

## Analyse prospective de la déforestation estimée par télédétection dans la réserve de biosphère de Yangambi

*Mikwa Ngamba<sup>1-2</sup>, Masimo Kabuang'a<sup>2</sup>, Anitambua sungu<sup>2</sup>, Jean-Marie Kahindo<sup>3</sup>, and Hyppolite Nshimba<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Faculté des Gestions des Ressources Naturelles Renouvelables, Université de Kisangani, BP2012, Kisangani, RD Congo

<sup>2</sup>Unité de recherche en sol et systèmes d'informations spatiales, RUSSIS, Faculté de Gestion des Ressources Naturelles Renouvelables, Université de Kisangani, BP 2012, Kisangani, RD Congo

<sup>3</sup>Faculté des sciences, Université de Kisangani, BP 2012, Kisangani, RD Congo

---

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** The different forest ecosystems of the RDC have been affected by the dynamics of the soil occupation during these last decades, characterized by a clean reduction of the natural formations to the profit of the formations anthropiques. The studies achieved on this day limited themselves to an analysis diachronique by the integrated approaches implying the techniques of spatial analysis combined to the geographical information system (SIG).

Setting to part the analysis diachronique of the imagery LANDSAT TM, ETM+ and OLI (of parth and Raw 177-59, 1766-59 and 176-60) spreading of years 1986 to 2015 and supported of direct observations, the present survey sketches a prospective analysis of this dynamics while combining the applicable variables of the changes and the deterioration of the forests to a test of modelling to the deadline 2065.

The variables have been regrouped in 7 subgroups: agriculture, lumbering, infrastructures, the demographic factors, the socio-politic factors, the economic factors and the biophysical factors. Nevertheless, only the variables spatially explicit have been quantified and steady to the models. For the rest, two tools of modelling (CA\_Markov and LCM) have been used and the best allowed of cartographier the risks of deforestation the deadline 2065; the modelling has been made to the scale of the reserve of biosphere of Yangambi. For the two models a based objective and quantitative approach on the budgeting of the mistakes and the correct predictions has been adopted finally.

The results show a meaningful regression of the forest formations to the profit of the classes anthropisées with rates of deforestation of 1986-2002 and 2002-2015 of 1,1% and 4,31% and respectively. These reports come proved the necessity of the setting in application of a planning plan in view of the lasting management.

The visual and statistical comparison of the affected and real cards of 2015 allowed to use the tool THAT Markov for the simulation of the variation in surface of the classes of soil occupations the deadline 2065. However, the omen of an alarming and continual regression if some consequent measures are not set in motion.

**KEYWORDS:** Prospective analysis, THAT Markov, LCM, deforestation and Yangambi.

**RESUME:** Les différents écosystèmes forestiers de la RDC ont été affectés par la dynamique de l'occupation du sol au cours de ces dernières décennies, caractérisée par une nette réduction des formations naturelles au profit des formations anthropiques. Les études réalisées à ce jour se sont limitées à une analyse diachronique par les approches intégrées impliquant les techniques d'analyse spatiale combinée au système d'information géographique (SIG).

Mise à part l'analyse diachronique de l'imagerie LANDSAT TM, ETM+ et OLI (de parth et Raw 177-59, 1766-59 et 176-60) s'étendant des années 1986 à 2015 et appuyées d'observations directes, la présente étude esquisse une analyse prospective de cette dynamique en combinant les variables pertinentes des changements et de la dégradation des forêts à un essai de modélisation à l'échéance 2065.

Les variables ont été regroupées en 7 sous-groupes : agriculture, exploitation forestière, infrastructures, les facteurs démographiques, les facteurs socio-politiques, les facteurs économiques et les facteurs biophysiques. Néanmoins, seules les variables spatialement explicites ont été quantifiées et calées aux modèles. Pour le reste, deux outils de modélisation (CA\_Markov et LCM) ont été utilisés et le meilleur a permis de cartographier les risques de déforestation à l'échéance 2065 ; la modélisation a été faite à l'échelle de la réserve de biosphère de Yangambi. Enfin, pour les deux modèles une approche objective et quantitative basée sur la budgétisation des erreurs et des prédictions correctes a été adoptée.

Les résultats montrent une régression significative des formations forestières au profit des classes anthropisées avec des taux de déforestation de 1986-2002 et 2002-2015 de 1,1% et 4,31% et respectivement. Ces constats viennent prouver la nécessité de la mise en application d'un plan d'aménagement en vue de la gestion durable.

La comparaison visuelle et statistique des cartes simulées et réelles de 2015 a permis d'utiliser l'outil CA Markov pour la simulation de la variation en superficie des classes d'occupations du sol à l'échéance 2065. Toutefois, le présage d'une régression alarmante et continue si des mesures conséquentes ne sont pas mises en œuvre.

**MOTS-CLEFS:** Analyse prospective, CA Markov, LCM, déforestation et Yangambi.

## 1 INTRODUCTION

En RDC, l'enjeu actuel pour les politiques environnementales est de concilier la conservation des forêts et la production agricole dans un contexte où la pression humaine sur les terres s'accroît [12]. Selon plusieurs études, les différents écosystèmes de la RDC ont été affectés par la déforestation et la dégradation des forêts au cours de l'histoire récente tant au niveau national [2], [8],[19] que local [4], [21], [22]. La déforestation et la dégradation des forêts récentes affectent la viabilité des écosystèmes et menacent ainsi la capacité des forêts à produire des biens et services, en mettant ainsi en péril les populations autochtones, communautés locales, exploitants industriels et artisanaux qui en dépendent [21]. Il s'avère, en effet, essentiel de les comprendre afin de pouvoir gérer leurs effets dans le temps et dans l'espace [25].

Cependant, plusieurs études, à l'échelle locale, axées sur la déforestation se sont limitées à la connaissance spatialisée de l'intensité de la perte du couvert forestier et son impact sur l'intégrité du paysage écologique [3], [4], [13],[21], [22],[12]. Alors que dans la perspective actuelle de développement durable, il est indispensable d'identifier et d'évaluer les paramètres à la base de la déforestation et la dégradation des forêts [23] en vue d'entrevoir les changements futurs et l'utilisation de l'approche prospective devient de plus en plus incontournable [10]; [12],[15][20], [24], dans le souci de la mise en place des stratégies plus efficaces de lutte contre la déforestation et de rationaliser ainsi l'occupation du sol.

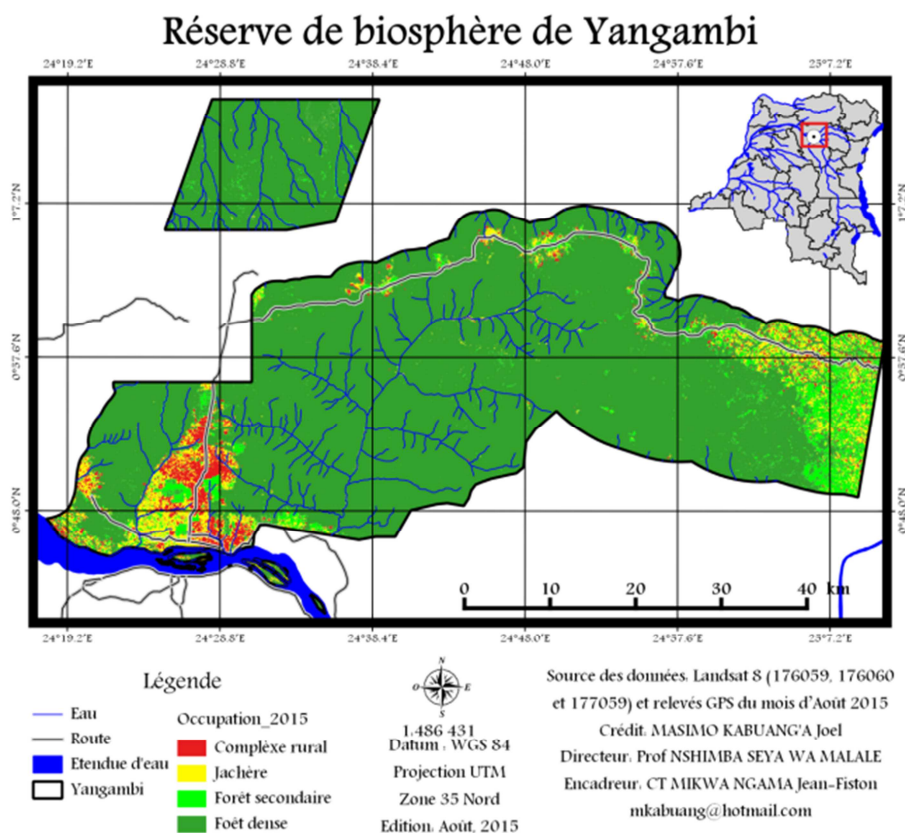
La réserve de biosphère de Yangambi est un site d'étude qui présente un enjeu national pour la politique agricole, celle de la conservation des forêts et de la biodiversité. En lisière de ce massif forestier, la physionomie du paysage forestier du terroir villageois change d'une année à l'autre sous l'effet des pratiques agricoles non durables effectuées par la population riveraine pour couvrir ses besoins alimentaires [1], [18]. La gestion des changements, qui se manifestent presque toujours par la dégradation des ressources naturelles, peut assurer le développement soutenable de cette région [9]. Se projeter dans l'avenir, imaginer l'état des forêts dans le futur est très utile dans la planification et la gestion des écosystèmes forestiers congolais. C'est en connaissant vers quoi l'on veut tendre demain que l'on peut aujourd'hui prévoir et bien réglementer.

L'objectif de cette étude est de terminer la dynamique spatio-temporelle des forêts et leur tendance à l'horizon 2065 dans la réserve de biosphère de Yangambi. Cet objectif permettra de vérifier les hypothèses selon lesquelles : (i) les forêts secondaires ont des taux de déforestation plus importants que les forêts secondaires, parce les forêts secondaires, d'une manière générale, sont proches des complexes ruraux et ont des risques plus élevés d'être anthropisées ; (ii) 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 stratégies de gestion de la zone de mosaïque forêt-complexe rural. De façon spécifique, il s'agira de cartographier la réserve, de comparer deux outils de modélisation des occupations du sol (l'un à calibration automatique et l'autre calibration supervisée), de quantifier les changements annuels intervenus dans les classes d'occupation du sol et de prédire l'avenir des forêts de réserve.

## 2 ZONE D'ÉTUDE

La réserve de biosphère de Yangambi [Figure 2] qui s'étend sur une superficie de 25.000 ha dans le bassin du fleuve Congo se situe au Nord-Ouest de la ville de Kisangani dans l'actuelle Province de la Tshopo (partie Est de la RD Congo). Elle s'étale dans le territoire d'Isangi (secteurs de Turumbu et de Yalihila) et dans le territoire de Banalia (secteur de Bamanga).

La réserve se trouve entre 24°16'95" et 25°08'48" longitude Est, 0°38'77" et 1° 10'20" latitude Nord et à une altitude moyenne de 450 m [1]. Elle est accessible par voie terrestre (route) et par voie fluviale (via le fleuve Congo).



**Figure 2 : Zone d'étude**

La zone d'étude jouit d'un climat du type Af de la classification de Köppen. Les précipitations annuelles moyennes oscillent autour de 1814.3 mm avec au moins 172 jours où il pleut globalement en moyenne une fois tous les deux jours [1].

Les sols de la région de Yangambi, malgré leur substrat hétérogène, ont des aptitudes agricoles différentes. Ces sols sont majoritairement pauvres avec une CEC<sup>1</sup> faible (2 à 8 méq/100g), une acidité assez marquée (pH compris entre 3,5 et 5,5), une abondance de l'aluminium échangeable (environ 40 - 70 % voire 80 % de la CEC), une forte rétention du phosphore sur les oxydes de fer et des teneurs en azote et en phosphate assez faibles.

La végétation de la RBY fait partie du Centre régional d'endémisme guinéo-congolais [6]. Son évaluation a montré qu'il existe une diversité de formations végétales s'expliquant à la fois par le milieu physique (présence de plusieurs rivières notamment) et par une influence de l'homme qui a remanié à différentes époques les habitats.

### 3 METHODE D'ANALYSE ET TECHNIQUE DE MODELISATION DE L'EVOLUTION DES LUCC

D'une manière générale, deux étapes caractérisent la démarche méthodologique de cette étude :

<sup>1</sup> CEC : Capacité d'échange cationique

### 3.1 TRAITEMENT DES IMAGES SATELLITES

Douze images satellites (1986, 2002, 2010 et 2015), en raison de trois images par date, ont été utilisées pour cartographier les occupations du sol de la zone d'étude. La classification supervisée par pixel, basée sur l'algorithme du maximum de vraisemblance (« *Maximum Likelihood* ») a permis d'extraire les différentes classes d'occupation du sol. La mosaïque de 2015 a été traitée en premier pour permettre de valider les résultats avec les réalités de terrain. Le processus de classification des mosaïques, postérieurs à 2015, est resté identique à celui de 2015. Sauf que, pour les mosaïques postérieures à 2015, les zones d'entraînement ont été choisies sur la base de valeur de la mosaïque « *invariant* ». Le traitement des images satellites a été réalisé à partir des logiciels ENVI 4.7 et ArcGis10.1. Pour estimer la précision de la classification, le coefficient de kappa a été calculé. Les dénominations des classes ont suivi la stratification forestière du guide opérationnel [26].

### 3.2 COMPARAISON ET CALAGE DE DEUX MODELES (LAND CHANGE MODELER ET CA\_MARKOV)

Les résultats issus des différents traitements des images LANDSAT (de 1986 et 2010) ont servi à alimenter la base de données SIG (IDRISI). Le calibrage du modèle a été réalisé en 3 étapes :

#### 3.2.1 CALIBRATION

La calibration comprenait trois sous étapes :

- 1° Découpage du vecteur comprenant le réseau routier et sa transformation au format image pour être conforme aux données cartographiques ;
- 2° Une conversion des résultats de traitement par télédétection en format image ;
- 3° La création d'une série de cartes de distances pour les routes, la pente, MNT, les villages, les complexes ruraux et les distances aux objets spatiaux, considérées comme variables par le modèle LCM et CA\_Markov, basé sur le principe d'un calcul probabiliste selon la méthode Markovienne qui consiste à évaluer la probabilité qui caractérise au milieu la substitution d'un type d'occupation à un autre type.

Le nombre de variables explicatives à intégrer aux modèles de simulation des changements des modes d'occupation et usage du sol est contraint par leur disponibilité, leur spatialisation ainsi que par leur influence sur la localisation et les changements des types d'occupation du sol. L'évidence est que le nombre de facteurs présentés et intégrés est limité comparativement à la gamme des variables potentiellement explicatives. Le Tableau 1 reprend les sept groupes des variables, leurs descriptifs ainsi les variables considérées dans la démarche de modalisation.

**Tableau 1 : Descriptif des variables explicatives**

Catégorie	Descriptif	Variables prise en compte
<b>Agriculture</b>	L'agriculture itinérante sur brulis est classée comme cause première de la déforestation dans l'ex-province Orientale.	<i>Complexe rural, Distance au complexe rural</i>
<b>Exploitation forestière</b>	L'exploitation forestière peut influencer la déforestation et la dégradation des forêts de diverses manières : la coupe de bois, la construction des routes facilitent l'accès aux forêts natives, les autres types d'exploitations (collecte de bois de chauffe) n'ont pas pu être modélisés suite à l'absence des données.	<i>Distance aux concessions forestières</i>
<b>Infrastructures</b>	Les routes facilitent l'accès aux ressources forestières et leur évacuation, influant sur la déforestation.	<i>Routes</i>
<b>Facteurs démographiques</b>	Les besoins en nourriture, bois de chauffe, le lotissement etc., ont des conséquences sur l'expansion des zones agricoles, des villages, des villes ...	Densité de la population
<b>Facteurs socio-politique</b>	Les campements des populations dans les forêts de la réserve n'ont pas été considérés ainsi que d'autres facteurs non spatialement explicites.	-----
<b>Facteurs économiques</b>	La demande des produits forestiers a une influence sur la déforestation. Ainsi l'accessibilité et la proximité aux grands centres influencent la déforestation.	<i>Distance aux villages</i>
<b>Facteurs biophysiques</b>	Il s'agit des paramètres naturels dont leur présence influence la déforestation dans la zone d'étude.	<i>Distance au fleuve Congo, Pente et Altitude.</i>

La légitimité de ces données à calibrer aux deux modèles doit être discutée comme le recommande la revue de la littérature [23] :

En effet, certaines d'entre-elles sont postérieures à 2010, ce qui fausserait le calibrage et ainsi l'extrapolation des dynamiques d'occupations du sol. Les données sur le zonage dans la réserve datent de 2012 [1] et devraient donc être exclues, de même que la densité de la population datant de 2011. Cependant, et après vérification auprès de l'Office de Routes et au ministère provincial de transport et voies de communication, les axes de communications sont restés relativement stables entre 1986 et 2010 même si leur état se détériore au fil du temps. Enfin, nous considérons que les villages sont restés relativement stables durant la période d'observation et que leur expansion est considérable.

Il y a lieu de noter que les variables sont de deux types : dynamiques et statiques. Les variables statiques traduisent l'aptitude pour chaque transition prise en considération et restent stables au cours du temps. Les variables dynamiques (proximité aux routes, proximité aux types d'occupation du sol déjà existants, etc.) sont recalculées à chaque pas durant le processus de prédiction. Le coefficient V de Cramer calcule la corrélation entre des variables et varie entre 0 et 1. Plus la corrélation est forte et plus le coefficient se rapprochera de 1 et vice versa. Selon [14], la variable sera considérée comme acceptable si son coefficient est égal ou supérieur à 0.4, mais devra être rejetée si le coefficient est inférieur à 0.15. Malgré tout, il faut garder à l'esprit qu'une forte corrélation ne tient pas compte de la complexité des relations entre les variables.

### 3.2.2 SIMULATION

La simulation consistait à choisir la méthode adéquate pour la transition potentielle qui peut être l'une de cinq méthodes suivantes : *la probabilité de preuve, l'exponentielle, la dérivate carrée, le logarithme népérien (naturel), et le Logit*. Un test rapide de la puissance potentielle des variables explicatives a permis de valider le modèle à chaque phase de calage. Il permettra ainsi d'ajuster, entre autres, l'ajustement des données complémentaires concernant la carte de tendance spatiale du changement, les données du réseau routier, la position des villes, etc. Une fois le modèle calé, un calcul prédictif sera effectué avec le choix préalable de la date concernée.

### 3.2.3 EVALUATION

Généralement, plusieurs étapes ont été utiles pour produire les cartes prédictives nécessitant l'entrée des paramètres suivants : des images d'occupation du sol (données d'occupation du sol en format image) de deux périodes (1986 et 2010), le réseau routier etc. Le modèle construit la matrice de transformation sur base des images précédentes avec, en cas de besoin, des actions de mise au point à l'aide des graphiques résultats (calage). La vérification se fait sur la base des images de 2015, considérées comme témoin.

Afin de dépasser la subjectivité et le manque de précision d'une approche comparative purement visuelle entre la carte d'occupation du sol issue des images de 2015 et la simulation de 2015, [17], montrent l'intérêt d'une comparaison statistique entre ces cartes. La validation se base sur une méthode permettant **de quantifier et visualiser les relations entre les changements d'occupation du sol et des variables explicatives**. Notre intérêt s'est porté cependant sur la "**budgetisation**" des erreurs et des prédictions correctes. Les auteurs distinguent quatre catégories de pixels avec (i) les pixels corrects en raison d'une constance observée et prédite (nullsuccesses [N]), (ii) les erreurs en raison d'une constance observée mais prédite comme changée (false alarms [F]), (iii) les pixels corrects dus à un changement observé et prédit (hits [H]) et (iv) les erreurs dues à un changement observé mais prédit comme constant (misses [M]).

Pour juger la précision de la prédiction globale des changements à travers l'ensemble du paysage, ils avancent une méthode permettant de mesurer les erreurs (en % du paysage) en raison de la quantité et de l'allocation en se basant sur les résultats de la budgetisation susmentionnée.

**Tableau 2: Mesure des erreurs et des exactitudes**

Oc : changement observé en pourcentage du paysage
Pc : changement prédit
Q : erreur en raison de la quantité des changements prédits
$Q =  pc - oc  =  (f+h) - (m+h)  =  f-m $
A : erreur en raison de l'allocation des changements prédits
$A = (f + m) - q = 2 \times \min(f, m)$
T : erreur totale
$T = f+m = q + a$

L'erreur due à la quantité de changement prédite mesure le pourcentage d'imperfection de la correspondance entre la quantité de changement observée et prédite. L'erreur due à l'allocation mesure le degré d'approximation de la correspondance dans l'allocation spatiale des changements, compte tenu de la spécification de la quantité des changements dans les cartes de changements observés et prédits.

## 4 RÉSULTATS

### 4.1 CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION DU SOL DE LA ZONE D'ETUDE

#### 4.1.1 PRÉSENTATION DE L'OCCUPATION DU SOL

Les cartes issues du traitement des images satellites sont présentées sur la figure 10. Cinq classes ont été retenues pour caractériser l'occupation du sol de la réserve : Forêt primaire, Forêt secondaire, Jachère, le complexe rural et l'eau. Nous pouvons constater sur les quatre cartes que la classe la plus répandue est celle de *Forêt primaire* qui occupait plus de 80% de la surface totale tandis que la classe qui présente la proportion la plus petite est : *l'Eau*. Elle représente moins de 1 % du total de la surface<sup>2</sup>. L'analyse visuelle de ces quatre cartes nous permet de constater que les principaux changements sont : a) la croissance de *complexe rural* et *les forêts primaires* entre 1986 et 2015; b) la régression importante des *Forêts secondaires*, c) des fluctuations des surfaces occupées par les « *Jachères* ». La classe de *l'Eau* semble être la plus stable durant les trois dates analysées.

L'évaluation de nos résultats à partir des matrices de confusion, nous a permis de constater que les indices Kappa (0,987 en 1986 ; 0,978 en 2002 ; 0,983 en 2010 et 0,988 en 2015) et la mesure d'exactitude (99,13% en 1986 ; 98,64 % en 2002 ; 98,78% en 2010 et 99,21% en 2015) pour les quatre cartes, indiquent que les classifications sont de bonne qualité. Pour mener à bien ces évaluations nous avons utilisé comme matériel de référence, la cartographie éditée par l'ULC et quelques zones que nous avons reconnues sur le terrain.

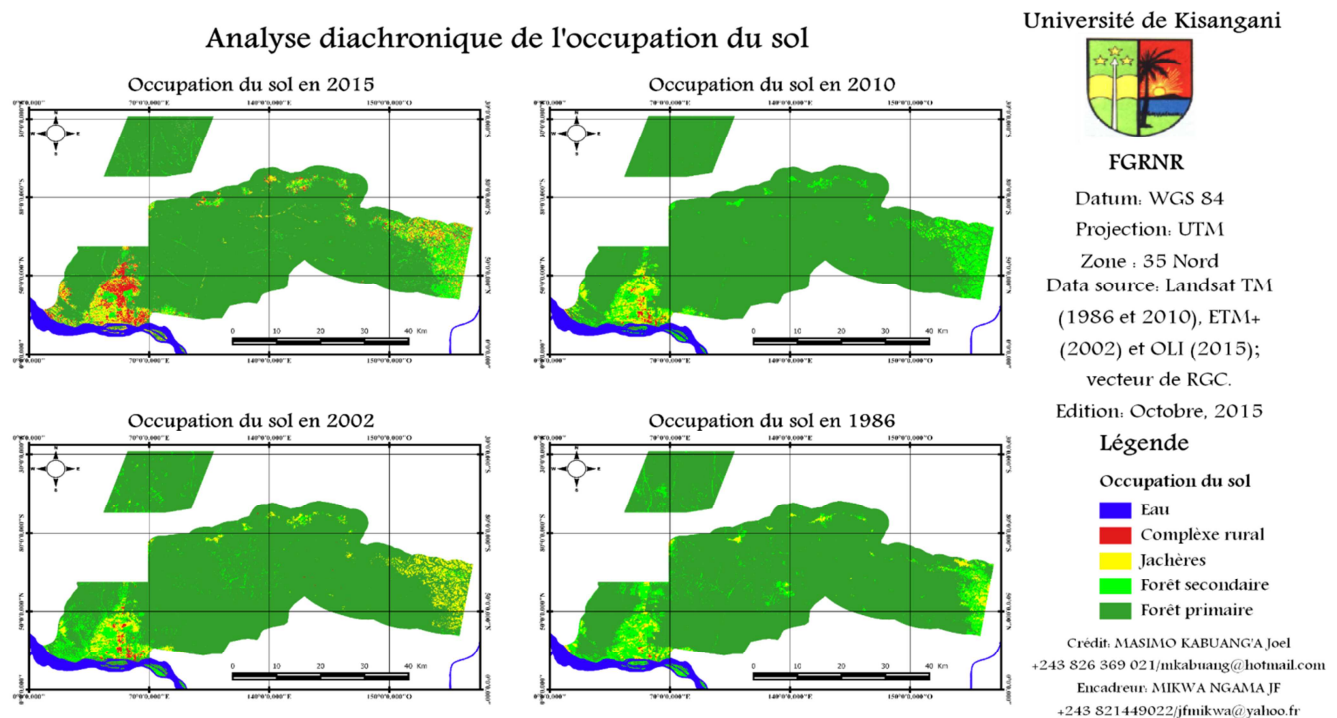


Figure 1 : Extrait des cartes de l'occupation du sol en 1986, 2002, 2010 et 2015

<sup>2</sup> Les étendues d'eaux prises en compte par ces statistiques sont les eaux géo localisées à l'intérieur des limites de la réserve. La partie du fleuve Congo traversant la zone d'étude n'est donc pas comptabilisée.

#### 4.1.2 EVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL

Afin de montrer l'évolution de chaque classe d'occupation du sol au cours du temps, nous avons utilisé une série de transformations ensemblistes ; la relation entre la même classe à deux dates différentes, nous permet d'extraire les zones « stables », de « régression » et de « progression » de cette classe. On considère que T1 représente l'ensemble de pixels de la date 1 et que T2 est l'ensemble de pixels pour la date 2.

#### 4.1.3 QUANTIFICATION DU TAUX DE DÉFORESTATION

Après l'établissement des différents types de liaisons entre les trois dates, nous avons calculé les taux de changement entre les surfaces des classes d'occupation du sol et les taux de déforestation entre les dates 1986 – 2002 (T1 – T2), les dates 2002 - 2015 (T2 – T3) et les dates 1986 -2015 (T1 – T3). Pour les changements entre les classes d'occupation du sol, les valeurs positives représentent une progression de la surface de la classe pendant la période analysée et les valeurs négatives indiquent la perte de surface d'une classe entre les deux dates. Les valeurs proches de zéro nous indiquent que la classe reste relativement stable entre les deux dates. Concernant à la déforestation, les valeurs positives impliquent la restauration du couvert tandis que les valeurs négatives signifient la perte du couvert.

##### 4.1.3.1 EVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL ENTRE 1986 ET 2002

On observe sur le tableau ci-dessous que la classe dont la surface reste la plus stable dans le temps est la classe de l'eau, en outre il s'agit de la classe la plus petite aux trois dates. En revanche, c'est la classe de *Jachère* qui est la plus fluctuante. Une autre classe qui montre des forts changements est la classe « *complexe rural* » qui est concentrée principalement dans le domaine foncier de l'INERA et la partie Nord-est de la réserve. Cette classe gagne en surface au détriment des *forêts primaires et secondaires*.

Tableau 3: Changement d'occupation du sol et déforestation entre 1986 et 2002.

Classe	2002	1986	T2-T1	Tc 1	Td
	Surface (ha)	Surface (ha)			
Eau	140,032	142,172	2,140	-1,505	
Complexe rural	2876,314	819,040	-2057,273	251,180	
Jachère	23769,095	13507,378	-10261,716	75,9711	
Forêtsecondaire	38094,614	43962,591	5867,977	-13,347	-0,895
Forêtprimaire	190234,640	196641,470	6406,836	-3,258	-0,207
Total	255114,693	255072,656			-1,102

T1 = surface à la date 1 (1986) ; T2 = surface à la date 2 (2002); Tc1 = taux de changement entre les dates 1986 et 2002. Les aires de complexe rural ont sensiblement progressé pendant cette période (couleur jaune). A l'inverse, nous pouvons constater une forte diminution des surfaces de « Forêt secondaire » (couleur bleue). Td est non spécifié pour les zones non forêt (couleur noire)

Les résultats du calcul de taux de changement entre 1986 et 2002 [Tc 1] montrent que la classe « *complexe rural* » présente une importante progression avec un Tc de 251,180 %, soit plus de 2057,273 ha de croissance durant une période de 13 années (tableau 5). Cette tendance se vérifie également à la classe de « *Jachère* » (avec une progression 7,59%). Nous pouvons percevoir plus clairement d'autres changements importants tels que la diminution des surfaces des Classes « *Forêt secondaire* » (-13,43% soit 5867,977 ha) et de « *Forêt primaire* » (-3,22 % équivalent à 6406,836 ha).

Ce même tableau montre également que le taux de déforestation<sup>3</sup> dans la réserve entre 1986 et 2002 est de 1,10%. La classe de *Forêt secondaire* a connu une perte de 0,8954% alors que la classe de *Forêt primaire*, sur la même période, a connu une perte moins importante estimée à 0,2070%. En termes de superficie, la réserve a perdu, dans seize ans, 5867,97 ha de

<sup>3</sup> Les valeurs négatives indiquent la perte donc la déforestation tandis que les valeurs positives impliquent la reconstitution du couvert forestier.

*forêt secondaire* et 6406,8361 ha de *forêt primaire*. Donc durant cette première période d'observation, la réserve a perdu 12274,81 ha de forêts (soit 944,22 ha perdus chaque année sur cette période).

#### 4.1.3.2 EVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL ENTRE 2002 ET 2015

Durant cette période la classe *forêt secondaire* présente toujours une forte régression entre les deux dates, mais nous pouvons aussi observer un comportement similaire pour la classe de « *Jachère* ». Dans le cas de la forêt secondaire, il est clair qu'elle a perdu une proportion considérable de sa surface au profit des zones de *complexe rural* et éventuellement *aux forêts primaires*. Nous observons que les changements durant cette période sont très importants que durant la période précédente. Cependant, nous pouvons noter que la classe « Forêt primaire » et celle de complexe rural présentent des progressions plus élevées que le reste des classes (Tc 2 de 240,1 % et 12,6% respectivement). Nous pouvons donc dire que l'occupation du sol pendant la période comprise entre 1986 et 2002 montre une stabilité dans une certaine mesure, en particulier de « l'eau et les forêts primaire ». Néanmoins, il y a des zones le long de la route qui montrent des signes d'anthropisation, comme par exemple les cultures et les petits villages...

Concernant les taux de déforestation, on constate que la forêt primaire connaît un accroissement dans sa surface estimée à 0,74% alors que la forêt secondaire perd sensiblement sa surface (régression estimée à 5,060 % soit 21137,961 ha). La perte totale du couvert forestier est estimée à 4,320% sur une longue période de treize années. Une telle évolution est liée non seulement à la forte croissance actuelle de la population de la région, mais aussi à la détérioration de l'INERA dont le personnel se tourne vers l'agriculture pour assurer leur survie.

Le Tableau 7 résume les changements observés et la déforestation qui en découle durant la seconde période d'observation.

**Tableau 4: Changement d'occupation du sol entre 2002 et 2015.**

Classe	2015	2002	T3-T2	Tc2	Td
	Surface (ha)	Surface (ha)			
Eau	141,037	140,032	-1,005	0,717	
Complexe rural	9783,590	2876,3147	-6907,276	240,143	
Jachère	13994,862	23769,095	9774,233	-41,121	
Forêt secondaire	16956,652	38094,614	21137,961	-55,488	-5,060
Forêt primaire	214157,41	190234,64	-23922,772	12,575	0,740
<b>Total</b>	<b>255033,551</b>	<b>255114,693</b>			<b>-4,3196</b>

T2 = surface à la date 2 (2002) ; T3 = surface à la date 3 (2015) ; Tc2 = taux de changement entre les dates 1986 et 2002. Les changements sont faibles et il s'agit seulement de la progression des classes « prairies-maquis », « bâti » et « sol nu » (couleur orange). Td est non spécifié pour les zones non forêt (couleur noir)

#### 4.1.3.3 BILAN FINAL DE L'EVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL

Nous observons l'ensemble de résultats obtenus à partir des calculs du taux de changement : a) 1986 – 2002 (16 ans) ; b) 2002 – 2015 (13 ans) et c) 1986 – 2003 (29 ans). Il en ressort constater que les changements les plus spectaculaires ont eu lieu entre les années 2002 et 2015 bien que cette période soit relativement courte comparée à la première. Les deux autres comparaisons montrent des changements plus modérés. Les périodes 2002-2015 présentent un taux de déforestation plus élevé (4,320%). Cependant, nous pouvons observer que, dans tous les cas, la classe « complexe rural » représente plus de la moitié des augmentations de surface, indiquant une progression constante pendant les trois périodes de temps analysées. Pendant les trois périodes, mis à part la catégorie de complexe rural, les classes qui ont fluctué le plus sont les « *Jachères* » et « *les forêts primaires* ». La classe de forêt secondaire a connu une régression sans précédente entre 1986-2002 et 1986-2015.



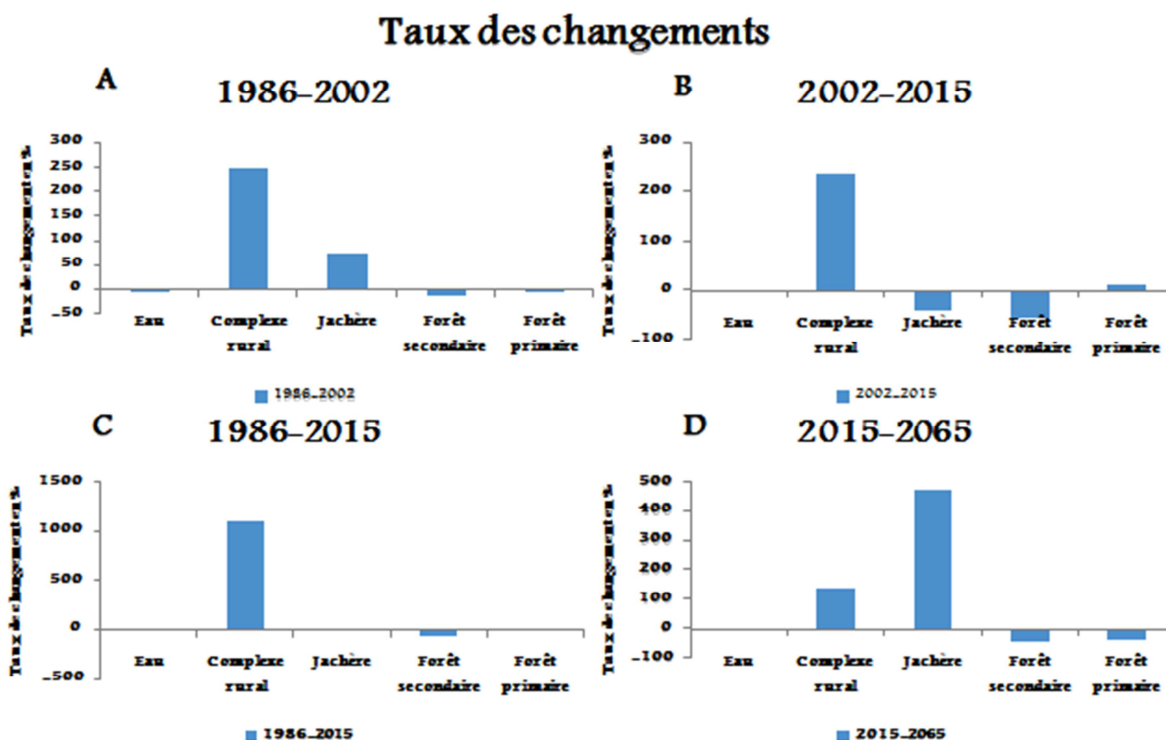


Figure 2 : Graphiques des résultats du taux de changement entre les différentes périodes analysées. A) la période 1986-2002; B) la période 2002-2015 ; C) la période 1986-2015 et D) 2015-2065.

#### 4.2 DYNAMIQUE PROSPECTIVE DANS L'ECOSYSTEME DE LA RESERVE

La matrice de Markov entre 1986 et 2010 présente la probabilité qu'à chaque classe en 1986 de changer ou non pour une autre classe en 2010. Le constat est qu'une stabilité globale particulièrement marquée s'observe pour la classe de *forêt primaire* et de l'eau. Toutefois, il y a une plus forte probabilité pour les *forêts secondaires* de devenir *complexe rural* que d'être converties en forêt primaire (9 % contre 2 %). La logique qui en découle est que la forêt secondaire qui se dégrade, laisse la place aux cultures et jachères. Mais aussi, ces forêts laissent, dans certaines situations, directement la place au complexe rural. Nous notons également la recolonisation des forêts primaires (6%), à la place de Jachère.

Tableau 5 : Probabilité de transition (en %) entre les classes d'occupation du sol

1896	2010				
	Forêtprimaire	Forêtsecondaire	Jachère	Complexe rural	Eau
Forêtprimaire	1,00	0,21	0,06	0,00	0,00
Forêtsecondaire	0,02	0,94	0,08	0,09	0,00
Jachère	0,01	0,03	0,86	0,06	0,00
Complexe rural	0,00	0,03	0,07	0,98	0,00
Eau	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00

##### 4.2.1 RELATION ENTRE LES CHANGEMENTS OBSERVES ET LES VARIABLES EXPLICATIVES

Le tableau 8 montre le seuil d'association entre les principaux changements et les variables explicatives. La distance par rapport aux concessions forestières et la distance au fleuve ne joue pas un rôle important au regard des principaux changements observés entre 1986 et 2010. Généralement, ces transitions augmentent avec la proximité du complexe rural. L'intensité des changements d'occupation du sol diminue à mesure que la distance par rapport aux routes, aux villages et la pente augmente (les coefficients de corrélation linéaire supérieurs à -0,50).

Les zones ayant transité de « Forêt secondaire » vers « complexe rural » ont été probablement influencées par la proximité des Jachères. Rappelons que seules, les variables dont le coefficient de corrélation compris entre -1 et -0,5 (et 0,5 et 1) sont retenues.

**Tableau 6: Relation entre les transitions observées (1986-2010) et les variables spatiales. Les valeurs retenues sont en gras**

		DACF	DAR	DAV	DAFL	PTE	DCR 86	DJA 86	DFS 86	DFP 86
Trans-FP »FS	CoefPeason	0,11	<b>-0,52</b>	0,14	0,12	0,12	0,10	0,15	0,13	0,14
	V de Cramer	0,08	0,06	<b>0,19</b>	0,06	0,09	0,06	<b>0,18</b>	<b>0,16</b>	<b>0,19</b>
Trans-FS »JA	CoefPeason	0,13	<b>-0,63</b>	<b>-0,51</b>	0,10	0,14	<b>-0,57</b>	<b>-0,60</b>	-0,26	-0,42
	V de Cramer	0,03	0,09	<b>0,18</b>	0,02	0,01	0,08	<b>0,15</b>	0,02	0,04
Trans-JA »FS	CoefPeason	0,11	<b>-0,57</b>	-0,47	0,13	0,17	-0,26	<b>-0,69</b>	<b>-0,51</b>	<b>-0,67</b>
	V de Cramer	0,05	<b>0,16</b>	<b>0,20</b>	0,03	<b>0,19</b>	<b>0,16</b>	0,06	<b>0,16</b>	0,08
Trans-CR »JA	CoefPeason	0,12	<b>-0,55</b>	<b>-0,52</b>	0,11	0,14	<b>-0,66</b>	0,11	<b>-0,63</b>	<b>-0,72</b>
	V de Cramer	0,05	<b>0,19</b>	0,14	0,09	<b>-0,50</b>	<b>0,19</b>	0,06	<b>0,19</b>	<b>0,19</b>
Trans-JA »FP	CoefPeason	0,10	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11	<b>-0,57</b>	0,15	0,13
	V de Cramer	0,09	0,07	0,09	0,01	0,04	0,06	0,12	0,06	0,08
Trans-CR »FS	CoefPeason	0,13	<b>-0,50</b>	<b>-0,52</b>	0,10	<b>-0,68</b>	0,11	<b>-0,60</b>	<b>-0,70</b>	<b>-0,50</b>
	V de Cramer	0,03	0,01	0,04	0,05	0,07	0,03	0,11	0,09	0,01
Trans-FS »CR	CoefPeason	0,11	<b>-0,68</b>	<b>-0,66</b>	0,13	0,13	<b>-0,54</b>	<b>-0,66</b>	0,14	0,12
	V de Cramer	0,06	<b>0,17</b>	<b>0,19</b>	0,08	0,09	<b>0,19</b>	<b>0,22</b>	<b>0,16</b>	<b>0,18</b>

Variables= DACF : Distance aux concessions forestières ; DAR : Distance aux routes ; Distance au fleuve Congo ; PTE : pente ; ATL : Altitude ; DCR : Distance au complexe rural ; DJA : Distance aux Jachères ; DFS : Distance aux forêts secondaires et DFP : Distance aux forêts primaires. » Transition ; CR= complexe rural ; JA= Jachère ; FS= Forêt secondaire et FP= Forêt primaire.

#### 4.2.2 COMPARAISON VISUELLE ET VALIDATION DU MODELE

Les deux cartes simulées sont présentées et comparées sur la figure 13. Nous notons que la distribution de l'occupation du sol a été correctement simulée. Les forêts sont réparties sur l'ensemble de la réserve, les jachères et les complexes ruraux se localisent dans la partie Est et Sud-ouest. Les deux simulations présentent beaucoup de ressemblances avec la carte réelle de 2015.

En effet, on peut constater que la simulation de CA\_Markov présente beaucoup de taches comprenant les zones de complexe rural dans la partie centrale de la réserve bien qu'un filtrage de 5X5 a été effectué. Le CA\_Markov simule bien les jachères et les forêts tant primaires que secondaires.

Le Land Change Modeler présente sur sa simulation les occupations du sol de manière assez similaire avec le CA\_Markov. Toutefois, on peut signaler la présence des taches assez grosses de complexe rural dans la réserve forestière de N'Gazi. Les autres classes sont aussi bien réparties sur la réserve.

## Comparaison visuelle des simulations avec l'image réelle en 2015

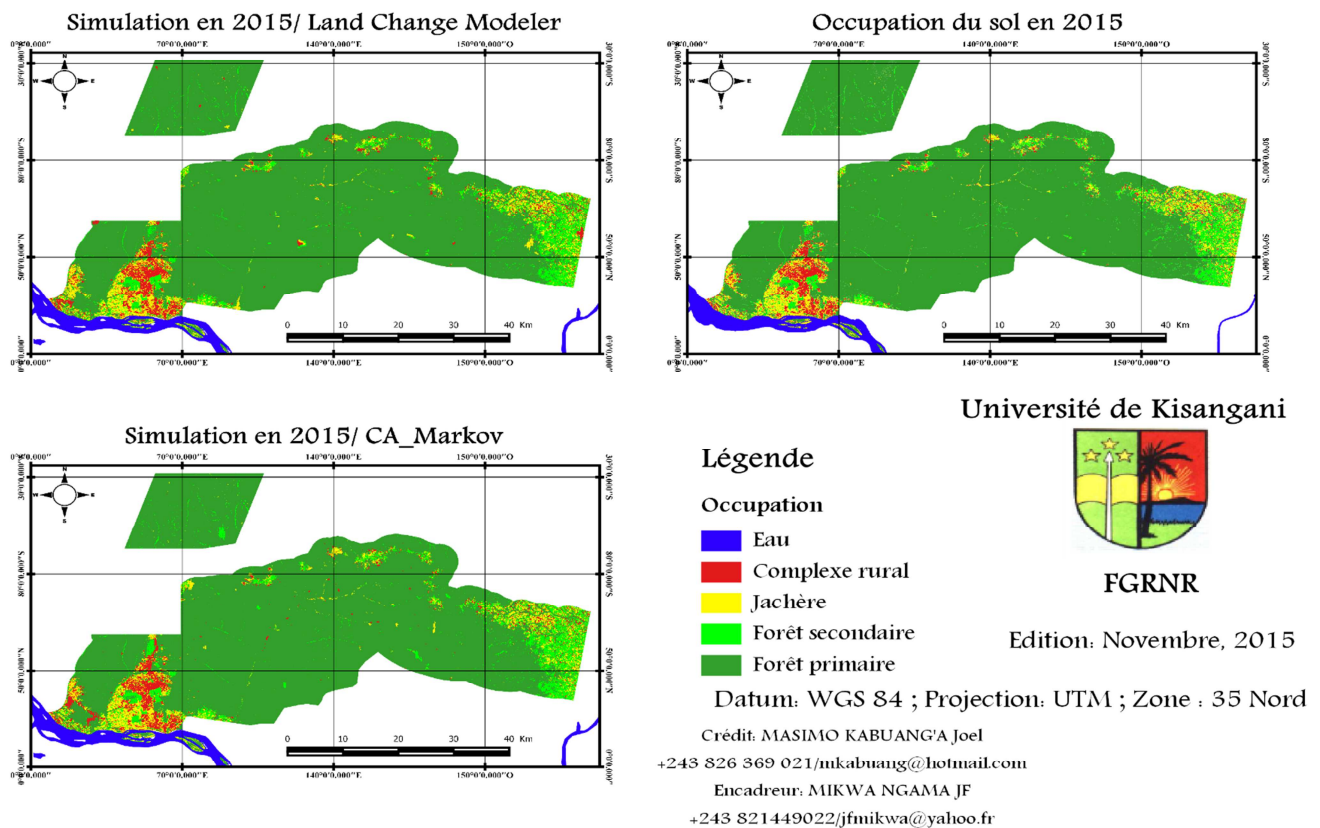


Figure 3 : Occupation du sol en 2015 observée et simulée par CA\_Markov et par LCM

### 4.2.2.1 CA\_MARKOV

La validation du modèle a été réalisée en comparant les changements observés et prédits entre 1986 et 2010. 82 % de la persistance observée (sur un total de 90 %) entre 1986 et 2010 a été correctement prédite [N]. La prédominance de la forêt primaire et la stabilité de la classe l'eau comparativement aux autres types d'occupation explique en partie ce résultat. Les erreurs en raison d'une constance observée mais prédite comme changée sont de 8 % [F], alors que les erreurs dues à un changement observé mais prédit comme constant [M] qui traduisent le processus inverse atteignent les 7 %. Enfin, les changements observés ayant été correctement prédits par le modèle sont de 3 % [H]. Le total des changements observés [OC = M + H] est de 10 % alors que les changements totaux prédits [PC = F + H] ont été sous-estimés avec 11%. La précision de la prédiction globale des changements à travers l'ensemble de la réserve est la suivante :

$$\begin{aligned} \text{Erreur de quantité (Q)} &= |F - M| = 1 \% \\ \text{Erreur d'allocation (A)} &= (F + M) - Q = 14 \% \\ \text{Erreur totale (Q + A)} &= 15 \% \end{aligned}$$

Tableau 7 : Matrice de contenance entre les changements observés et les changements prédits (CA\_Markov)

		Changements observés 1986-2010		
		0	1	Total
Changements prédits 1986-2010	0	0,82	0,07	<b>0,93</b>
	1	0,08	0,03	<b>0,07</b>
	Total	<b>0,90</b>	<b>0,10</b>	<b>1,00</b>

La validation des changements par type d'occupation du sol montre que le modèle prédit 38 % de changement [PC] pour les Forêts alors que les changements réels [OC] pour ces classes n'ont été que de 17 %. Les erreurs dues à la quantité sont de 21 % alors que celles dues à la distribution sont nulles.

**Tableau 8 : Comparaison entre l'occupation du sol observée et simulée (CA\_Markov)**

Classe	FP	FS	JA	CR	Eau	Total simulé 2015
FP	32,4	0,54	0,54	2	0,00	<b>35,48</b>
FS	2,09	17,1	0,13	0,11	0,00	<b>19,43</b>
JA	3,17	2,11	15,55	1,2	0,00	<b>22,03</b>
CR	4,11	1,17	2,22	12	0,00	<b>19,5</b>
Eau	0,00	0,00	0,00	0,00	3,56	<b>3,56</b>
<b>Total observé 2015</b>	<b>41,77</b>	<b>20,92</b>	<b>18,44</b>	<b>15,31</b>	<b>3,56</b>	<b>100</b>

Sur les 35,48 % des forêts primaires simulées en 2015, 32,4 % concordent avec l'observation. Les 3,08 % restant correspondent aux résidus (ou M). Ils se localisent, pour la plupart, à proximité des forêts secondaires observées. Inversement, les autres résidus (F) (2,09 % de Forêts secondaires ; 3,17 % de Jachères et 4,11 % de complexe rural) traduisent des erreurs de simulation où le modèle omet l'apparition de nouvelles forêts primaires.

#### 4.2.2.2 LAND CHANGE MODELER

73 % de la constance observée entre 1986 et 2015 ont été correctement prédites [N]. Les erreurs en raison d'une constance observée mais prédite comme changée sont de 13 % [F], alors que les misses [M] qui traduisent le processus inverse atteignent les 9 %. Enfin, les changements observés ayant été correctement prédits par le modèle sont de 5 % [H]. Le total des changements observés [OC = M + H] est de 14 % alors que les changements totaux prédits [PC = F + H] ont été sous-estimés avec 8 %. La précision de la prédiction globale des changements à travers l'ensemble du paysage est la suivante :

$$\text{Erreur de quantité (Q)} = |F - M| = 4 \%$$

$$\text{Erreur d'allocation (A)} = (F + M) - Q = 18\%$$

$$\text{Erreur totale (Q + A)} = 22\%$$

**Tableau 9 : Matrice de contingence entre les changements observés et les changements prédits (LCM)**

		Changements observés 1986-2010		
		0	1	Total
Changements prédits 1986-2010	0	0,73	0,09	<b>0,82</b>
	1	0,13	0,05	<b>0,18</b>
	Total	<b>0,86</b>	<b>0,14</b>	<b>1,00</b>

La validation des changements par type d'occupation du sol montre que le modèle prédit 67 % de changement (PC) pour les forêts alors que les changements réels (OC) pour cette catégorie n'ont été que de 15 %. Les erreurs dues à la quantité sont de 52 % alors que celles dues à la distribution sont nulles.

**Tableau 10 : Comparaison entre l'occupation du sol observée et simulée (LCM)**

Classe	FP	FS	JA	CR	Eau	Total simulé 2015
FP	<b>30,4</b>	1,54	0,65	2,89	0	<b>35,48</b>
FS	6,09	<b>13,1</b>	0,13	0,11	0	<b>19,43</b>
JA	2,17	2,21	<b>15,44</b>	2,21	0	<b>22,03</b>
CR	3,11	4,07	2,22	<b>10,1</b>	0	<b>19,5</b>
Eau	0	0	0	0	<b>3,56</b>	<b>3,56</b>
<b>Total observé 2015</b>	<b>41,77</b>	<b>20,92</b>	<b>18,44</b>	<b>15,31</b>	<b>3,56</b>	<b>100</b>

Sur les 35,48 % de forêts simulées en 2015, 30,4 % concordent avec l'observation. Les 5,08 % restant (1,54% de forêt secondaire ; 0,65 % de jachère et 2,89 % de complexe rural) correspondent aux résidus (ou M). Contrairement à CA\_Markov, ils se répartissent de manière diffuse et fragmentée sur le piémont sans aucune relation de proximité avec des forêts secondaires existantes, et apparaissent plus homogènes au sud et à l'ouest de la réserve. Par contre, les autres résidus (F) (6,09 % de forêt secondaire ; 2,17 de jachère et 3,11 % de complexe rural) traduisent des erreurs de simulation où le modèle omet l'apparition de forêt primaire.

#### 4.3 CARTOGRAPHIE DE RISQUE DE DEFORESTATION A L'ECHEANCE 2065

Les deux modèles prédisent les forêts réellement observées de la même manière. Pris isolément, CA\_Markov donne des résultats plus proches de la réalité que Land Change Modeler avec une moyenne de 70,81 % contre 61,69 % respectivement.

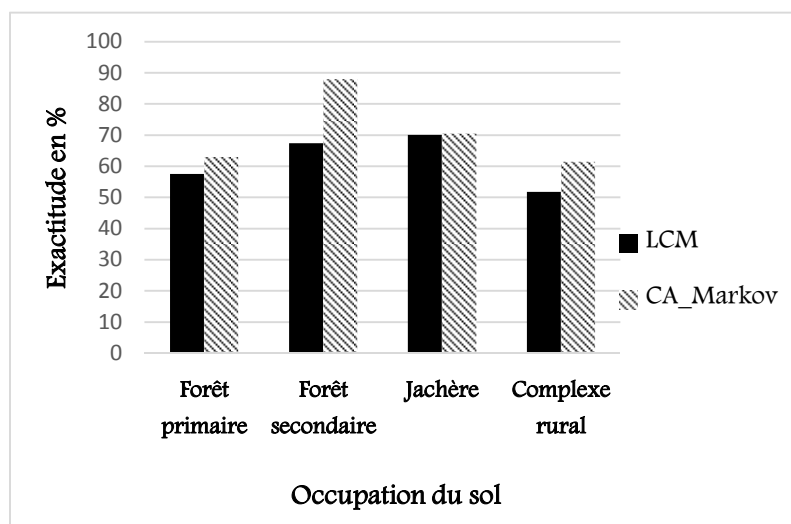


Figure 4 : Exactitudes dans la prédiction des classes (CA-Markov et LCM) comparées aux occupations observées

Les modèles présentent une surestimation par classe de 7,3% et 9,34% respectivement pour le CA\_Markov et le Land Change Modeler. Toute fois, ces erreurs apportent une dimension non négligeable quant à l'évolution future de la déforestation.

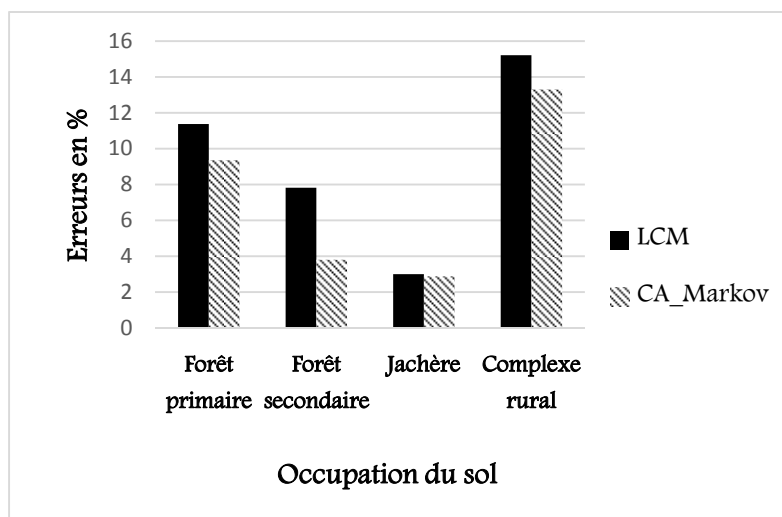


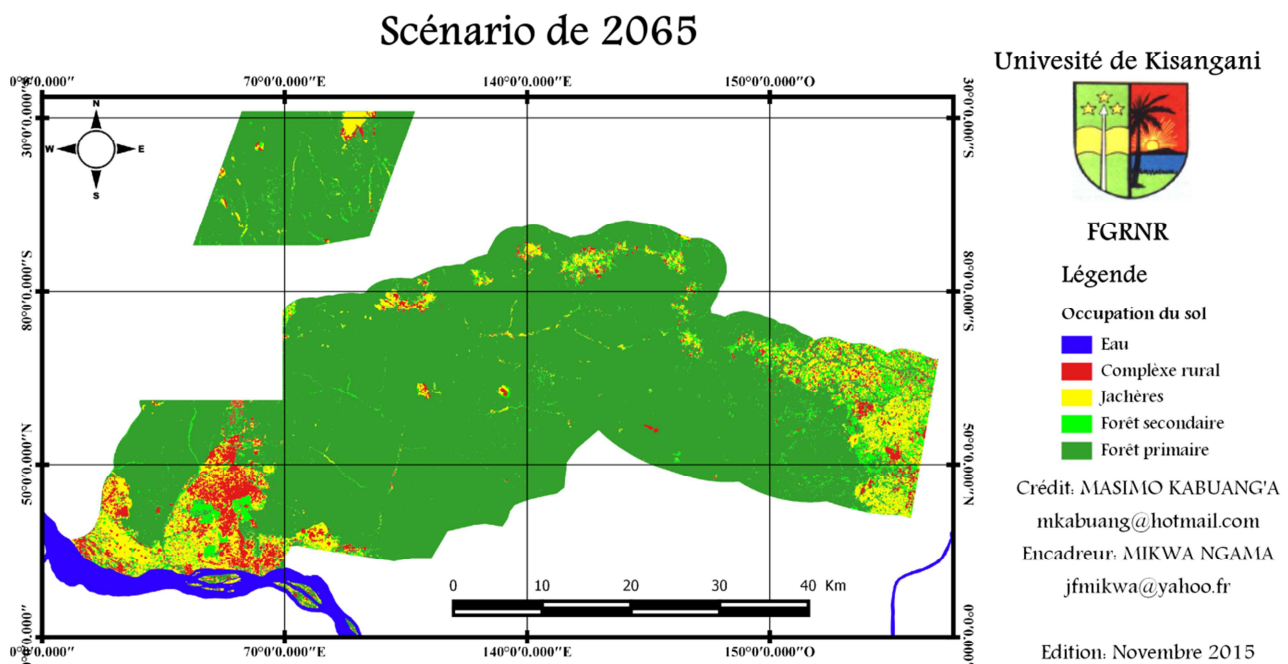
Figure 5: Erreurs dans la prédiction des classes (CA-Markov et LCM) comparées aux occupations observées

Logiquement, l'outil de modélisation CA\_Markov a été utilisé pour la simulation des occupations du sol à l'échéance de 2065. Pour rappel, la fiabilité de simulation dépend de la qualité des données calées aux modèles.

#### 4.3.1 PRÉSENTATION DU SCÉNARIO DE 2065

La réalisation des simulations a permis la création de la carte prédictive de 2065. La progression des formations anthropisées à la place des formations végétales naturelles affectera gravement la variabilité de l'écosystème. L'analyse de celle-ci fait ressortir plusieurs remarques quant à l'évolution de l'occupation des sols de la réserve de biosphère de Yangambi :

- ✓ Une densification du complexe rural dans le domaine foncier de l'INERA, aux alentours des localités N'gazi, Bengamisa et Bokau. Ce constat est prévisible dans la mesure où la proximité de la ville favorise ce type d'évolution. Le même phénomène tend à se reproduire, mais à un degré faible, le long de la route Weko-Bengamisa. Cette situation s'explique par l'état de cette route durant la période d'observation.
- ✓ La montée exponentielle de la classe des jachères à la place des forêts secondaires, les forêts primaires et des complexes ruraux. Cette allure paraît logique car les zones de culture sont mises en jachère. Mais aussi la proximité aux jachères influence la perte du couvert forestier plus particulièrement celui des forêts secondaires.
- ✓ Du point de vue forestier, bien qu'on assiste à une régression importante des forêts secondaires et les forêts primaires, toutefois, les forêts primaires gagnent le terrain partout où l'accès est difficile mais la perte est tellement importante que la tendance reste négative.



**Figure 6 : Carte prédictive de l'occupation du sol dans la réserve de biosphère de Yangambi à l'horizon 2065**

#### 4.3.2 EVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL ENTRE 2015 ET 2065 DANS LA RESERVE DE BIOSPHERE DE YANGAMBI

Les résultats prévisionnels du calcul de taux de changement entre 1986 et 2002 (Tc3) montrent que la classe « *Jachère* » présente une importante progression avec un taux de changement de 473,030 % de croissance durant une période de 50 années (tableau 13). D'autres changements importants tels que la diminution des surfaces des Classes « *forêt secondaire* » (-43,007%) et de « *forêts primaires* » (-33,769%) et la progression des surfaces de la classe « *complexe rural* » (137,270%).

Ce tableau entrevoit également le taux de déforestation dans la réserve entre 2015 et 2065 est de 6,090%. La classe de *Forêt secondaire* connaîtra une déforestation de 3,5149 %. Le comportement similaire s'observe pour la classe de *Forêt*

primaire (2,576%). En termes de superficie, la réserve risque de perdre 7292,67066 ha de forêt secondaire et 72320 ha de forêt primaire dans cinquante ans à venir.

Tableau 11: Changement d'occupation du sol et déforestation entre 2015 et 2065.

Classe	2065	2015	T4-T3	Tc1	Td
	Surface (ha)	Surface (ha)			
Eau	140,27269	141,0378	0,76511003	-0,5424	
Complexe rural	23213,59073	9783,59073	-13430	137,270	
Jachère	80194,8616	13994,8616	-66200	473,030	
Forêt secondaire	9663,981741	16956,6524	7292,67066	-43,007	-3,5149
Forêt primaire	141837,4089	214157,4089	72320	-33,769	-2,5758
<b>Total</b>	<b>255050,1157</b>	<b>255033,5514</b>			<b>-6,090</b>

T3 = surface à la date 3 (2015) ; T4 = surface à la date 4 (2065) ; Tc 3 = taux de changement entre les dates 1986 et 2002. Les aires des jachères ont sensiblement progressé pendant cette période (couleur jaune). A l'inverse, nous pouvons constater une forte diminution des surfaces de « Forêts secondaire » (couleur bleu). Td est non spécifié pour les zones non forêt (couleur noir).

## 5 DISCUSSION

La réserve de biosphère de Yangambi connaît un dynamisme anthropique important qui affecte la diversité biologique de cette réserve. Selon la vision du MAB, cette réserve est sensée assurer les fonctions de conservation, les fonctions de développement et les fonctions de support logistique. Face cette situation, l'utilisation rationnelle des terres semble être une meilleure solution pour concilier tous ces enjeux.

L'analyse diachronique étalée sur une période allant de 1986 à 2015 a permis de cartographier les occupations du sol en quatre dates : 1986, 2002, 2010 et 2015. L'évaluation de nos classifications indique que la classification de 2015 a une meilleure exactitude comparativement aux classifications autres classifications. Cette situation semble s'expliquer par la facilité qu'a le capteur OLI à discriminer les objets cibles sur la composition colorée. Toutefois, on peut noter que la qualité de la classification est liée à la résolution de l'image.

L'ampleur de la déforestation est visible sur la carte de 2015. La zone la plus affectée est celle située dans le domaine de l'INERA. La partie Est présente également des pertes importantes dans sa couverture forestière. En effet, ces deux zones bénéficient d'une accessibilité facile à partir du fleuve Congo, de la Kisangani Yangambi et de l'actuelle route Buta. Les tâches des complexes ruraux sont également présentes dans la partie nord de la réserve de biosphère. La partie centrale et la réserve forestière de N'Gazi ne sont très touchées par ces dynamismes.

En comparant la carte de 1986 et celle de 2002, on constate que les zones où il y a eu recul de forêts en 2002 sont localisées au niveau de petits points qui en 1986 appartenaient déjà à la classe complexe rural. Il y a donc une intensification notoire des actions des hommes sur les forêts de la réserve de biosphère à partir des points localisés déjà identifiés en 1986 comme anthropisés.

Le processus d'antropisation commence par des ouvertures qui sont utilisées par la population pour défricher les forêts. Ces ouvertures sont contiguës aux forêts secondaires avant les forêts primaires. En effet, ici le noyau est la classe de complexe rural, ensuite autour de ce noyau, on a la forêt secondaire avant d'atteindre la forêt primaire. Les jachères jouent un rôle tampon. Les forêts secondaires sont en effet très affectées par la déforestation suite à leur position par rapport au noyau. Cette assertion est étayée par l'analyse des taux de changement et de déforestation, qui montrent changements importants entre les classes des complexes ruraux et celles des forêts secondaires avec comme conséquence une forte intensité de la perte du couvert forestier plus particulièrement des forêts secondaires (Taux%).

D'une manière générale, ce dynamisme se résume par (i) la croissance de *complexe rural*, (ii) la régression inquiétante des *Forêts secondaires* et (iii) la stabilité relative des surfaces occupées par les « *Jachères et les forêts secondaires* ». La classe de l'*Eau* semble être la plus stable durant la même période d'observation (1986 à 2015).

L'augmentation des complexes ruraux peut s'expliquer par l'augmentation des zones cultivées dans la réserve. Noter que l'agriculture à Yangambi, comme partout en RDC, présente un caractère itinérant basé sur le système de brûlis. Cette méthode d'exploitation est non durable et nuit gravement à l'environnement portant ainsi atteinte à l'intégrité écologique de ce paysage. Ce ci s'observe sur la série de cartes d'occupation du sol avec l'apparition des taches des complexes ruraux.

Bien que l'agriculture ait été pointée du doigt par plusieurs travaux comme facteur premier de la déforestation [5], [11], [21], [22], [18], elle n'est pas l'unique facteur à la base de l'augmentation de surface des complexes ruraux. Les facteurs peuvent également expliquer ce phénomène, notamment l'extension de la ville de Yangambi et des villages, l'influence des voies de communications, le bois énergie etc.

L'affectation des terres devra donc tenir compte de la structure du paysage afin de limiter l'impact négatif des activités anthropiques sur l'écosystème. Logiquement les zones de mosaïque Jachère complexe rural devront faire l'objet des activités de développement durable. Par contre, les zones non fragmentées pourront servir à la conservation de la biodiversité exceptionnelle de Yangambi. La forêt en général pour ses populations constitue un enjeu économique et social important. La dégradation de ces forêts se traduit directement par une détérioration de leurs conditions de vie et met en danger leur mode de vie [7]. D'où l'importance de la sensibilisation pour son maintien et la préservation de la biodiversité qui s'y trouve. La figure ci-dessous récapitule l'évolution des surfaces par classe d'occupation du sol.

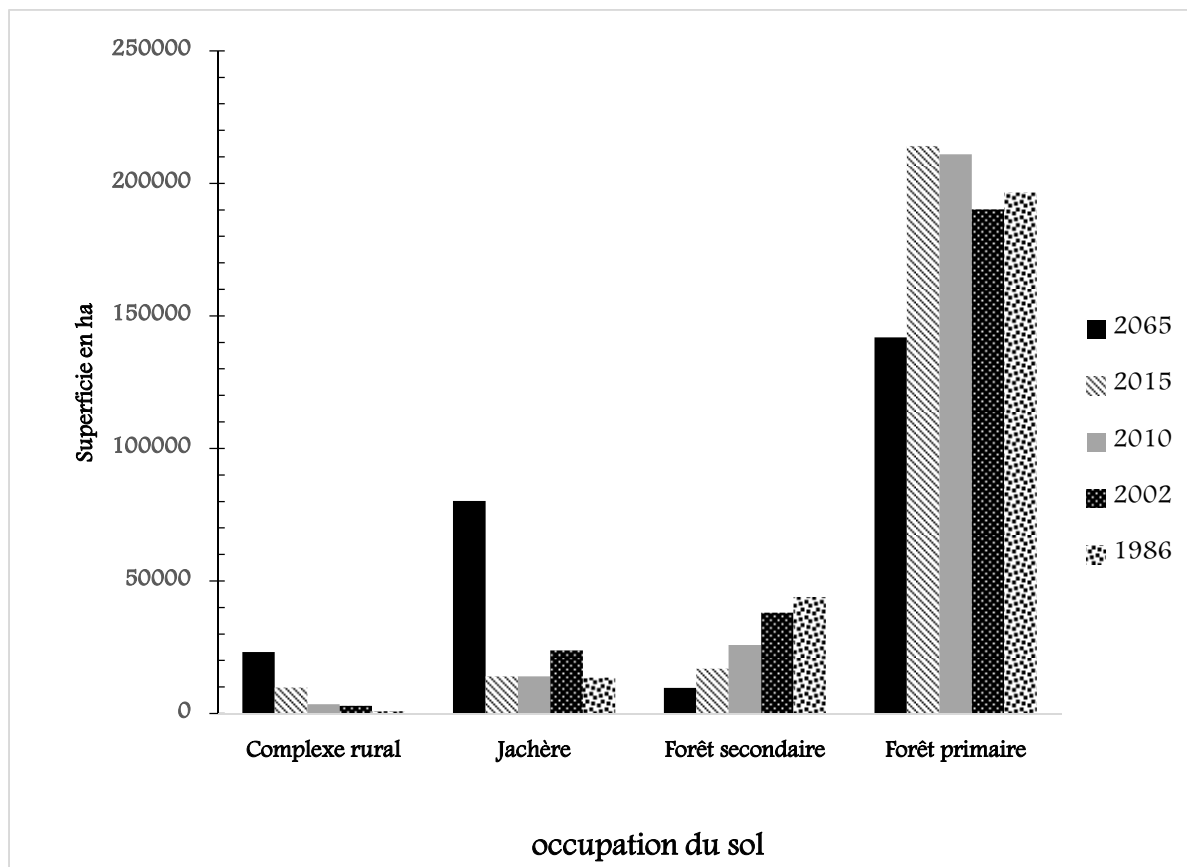


Figure 7 : Dynamique des occupations du sol entre 1986 et 2065

La modélisation de l'occupation du sol via les chaînes de Markov a permis de quantifier les changements probables et de mesurer les risques de déforestation à l'échéance 2065. En effet, deux outils de modélisations ont été comparés (le CA Markov et le Land Change Modeler). Cette comparaison révèle une part importante de la constance observée et simulée, 82 % pour CA Markov et 73 % pour LCM. Les deux modèles simulent bien les occupations du sol. Toutefois, les modèles prospectifs présentent quelques difficultés à simuler l'occupation du sol dans la dite réserve. Cette situation traduit donc la complexité des changements de l'écosystème de Yangambi qui ne doit pas s'expliquer seulement à l'aide d'un nombre limité des variables.

Il y a lieu de noter qu'à l'exception des variables calées aux modèles s'ajoutent d'autres variables dont la spatialisation et la quantification sont pratiquement impossibles. Il s'agit des facteurs politiques et institutionnels (pauvreté, chômage, conflits, code forestier, etc.), des facteurs démographiques (migration, distribution de la population), des facteurs culturels (consommation des ménages) et des facteurs économiques (coût du travail et du capital) etc.

Parmi les variables retenues, la distance par rapport aux complexes ruraux semble jouer un rôle important au regard des principaux changements observés entre 1986 et 2010. Ce constat est partagé par [23], dans l'analyse quantitative des causes



de déforestation et de la dégradation des forêts en RDC. Plusieurs auteurs ont également démontré l'influence considérable de l'agriculture sur la déforestation [5], [16],[18].L'importance de la distance aux routes, aux villages et la pente doivent également être soulignées.

La comparaison des occupations du sol observées et simulées en 2015 donne des résultats acceptables quant à l'allocation spatiale. Si LCM prédit autant d'occupations qu'il en omet, CA\_Markov affiche des résultats plus proches de ceux observés. L'observation des erreurs révèle que les erreurs d'allocations spatiales issues de LCM ont été nettement supérieures à celles de CA\_Markov. Ceci prouve la différence entre les deux modèles et permet de rejeter la troisième hypothèse.

La budgétisation des erreurs permet dire que le CA\_Markov abouti à des résultats plus concluants que le LCM. Toutefois, le présage d'une régression alarmante et continuelle si des mesures conséquentes ne sont pas mises en œuvre.

## 6 CONCLUSION

En considérant les résultats obtenus, il ya lieu d'affirmer que les analyses de l'imagerie LANDSAT (TM, ETM+ et OLI), partant de l'extraction jusqu'aux opérations post-classification, sont de qualité suffisante (Exactitude : **99, 13%** pour la mosaïque de 1986 ; **98,64 %** pour la mosaïque de 2002 ; **98, 78 %** pour la mosaïque de 2010 et **99,21%** pour la mosaïque de 2015 ) pour mettre en évidence que les dynamismes observés sur les images correspondent effectivement aux changements de l'occupation du sol durant ces 29 dernières années. En effet, il en découle de ce dynamisme qu'à la première période (1986 – 2002) les changements sont moins importants conduisant donc à une déforestation faible (1,1%). Par ailleurs, les changements sont alarmants à la seconde période d'observation (2002–2015) avec un taux de déforestation plus important de 4,31%. L'examen global de la période (1986–2015) permet d'affirmer la diminution inquiétante des forêts au profit des activités anthropiques dans la réserve (5,42% de déforestation).

L'ensemble de ces résultats cartographiques semble constituer une source objective d'informations quantitatives dont la qualité apparaît également à même d'autoriser un usage prédictif des modèles. Comme nous pouvons le constater à partir des résultats obtenus par des mesures directes et complétés par la modélisation prospective, l'écosystème forestier de la réserve est très affecté par la déforestation. Le nombre des variables pertinentes étant illimité, seules les variables spatialement explicites été prises en compte. Malgré des quantités proches de la réalité, les modèles présentent, dans l'ensemble, des difficultés à prédire les changements entre 1986 et 2010. Cette difficulté se traduit par les erreurs totales, pour les deux modèles, supérieures dix. La seconde hypothèse est approuvée.

La relation entre les changements observés et les variables explicatives indique que la distance aux concessions forestières et la distance au fleuve ne jouent pas un rôle important au regard des principaux changements observés entre 1986 et 2010. Généralement, ces transitions augmentent avec la proximité du complexe rural. L'intensité des changements d'occupation du sol diminue à mesure que la distance aux routes, aux villages et la pente augmente.

La comparaison de deux outils de modélisation (le CA Markov et le Land Change Modeler) révèle une part importante de la constance observée et simulée, 82 % pour CA Markov et 73 % pour LCM. Toutefois, les deux modèles simulent bien les occupations du sol. La comparaison des occupations du sol observées et simulées en 2015 donne des résultats acceptables quant à l'allocation spatiale. Si LCM prédit autant d'occupations qu'il en omet, CA\_Markov affiche des résultats plus proches de ceux observés. L'observation des erreurs révèle que les erreurs d'allocations spatiales issues de LCM ont été nettement supérieures à celles de CA\_Markov. Ceci prouve la différence entre les deux modèles.

La validation de ces modèles constitue une première étape à la modélisation prospective des occupations du sol à l'horizon 2065. CA\_Markov présente des résultats plus concluants que LCM et semble être à même de mieux prendre en compte les tendances d'évolution. Le LCM, de par son caractère non-supervisé, pourrait être plus adapté pour simuler des scénarii contrastés en restant totalement indépendant de la connaissance des experts. L'élaboration d'images issues de scénarii prospectifs tendanciel et contrastés favorisera l'identification de zones à enjeux socio-environnementaux concernant d'une part le milieu où les activités de développement peuvent être développées et d'autre part la préservation de la biodiversité. Le scénario de 2065 confirme la tendance actuelle. On constate sur la carte prédictive la diminution inquiétante des forêts avec des taux des changements négatifs. Ces taux permettent de confirmer la quatrième hypothèse.

La diminution de la pression sur les forêts de Yangambi passera assurément par la sédentarisation de l'agriculture. Les activités de développement que doit assurer la réserve de biosphère doivent mettre un accent particulier sur les pratiques de l'agriculture durable. Mais aussi le comité de pilotage de la réserve doit renforcer l'effectif des écogardes, matérialiser les limites de la réserve et élaborer un plan d'aménagement qui sera validé et mis en application.

## REFERENCES

- [1] B.B. Toirambe. *Plan d'Aménagement de la Réserve de Biosphère de Yangambi*. DRAFT. WWF-RDC, Kinshasa, RDC, pp. 69, 2011.
- [2] C. Ernst., A. Verhegghen., C. Bodart., P. Mayaux., C. Wasseige C., A. Bararwandika., G. Begoto., F. EsonoMba., M. Ibara., A. KondjoShoko., H. KoyKondjo., J.S. Makak., J.D. MenomoBiang., C. Musampa., R. NcogoMotogo., G. NebaShu., B. Nkoumakali., C.B. Ouissika., and P. Defourny., *Congo Basin forest cover change estimate for 1990, 2000 and 2005 by Landsat interpretation using an automated object-based processing chain*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII-4/C7, 2010.
- [3] C. K. Ilunga, *Cartographie par télédétection de l'occupation du sol dans la ville de Kisangani et sa périphérie entre 2002 et 2010*. Mémoire de D'Etude Approfondie, Faculté des Sciences, Université de Kisangani, Kisangani, République Démocratique du Congo, pp. 59, 2012.
- [4] C. Katembera., *Estimation par télédétection du taux de la déforestation dans la cuvette centrale congolaise : cas de la forêt d'Isangi, Province Orientale/RDC*, Mémoire de D'Etude Approfondie, Faculté des Sciences, Université de Kisangani, Kisangani, République Démocratique du Congo, pp. 47, 2013.
- [5] C. Megevand. *Dynamiques de déforestation dans le bassin du Congo: Réconcilier la croissance économique et la protection de la forêt*. World Bank, Washington, DC [ISBN : 978-0-8213-9838-8 ; DOI: 10.1596/978-0-8213-9827-2] 2013.
- [6] F. White. *La végétation de l'Afrique*. UNESCO, AETFAT et UNSO. 384p.  
<http://www.theses.ulaval.ca/2007/24216/ch03.html>, 1986.
- [7] F.A.O., *Recherches actuelles et perspectives pour la conservation et le développement*. Département des forêts FAO, Rome, Italie. (internet <http://www.fao.org/docrep/X2161F/X2161F00.htm>), 1999.
- [8] FACET, *Forêts d'Afrique Centrale Evaluées par Télédétection. Étendue et perte du couvert forestier en République démocratique du Congo de 2000 à 2010*. Université d'État du Dakota du Sud, Brookings, Dakota du Sud, États-Unis d'Amérique [ISBN: 978-0-9797182-5-0], 2010.
- [9] FIDA, *La Gestion de l'Environnement et des Ressources Naturelles: Une Préoccupation Croissante du FIDA*. CMA Terre. Unpubl. Report, 24pp. [En ligne : <http://www.youscribe.com/catalogue/presentations/actualite-et-debat-de-societe/activisme/la-gestion-de-l-environnement-et-des-ressources-naturelles-1042542>], 2001.
- [10] H. Balzter., *Markov chain models for vegetation dynamics*, Ecological Modelling, vol. 126, pp. 139-154, 2000.
- [11] I. Bamba., *Anthropisation et dynamique spatio-temporelle de paysages forestiers en République Démocratique du Congo*, Thèse, Université de Bruxelles, Belgique, pp. 205, 2010.
- [12] J. Bonnefoy., F. Bousquet., et J. Rouchier., *Modélisation d'une interaction individus, espace et société par les systèmes multi-agents : pâture en forêt virtuelle*, L'Espace Géographique, vol. 1, pp. 13-25, 2001.
- [13] J. Marechal, *Caractérisation de l'occupation du sol dans la ville de Kisangani (RD Congo) et sa périphérie entre 2002 et 2010*. Mémoire de master pour l'obtention du diplôme de bio-ingénieur en gestion des forêts et des espaces naturels. Agro bio tech. Université de Liège, Belgique, pp. 76, 2012.
- [14] J.R. Eastman., *The Land Change Modeler for Ecological Sustainability*, IDRISI Andes. Guide to GIS and Image Processing, Worcester, pp. 234-256, 2009.
- [15] J-F. Mas. M. Kolb., T. Houet., M. Paegelow., M.T.C. Olmedo. *Eclairer le choix des outils de simulation du changement des modes d'occupation et usages des sols*. Revue Internationale de Géomatique, Géomatique et occupation des sols, vol. 21, n°3 ; pp. 405-430, 2011.
- [16] J-N. Marien, *Forêts péri-urbaines et bois énergie : Quels enjeux pour l'Afrique centrale ?* In The Forests of the Congo Basin - State of the Forest 2008, Editors: de Wasseige C., Devers D., de Marcken P., Eba'aAtyi R., Nasi R. and Mayaux Ph., 2009, Luxembourg: Publications Office of the European Union, [ISBN 978-92-79-13210-0, doi: 10.2788/32259], 2009.
- [17] Jr. Pontius., D. Huffaker., K. Denman., *Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models*, Ecological Modelling, vol. 179, 445-461. DOI :10.1016/j.ecolmodel.2004.05.010, 2004.
- [18] L. Mbemba. *Impact de l'agriculture itinérante sur brûlis en République Démocratique du Congo : Préparation d'un atelier et étude de cas dans la réserve de biosphère de Yangambi*. Rapport de stage présenté en vue de l'obtention du grade académique de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement, Université Catholique de Louvain. 2012.
- [19] M. Boulogne., A. Pennec., E. Dubiez., M. Gigaud., A. Péroches., J. Lavielle., J. Rerolles., P. Proces., R. Peltier., J-N. Marien., V. Gond., *Dynamique d'évolution du couvert végétal et des stocks de carbone dans le bassin d'approvisionnement de la ville de Kinshasa*. Télédétection et carbone, Kinshasa, RDC, pp. 12, 2013.
- [20] N. Maestripiéri N. et Paegelow M., 2013. *Validation spatiale de deux modèles de simulation : l'exemple des plantations industrielles au Chili*, Cybergeo : European Journal of Geography | Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 653, [En ligne : <http://cybergeo.revues.org/26042> ] ; DOI : 10.4000/cybergeo.26042. Consulté le 13 mars 2015
- [21] N. Mikwa. *Assessment of forest degradation in the Yoko Reserve forest using remote sensing*. Mémoire de master. Gent University. Belgique, pp. 61, 2012.

- [22] N. Mikwa., *Evaluation par télédétection des effets de la déforestation et de la dégradation des forêts des environs des Kisangani cas de la région forestière de Masako*. Mémoire de DES. UNIKIS/FSA. Kisangani, RDC, pp. 51, 2010.
- [23] P. Defourny., C. Delhage., et L. Kibambe., *Analyse quantitative des causes de la déforestation et de la dégradation des forêts en République Démocratique du Congo*. Rapport final ; ULC/ELI-Géomatique Université Catholique de Louvain, Louvain-la-neuve, Belgique, pp. 104, 2011.
- [24] P. Coquillard., et D. Hill., *Modélisation et simulation d'écosystèmes. Des modèles déterministes aux simulations à évènements discrets*, Paris, France, 1997.
- [25] R.H. Andriamasimanana., E. H. Rasolomanana., C. Alison et J. Ratsimbazafy. *Étude des impacts écologiques du dynamisme spatio-temporel des habitats naturels sur la faune menacée du Complexe Zones Humides Mahavavy-Kinkony, Madagascar*. Madagascar conservation & development. Investing for a sustainable natural environment for future generations of humans, animals and plants of Madagascar pp. vol. 8, 86-90, 2013.
- [26] SPIAF, Service Permanent d'Inventaire d'Aménagement Forestier. *Normes de stratification forestière*. Guide opérationnel, Ministère de l'environnement conservation de la nature, eaux et forêts, Kinshasa, République Démocratique du Congo, pp. 23, 2007.