforestation. Dans cette zone, la forêt dense est la classe dont l'aire est restée la plus stable dans le paysage avec 56,45 % de permanence. Elle a été convertie majoritairement en forêt claire (26,98 %) et dans le complexe savane-exploitation agricole (15,92 %). On remarque, au regard de ces résultats, que la zone nord de la région a connu une densification de la végétation. La zone sud présente de forts degrés d'ouverture de l'espace forestiers. Ainsi, les superficies de ces forêts ont été converties

majoritairement dans le complexe savane-exploitation agricole à raison de 48,19 % pour la forêt dense et 23,78 % pour la forêt claire. Ces résultats font ressortir le phénomène de savanisation des forêts de la zone sud de la région. A cette conversion des espaces forestiers en savane, vient s'ajouter celle de la classe sol nu-habitat à hauteur de 54,71 % de l'aire de cette classe. Les processus de reforestation de la zone nord et de savanisation de la zone sud sont confirmés par la figure 1 illustrant la dynamique de l'occupation du sol de 1986 à 2002. En somme, au regard de la faible proportion des zones restées stables, on peut affirmer que la région d'étude a subi d'importants changements entre 1986 et 2002 avec une évolution différente au nord et au sud de la région d'étude.

Tableau 1 Matrice de transition de l'aire des classes d'occupation du sol de 1986 à 2002 des zones nord et sud de la région d'étude.
Transition matrix for the areas of the land cover classes of the northern and southern study area between 1986 to 2002.

1986	2002	Forêt dense	Forêt claire	Savane-exploitation agricole	Sol nu-habitat
Forêt dense	Zone nord	**56,45**	26,98	15,92	0,65
	Zone sud	**22,96**	23,78	48,19	5,07
Forêt claire	Zone nord	46,06	**31,93**	20,94	1,07
	Zone sud	17,35	**21,80**	54,87	5,98
Savane-exploitation agricole	Zone nord	31,19	34,77	**31,61**	2,43
	Zone sud	13,81	19,82	**57,40**	8,97
Sol nu-habitat	Zone nord	0,00	0,40	44,56	**55,04**
	Zone sud	0,00	0,20	54,71	**45,09**

4.4. Validation du modèle

Le test de χ^2 de comparaison des probabilités observées à partir des données de 2000 (données indépendantes de celles utilisées pour calibrer le modèle) et simulées en 2000 n'a pas présenté de différences significatives ($\chi^2 < 7{,}81$; $p > 0{,}05$) pour A dans les zones nord et sud. On peut donc conclure que la dynamique de la région d'étude peut être décrite en utilisant une chaîne de Markov.

4.5. Dynamique du paysage

La simulation de l'évolution de l'occupation du sol de 1986 à l'horizon 2050 (figure 3) montre que si les transitions restaient constantes au cours du temps, les superficies des espaces boisées (forêts dense et claire) connaîtraient une augmentation dans le nord de la région d'étude alors que ces classes diminueraient fortement dans le sud. Dans cette dernière partie, la réduction des forêts s'effectuerait en faveur des exploitations agricoles et des savanes qui verraient leurs tailles doubler à l'horizon 2050. Il en est de même de la classe sol nu-habitat qui passerait de 4,62 % du paysage en 1986 à 11,50 % à l'horizon 2050. Cette tendance serait inversée dans le nord de la région où le développement des forêts se ferait au détriment du complexe savane-exploitation agricole et de la classe sol nu-habitat qui régresseraient respectivement de 37,48 % à 23,00 % du paysage et de 14,03 % à 4,40 % à l'horizon 2050.

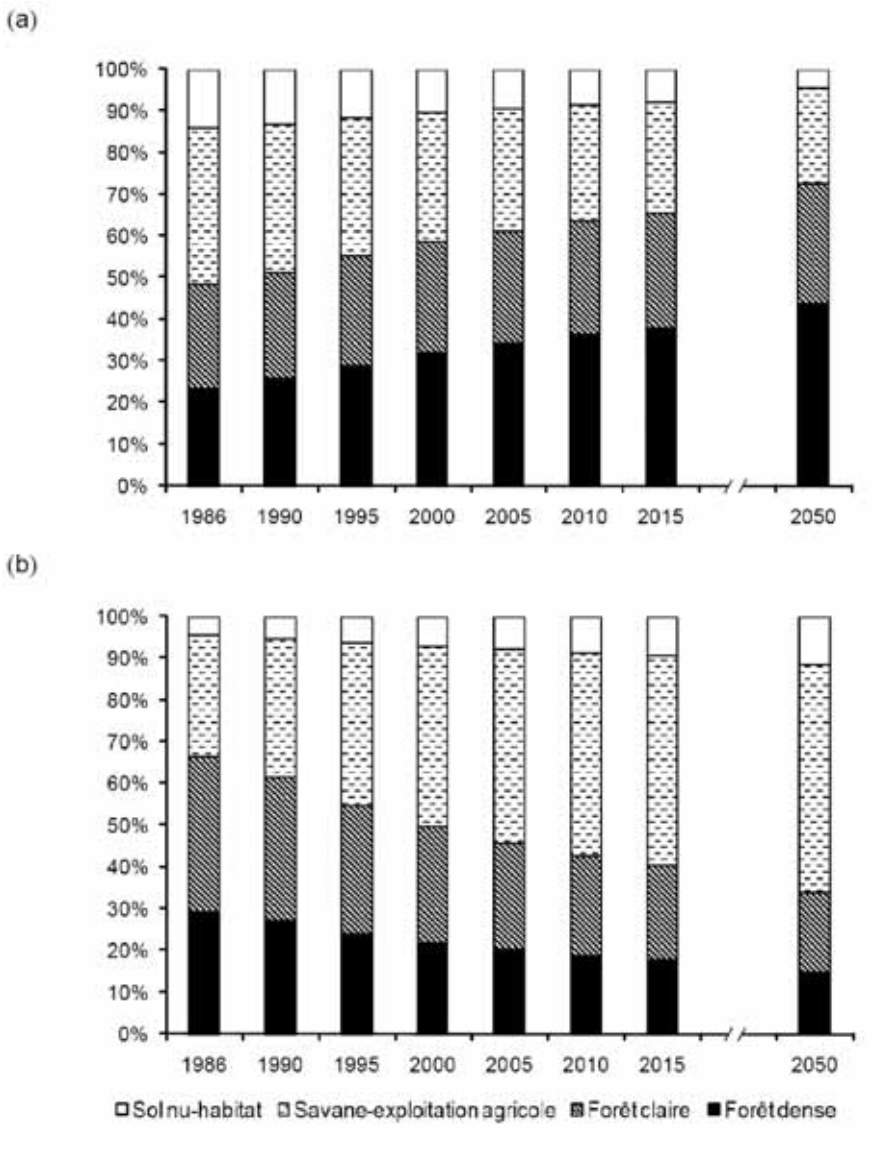


Figure 3. Dynamique de l'occupation du sol de 1986 à 2050 de la zone nord (a) et de la zone sud (b).
Land covers dynamics betweenen 1986 and 2050 of the northern study area (a) and southern study area (b).

5. DISCUSSION

Les tendances obtenues suite à la simulation à partir de la chaîne de Markov de premier ordre, révèle une augmentation des superficies forestières dans le nord de la région d'étude aux dépens des autres catégories d'occupation du sol. Ce résultat confirme ceux obtenus dans des zones similaires par Happi and Bonvallot (2000) au centre du Cameroun et par Goetze et al. (2006) au nord de la Côte d'Ivoire. Au contraire, la situation semble s'inverser dans le sud où l'avancée du complexe savane-exploitation agricole s'opère au détriment des surfaces boisées comme l'avait déjà constaté Chatelain (1996) dans des milieux semi-décidus du centre-ouest de la Côte d'Ivoire. Ces variations de tendance des forêts des zones de transition forêt-savane montrent que ces milieux sont en forte mutation (Smith et al, 1997) et que ces changements seraient causés, en partie, par la sensibilité particulière de ces régions aux variations saisonnières et pluviométriques (Bigot et al., 2005). La déforestation dans la région en générale et de la zone sud en particulier est aussi la conséquence de la pratique de l'agriculture itinérante sur brûlis comme principale technique culturale depuis des décennies dans cette région. Cette pratique agricole est associée à des feux de végétation et à l'abattage des arbres pour la fabrication de charbon de bois et l'obtention du bois de chauffe. On pourrait aussi joindre à cette raison, l'exploitation massive de bois d'œuvre. En Côte d'Ivoire, l'exploitation forestière n'est pas permise au delà du 8ème parallèle. La zone nord, proche de cette limite est partiellement épargnée par cette activité ; ce qui expliquerait nos observations. De plus, le relief accidenté de cette partie (Avenard, 1971) la rendrait moins carrossable par les engins d'exploitation forestière. Le sud par contre, fait l'objet d'une exploitation massive et incontrôlée et les principaux périmètres d'exploitation forestière de la région y sont concentrés. De plus, bien que l'exploitation de bois devrait impérativement, en théorie, être suivi d'un reboisement à hauteur de 1 ha pour 500 m³ de grume extirpée dans la forêt, les reboisements, en pratique, ne s'effectuent pas dans l'espace ouvert par l'abattage des arbres mais plutôt sont concentrés sur de grands espaces ; usage

plus rentable financièrement pour les exploitants forestiers (Barima, 2009). Et là encore, la végétation originelle est détruite et remplacée par des plantations monospécifiques d'espèces exotiques, le teck (*Tectona grandis*) en générale. Pire, ces reboisements s'effectuent sur les terres fertiles réquisitionnées par l'exploitant forestier, augmentant ainsi la pression des populations locales sur les îlots de forêt encore existant dans leur environnement immédiat. De plus les exploitants forestiers accordent peu d'importance à l'état des espaces reboisés qui sont donc la proie régulière des feux de forêt et de phytopathologies. La zone sud, avec plus de 70 % des cas dénombrés dans la région jusqu'en 2005 (Koffi et Ouattara, 2005) est ainsi la partie la plus affectée par les feux de végétation et pourrait expliquer en partie, la réduction de superficie forestière dans cette région. Si ces pratiques ne changent pas positivement dans cette partie pourtant proche du domaine forestier Guinéen, aucune tache de forêt pourrait ne plus être perceptible dans cette zone d'ici la fin de ce siècle. Au contraire, dans la zone nord, on observe une densification du couvert végétal. Ce qui suggère que la végétation est soit en train de subir un processus naturel de succession, soit que des espaces boisées ont été plantés par l'Homme. En tout état de cause, l'on peut affirmer que la pression humaine sur le paysage de la zone nord est plus faible ; ce qui se traduit par une réduction des espaces habités et sa conversion en végétation dont 44,56 % en savane-exploitation agricole.

La technique de modélisation utilisée, basée sur la matrice de transition, a permis d'appréhender les changements de catégorie au niveau des classes d'occupation du sol entre 1986 et 2002. Bien que donnant une idée de la tendance de la dynamique du paysage de façon générale, il importe qu'une troisième date soit prise en compte entre 1990 et 2000 afin de mieux apprécier les transitions, car nous estimons que les changements révélés peuvent ne pas être aussi linéaires (Baker, 1989). En effet les tendances sont obtenues dans cette étude à partir de l'hypothèse selon laquelle les facteurs potentiels et les variables qui influenceront la dynamique du paysage garderont la même emprise que celle de la période de 1986 à 2002. Pourtant les taux de transition varient dans le temps. Un phénomène qui conduit à la déforestation par exemple peut ne pas être perpétuel mais se réalisera pendant un temps donné suivant d'autres facteurs (climat, sol, actions anthropiques). Une alternative serait de diviser le temps de l'étude en plusieurs périodes de 5 ou 10 ans et d'établir pour chacune d'elles une matrice de transition avant de faire une projection de l'une à la suite de l'autre. Par ailleurs, les simulations, faites à l'aide de la matrice des probabilités évoquent les différentes options possibles pour chaque classe d'occupation du sol. La stochasticité des évènements offre en effet, une gamme de résultats et non un seul (Urban *et al.*, 1999). Il importe à l'avenir qu'un intervalle de confiance de l'estimateur du taux de transition soit associé à ces probabilités en vue d'apprécier leur précision. Une autre précaution à prendre dans l'utilisation de la chaîne de Markov du premier ordre survient quand une partie de la transition semble avoir des dépendances spatiales. Par exemple, certains genres de transition pourraient tendre à se produire dans certains arrangements topographiques ou dans certaines configurations spatiales particulières. La chaîne de Markov devient dans ces cas, le point de départ dans la mise en œuvre de modèles de simulation plus complexes (Baker, 1989). Il s'avère souvent important de tenir compte de l'histoire dans l'explication d'un phénomène. Dans ce cas il faut connaitre l'état du phénomène à t et $t-1$ pour prédire ce qui arrivera à $t+1$. Cette procédure est la base de la chaîne de Markov de second ordre. En tout état de cause, augmenter le niveau de complexité d'un modèle ne facilite pas forcément non plus l'interprétation des résultats parce que plusieurs assertions seront proposées. La chaîne de Markov du premier ordre a l'avantage d'être un modèle peu complexe dont les défauts sont connus (Cohen *et al.*, 1995 ; Osaragi and Yoshitsugu, 2006). De plus, dans cette étude, ce modèle a été validé avec une image indépendante datant de 2000.

Une simulation du taux de taches de chacune des classes d'occupation du sol aurait permit de ne pas se limiter uniquement à la composition du paysage mais aussi de prendre en compte les aspects liés à sa structure. La structure et la composition du paysage permettront ainsi de mieux comprendre son fonctionnement, ce qui est connu en écologie du paysage comme le « *pattern/process paradigm* » (Forman, 1995 ; Bogaert et Mahamane, 2005). Les processus de transformation paysage pourraient être déterminée et fourniraient des informations sur les causes de la transformation (Bogaert et al. 2004) puisque des conversions spécifiques du paysage auraient pu être liées à des initiateurs bien identifiés (Forman, 1995).

Enfin, les images TM et ETM+ de Landsat utilisées, bien que de résolution relativement faible (30 m), ont été d'un grand apport dans l'identification des catégories d'occupation des terres. La résolution spatiale de ces images n'a cependant pas permis d'accéder à certains détails comme la forme ; ce qui a occasionné une certaine généralisation des données et de considérer ainsi une seule classe regroupant les savanes (savanes boisés, savane herbeuse), les exploitations agricoles (sans distinction du types de culture) et les jachères sans séparation en fonction de leur âge. À l'avenir, dans le but de fournir des informations plus précises et plus détaillées, il faudra recourir à des images de très haute résolution spatiale. En dépit de ce niveau de résolution spatiale, ces images ont permis de dégager les tendances générales de la dynamique de l'occupation des terres et en particulier des forêts, objet principale de la présente étude.

6. CONCLUSION

Cette étude avait pour objectif de déterminer les tendances évolutives de la dynamique spatiale et temporelle intervenue dans le département de Tanda, situé dans la zone de transition forêt-savane à l'est de la Côte d'Ivoire, de 1986 à l'horizon 2050. Pour cela, des méthodes alliant des techniques de télédétection et des SIG ont été employées. Une

modélisation a été réalisée à partir d'une matrice de transitions et de probabilités et a servi à appliquer une chaîne de Markov de premier ordre sur la proportion de l'aire dans le paysage. Les analyses révèlent une tendance évolutive vers la densification des taches forestières dans la zone nord de la région. Au contraire, dans le sud, les savanes et les exploitations agricoles sont en forte progression au détriment des classes forestières. Les pressions anthropiques pourraient être les raisons essentielles de la dégradation des forêts dans cette zone. Les indications quantitatives fournies sur la dynamique de l'occupation des terres ont ainsi permis de simuler l'avenir des forêts de la région d'étude. Les dynamiques présentées présenteront des implications certaines sur la vie des populations locales, étant donné que leur système de vie sera condamné à évoluer. Ces informations devraient permettre aux décideurs et aux aménagistes du territoire de prendre des mesures adéquates pour inverser ou amplifier la tendance d'une évolution.

Remerciements

Nous remercions l'International Foundation for Science (Suède) pour avoir financé les travaux de terrain, la Direction des relations extérieures et la Fondation David et Alice Van Buuren de l'Université Libre de Bruxelles ainsi que le Gouvernement ivoirien pour la bourse d'étude accordée à Barima, Y.S.S. Nos remerciements vont également à l'encontre du Conseil Général de Tanda pour toutes les facilités à nous accordées pour accéder aux sites d'étude.

Bibliographie

Antoni, J-P. (2006) Calibrer un modèle d'évolution de l'occupation du sol urbain. L'exemple de Belfort. Cybergeo, N° 347, p. 1-19.

Avenard, J.M., Bonvallot, J., Latham, M., Renard Dugerdil, M. et Richard, J. (1974) Aspects du contact forêt-savane dans le Centre et l'Ouest de la Côte-d'Ivoire : études descriptives. Collection mémoires ORSTOM 35, Paris, France, 254 p.

Avenard, J.M. (1971) Aspects de la géomorphologie. P. 7-71 in J.M. Avenard, M. Edlin, G. Girard, J. Sircoulon, P. Touvhebeuf, J.L. Guillaumet, E. Adjanohoun et A. Perraud, (réd.) Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, Paris – France, 391 p.

Baker, W.L. (1989) A review of models of landscape change. Landscape Ecology vol. 2, no. 2, p. 111-133.

Barima, Y.S.S., Barbier, N., Bamba, I., Traoré, D., Lejoly J., et Bogaert, J. (2009) Dynamique paysagère en milieu de transition forêt-savane ivoirienne. Bois et Forêts des Tropiques, vol. 299, no 1, p. 15-25.

Berchtold, A. (1998) Chaines de Markov et modèles de transition : applications aux sciences sociales. Hermès, Paris, France, 284 p.

Bigot, S., Brou, Y.T., Oszwald, J. et Diedhiou, A. (2005) Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. Sécheresse, vol.16, no 1, p. 5-13.

Bogaert, J., Ceulemans, R., and Salvador-van Eysenrode, D. (2004) Decision tree algorithm for detection of spatial processes in landscape transformation. Environmental Management, vol. 33, no 1, p. 62-73.

Bogaert, J. et Mahamane, A. (2005) Ecologie du paysage : cibler la configuration et l'échelle spatiale. Annales des sciences agronomiques du Bénin, vol. 7, no 1, p. 39-68.

Bonn, F., et Rochon, G. (1992) Précis de télédétection. Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec, Canada, 485 p.

Brou, Y.T., Akindès, F. et Bigot, S. (2005) La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions sociales et réponses agricoles. Cahiers Agricultures, vol. 14, no 6, p. 533-540.

Chatelain, C. (1996) Possibilité d'application de l'imagerie satellitaire à haute résolution pour l'étude des transformations de la végétation en Côte d'Ivoire forestière. Thèse de doctorat, Université de Genève, Suisse, 206 p.

Cohen, W.B., Spies, T.A. and Fiorella, M. (1995) Estimating the age and structure of forests in a multi-ownership landscape of western Oregon, U.S.A. International journal of remote sensing, vol.16, p. 721-746.

Dauget, J.-M. et Menaut J.-C. (1992) Evolution sur 20 ans d'une parcelle de savane boisée non protégée du feu dans la réserve de Lamto (Côte-d'Ivoire). Candollea, vol. 47, n0 2, p. 621-630.

ESRI (2006) ArcGis version 9.2, New York, USA.

FAO (2006) Global Forest Resources Assessment 2005. FAO, Rome, Italy, 319 p.

Forman, R.T.T. (1995) Land mosaics : the ecology of landscapes and regions. Cambridge University Press, Cambridge, 632 p.

Gautier, L. (1989) Contact forêt-savane en Côte d'Ivoire centrale : évolution de la surface forestière de la réserve de Lamto (Sud V-baoulé). Bulletin de la société botanique de France, vol.136, p. 85-92.

Giles, R.H.J. and Trani, M.K. (1999) Hey elements of landscape pattern measures. Environmental Management, vol. 23, p. 477-481.

Girard, M.-C. & Girard, C. M. (1999) Traitement des données de télédétection. Dunod, Paris, France, 529 P

Goetze, D., Hörsch, B. and Porembski, S. (2006) Dynamics of forest–savanna mosaics in north-eastern Ivory Coast from 1954 to2002. Journal of Biogeography, vol 33, p. 653-664

Guillaumet, J.L. et Adjanohoun, E. (1971) La végétation de la Côte d'Ivoire. P. 157-263 in J.M. Avenard, M. Edlin, G. Girard, J. Sircoulon, P. Touvhebeuf, J.L. Guillaumet, E. Adjanohoun et A. Perraud, (réd.) Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, Paris – France, 391 p.

Happi, Y., Bonvallot, J. (2000) La disparition des savanes au Centre-Cameroun entre 1950 et 1990. P. 199-200 in M. Servant et S. Servant-Vildary (réd.) Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux. Orstom-CNRS, Paris, 433 p.

Koffi, B. et Ouattara, S. (2005) Bilan et perspectives de la gestion des feux de brousse et incendies de forêts dans la Région du Zanzan. Mémoire d'ingénieur ès sciences, Institut national polytechnique Houphouet Boigny, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 98 p.

Mas, J.F. (2000) Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. Canadian Journal of Remote Sensing,vol. 26, p. 349-362.

McGarigal, K., Cushman, S.A., Neel, M.C., et Ene, E. 2002. FRAGSTATS version 3.3: Spatial pattern analysis program for categorical maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst, USA.

Moore, A.D. (1990) The semi-Markov process : A useful tool in the analysis of vegetation dynamics for management. Journal of Environmental Management, vol. 30, p. 111-130.

Muller, M.R. and Middleton, J. (1994) A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, Canada. Landscape Ecology, vol. 9, no. 2, p. 151-157

N'guessan, E., Bellan, M-F. et Blasco, F. (2003) Suivi par télédétection spatiale d'une forêt tropicale humide protégée soumise à des pressions anthropiques. Télédétection, vol. 3, no 5, p. 443-456.

Osaragi, T. and Yoshitsugu, A. (2006) A Method for estimating land use transition probability Using raster. P. 69-84 in J.P. van Leeuwen and H.J.P. Timmermans (réd.) Innovations in design and decision Support Systems in Architecture and Urban Planning, Springer, Netherlands, 502 p.

Pontius, R.G.Jr. (2000) Quantification error versus location in comparison of categorical maps. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 66, no 8, p. 1011-1016.

RSI (2005) ENVI version 4.2. The remote sensing platform of choice. ITT industries, Inc, Pearl East Circle, USA.

Schlaepfer, R. (2002) Analyse de la dynamique du paysage. Laboratoire de gestion des écosystèmes, École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne, 11 p.

Smith, T.B., Wayne, R.K., Girman, D.J. and Bruford, M.W. (1997) A role for ecotones in generating forest biodiversity. Science, vol. 276, no 5320, p. 1855-1857.

Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K.C., Pax Lenney, M. and Macomber, S.A.,

(2001) Classification and change detection using Landsat TM data : When and how to correct atmospheric effects ? Remote Sensing of Environment, vol. 75, no 2, p. 230-244.

Spichiger, R. et Pamard, C. (1973) Recherche sur le contact forêt-savane en Côte d'Ivoire : Etude du recrû forestier sur des parcelles cultivées en lisière d'un îlot forestier dans le sud du pays baoulé. Candollea vol. 28, p. 21-37.

Spichiger, R., Lassailly, V. (1981) Recherches sur le contact forêt-savane en Côte d'Ivoire : note sur l'évolution de la végétation dans la région de Béoumi (Côte d'Ivoire centrale). Candolleaa, vol. 36, p. 145-153.

Stewart, W. J. (1994) Introduction to the Numerical Solution of Markov Chains. Princeton, NJ: Princeton University Press, 539 p.

Trochain, J.L. (1957) Accord interafricain sur la définition des types de végétation de l'Afrique Tropicale. Bulletin de l'Institut d'études centrafricaines, vol. 13-14, p. 55-93.

Urban, D.L., and Wallin, D.O. (2001) Models of landscape change. P. 35-48 in S.E. Gergel and Turner M.G. (eds.). Learning landscape ecology: a practical guide to concepts and techniques. Springer-Verlag, New York. 316 p.

Urban, D.L., Acevedo, M.F. and Garman, S.L. (1999). Scaling fine-scale processes to large-scale patterns using models derived from models : Meta-models. P. 78-98 in D. Mladenoff and W. Baker (eds). Spatial modeling of forest landscape change : approches and applications. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 352 p.

Weng, Q. (2002) Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. Journal of environmental management, vol. 64, p. 273-284.

Wright, J.S. (2005). Tropical forests in a changing environment. Trends in Ecology and Evolution, vol. 20, no 10, p. 553-560.