

## Modélisation de la dynamique du paysage forestier de la Réserve Spéciale d'Ambatovaky (Nord-Est de Madagascar)

L.O. Rakotondraso<sup>1\*</sup>, F. Malaisse<sup>2</sup> & J. Bogaert<sup>2</sup>

**Keywords:** Landscape dynamic- Forest- Ambatovaky- Madagascar

### Résumé

*Madagascar abrite une biodiversité unique qui doit faire face à de nombreuses menaces, dont l'anthropisation, entraînant la déforestation. Cette étude a pour objectif de déterminer la dynamique paysagère des forêts de la Réserve Spéciale d'Ambatovaky de 1996 à 2050 à partir d'une chaîne de Markov de premier ordre. Pour ce faire, des images Landsat datées de 1996, 2004 et 2014 ont été utilisées pour l'élaboration des cartes d'occupations de sol multi-dates. Une matrice de transition a ensuite permis de simuler la composition du paysage jusqu'en 2050. Les résultats ont montré que la superficie forestière de la Réserve diminue au profit d'une formation secondaire appelée « savoka » qui apparaît quelques années après la mise en culture temporaire. La culture sur brûlis, appelée localement « tavy », une pratique commune des paysans de la côte malgache, constitue la principale raison de la régression de la superficie forestière.*

### Summary

#### Modelling of the Forest Landscape Dynamics of Réserve Spéciale d'Ambatovaky (Northeast of Madagascar)

*Madagascar shelters a unique biodiversity that faces numerous threats, such as human activities, which cause deforestation. The objective of this study was to identify the landscape forest's dynamics of the Réserve Spéciale d'Ambatovaky (RSA) from 1996 to 2050 based upon a first order Markov chain model. For this purpose, LANDSAT images of 1996, 2004 and 2014 were used to compose the land cover maps. A transition matrix made it possible to simulate the composition of the landscape until 2050. The results showed that the forest area of RSA decreased and is substituted by a secondary formation called "savoka" that appears several years after the end of agricultural activities. Slash-and-burn agriculture, called locally "tavy", is a common practice of farmers in the coastal areas of Madagascar. Tavy is the main reason for the decline of the forest area.*

<sup>1</sup>Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département des Eaux et Forêts, Antananarivo, Madagascar.

<sup>2</sup>Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Gembloux, Belgique.

\*Auteur correspondant: Email: olivia.rakotondraso@yahoo.fr

Reçu le 23.03.17 et accepté pour publication le 19.06.17

## Introduction

Madagascar est connu mondialement pour la richesse de sa biodiversité terrestre et marine unique et exceptionnelle. Plus de 12.000 espèces végétales y sont répertoriées, dont le degré d'endémisme a été estimé à des valeurs comprises entre 82 et 90% (14, 15, 21). En outre, le taux d'endémisme de la faune est également élevé, étant de l'ordre de 80% (6). Mais, parallèlement à cette richesse, il faut prendre conscience d'une poussée démographique préoccupante avec un taux d'accroissement de 2,62% en 2014 (34). À l'échelle mondiale, la déforestation a plus ou moins suivi le rythme de la croissance démographique (12). En effet, les causes de la déforestation sont en relation avec l'augmentation de la croissance démographique, entre autres par la nécessité de plus de terres pour la production agricole. La poussée démographique est également la cause principale de la déforestation en Afrique et certainement à Madagascar (10). La déforestation de la Grande Ile résulte de défrichements et de la pratique de cultures itinérantes sur brûlis et de l'exploitation forestière en vue de fournir les besoins en bois d'œuvre et de construction, ainsi que la production de bois d'énergie de la population locale (4, 6, 10, 19, 28). Le taux annuel de déforestation de la Grande Ile était de 0,3% de 1950 à 1970; il a augmenté et a atteint 1,7% pour la période 1970 à 1990 (16).

Face à la menace qui pèse sur la biodiversité de Madagascar, le gouvernement malgache a établi en 1990 la première version de la Charte de l'Environnement qui a pour finalité d'enrayer la spirale de dégradation de l'environnement (26). La création des aires protégées figure parmi les solutions entreprises. Les aires protégées, gérées par Madagascar National Parks (MNP), jouent plusieurs rôles à la fois: lieux de conservation de la biodiversité; lieux d'éducation relative à l'environnement; lieux de récréation et de découverte; et lieux de recherche et pôles de développement économique. Les stratégies de conservation de MNP sont basées et développées de manière systématique et scientifique selon un Plan de Gestion et de Conservation (PGC). Le PGC évalue les menaces sur les cibles de conservation, les moyens et capacités de gestion. Ces informations sont ensuite utilisées pour développer la stratégie de conservation, dont le système de surveillance et de contrôle forme l'outil principal de la conservation. Suite à la mise en place des aires protégées, le taux annuel de déforestation malgache a diminué et a été de 0,41% entre 1990 et 2010 (13); spécifiquement, il est de 1,7% entre 2005 à 2011 pour la forêt humide du Nord-Est (32). Cependant, ces valeurs sont considérables en regard du taux mondial qui est de 0,14% entre 1990 et 2010 (13).

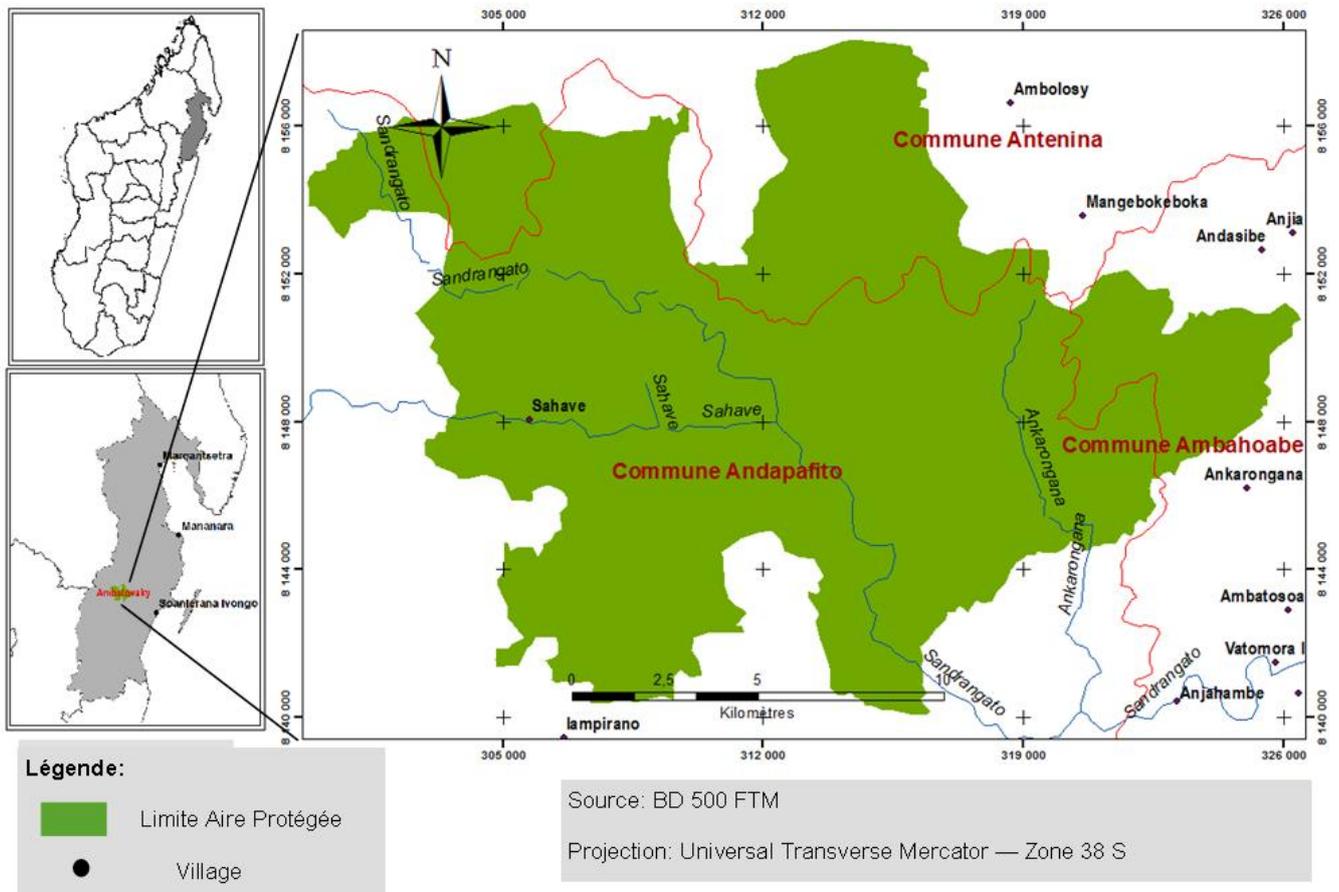
Notre recherche se situe dans ce cadre; elle a pour objectif d'étudier la dynamique spatio-temporelle d'une aire protégée de Madagascar, à savoir la Réserve Spéciale Ambatovaky (RSA), qui constitue une des plus grandes réserves spéciales malgaches ayant une vaste forêt de basse altitude. Notre étude vise également à dégager la tendance évolutive de la RSA à l'horizon 2050, en termes d'occupation du sol. A cette fin, nous avons retenu comme hypothèse de travail que les pratiques culturelles, notamment l'agriculture itinérante sur brûlis ou «tavy», favorisent la régression du couvert forestier du paysage d'Ambatovaky, malgré son statut d'aire protégée. Le « tavy » est un terme malgache pour désigner le déboisement de la forêt primaire par abattage suivi de brûlis en vue de la culture du sol (13). Une croissance démographique non accompagnée d'une croissance économique pourrait être fatale à la situation de la population, menaçant la pérennisation des ressources naturelles. En effet, pour maximiser les productions agricoles, en réponse à l'accroissement démographique très rapide, l'agriculture sur brûlis reste la principale technique de production vivrière dans la région. Après quelques années (2 à 5 ans) de production, la parcelle est laissée à l'abandon et la population va défricher une autre partie de la forêt. La végétation secondaire qui se développe sur le « tavy » abandonné, pour quelques années, est dénommée «savoka» (13). Ce dernier peut être aussi l'objet d'un nouveau défrichement par la population locale.

## Matériels et méthodes

### Zone d'étude

Ambatovaky est située dans la partie Nord-Est de Madagascar (Figure 1), elle appartient au district de Sonierana Ivongo et à la Région administrative d'Analanjirifo. La zone est soumise à un climat tropical humide de type perhumide chaud. Ce type de climat se caractérise par l'absence de saison sèche. Les précipitations moyennes annuelles s'élèvent à 2000 mm réparties sur 180 jours, quant à la température, ses valeurs moyennes mensuelles sont comprises entre 21 °C 87 (février) et 24 °C (septembre) (18).

La RSA a été créée en 1958. Cette Aire Protégée, gérée par Madagascar National Parks (MNP) est classée dans la catégorie IV selon l'UICN, c'est-à-dire, aire protégée principalement à des fins de conservation, avec intervention au niveau de la gestion. Elle est localisée entre les points 16°43'21" et 16°43'58" de latitude Sud et 49°01'07" et 49°15'06" de longitude Est, et s'étend sur environ 78 000 ha (18). La zone présente un relief accidenté, avec des pentes abruptes localement. L'altitude est comprise entre 314 m au niveau de Sandragato et 1175 m à l'ouest, au mont Ambatovaky.



**Figure 1:** Localisation de la Réserve Spéciale d'Ambatovaky (Projection WGS 84).

Le réseau hydrographique de la réserve est important. La réserve est principalement caractérisée par une Forêt Dense Humide Sempervirente (FDHS); elle constitue une excellente représentation de l'écorégion de la forêt humide de l'Est. Cette dernière abrite une biodiversité originale très élevée et possède un taux d'endémicité important. 291 espèces de plantes y ont été recensées, dont 221 sont endémiques à Madagascar (18). Ces 291 espèces sont réparties dans 159 genres et 59 familles. Notons l'existence de 5 familles endémiques de Madagascar: *Asteropeiaceae*, *Melanophyllaceae*, *Physenaceae*, *Sarcolaenaceae* et *Sphaerosepalaceae*. La réserve abrite 31 espèces de mammifères dont 11 lémuriens, 13 insectivores, 3 carnivores et 4 rongeurs; 110 espèces d'oiseaux, 113 espèces Herpetofauniques puis 34 espèces de poissons (18).

### Méthodologie

L'image satellite est une source d'informations abondantes et précises sur l'occupation du sol et sur les phénomènes qui se déroulent à la surface de la planète (8). Trois images satellitaires, datées de 1996, 2004 et 2014, ont été utilisées dans le cadre de cette étude (tableau 1).

Ces images LANDSAT ont été téléchargées via le portail Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) de l'USGS (United States Geological Survey). Elles se trouvaient en LPGS (Level 1 Product Generation System) et contiennent encore des erreurs géométriques et radiométriques. Par conséquent, il leur a été appliqué des corrections radiométriques systématiques et d'amélioration des précisions géométriques en utilisant des Ground Control Points provenant de GLS 2000 (Global Land Survey 2000) et d'ajustement topographique par le biais de l'utilisation d'un DEM (SRTM) (33).

**Tableau 1**  
Liste des images utilisées et leurs caractéristiques

Période	Capteur LANDSAT	Identification de l'image	Résolution (en m)	Date d'acquisition
1996	TM	LT51580721996363JSA03	30	28/12/1996
2004	TM	LT51580722004193JSA00	30	11/07/2004
2014	OLI/TIRS	LC81580722014236LGN00	30	24/08/2014

Des prétraitements ont été opérés afin de réajuster les valeurs radiométriques et spectrales et de minimiser les variabilités atmosphériques tenant compte la nature multi date des images utilisées. Les calibrations ont été ainsi appliquées sur les bandes multispectrales afin de transformer les valeurs DN (Digital Number) en des unités radiance et ToA (Top of Atmospheric) réflectance. Le DOS (Dark Object Subtraction) a été par la suite implémenté afin de ramener les valeurs spectrales à zéro ou en d'autres termes de réduire les effets de diffusion atmosphérique à un seuil minimal (9).

Par la suite, une classification supervisée a été effectuée avec l'image datée de 2014, en utilisant le l'algorithme du maximum de vraisemblance via le logiciel de traitement d'image ENVI. C'est une classification par zones d'entraînement représentatives formées par les points relevés sur terrain des principaux types d'occupation du sol, respectivement 122, 87 et 69 observations pour les classes «forêt», «savoka» et «champs de culture». En effet, dans cette analyse de l'évolution globale de l'occupation du sol, trois classes thématiques ont été retenues. Il s'agit: d'une classe «forêt» (Photo 1) regroupant les forêts naturelles et les forêts pour les cultures de sous-bois, notamment pour la vanille; d'une classe «savoka» (2) (Photo 2) associant les végétations secondaires de quelques années et d'une classe «champ de culture», constituée par des rizières, des champs de manioc et patate douce entre autres et les jachères d'un à deux ans (Photo 3). Les jeunes jachères ont été incluses dans la classe «champs de culture» car elles comportent essentiellement des plantes herbacées, entre autres *Lantana camara*, *Aframomum angustifolium*, *Rubus* sp. (17), et par conséquent, elles ont été souvent confondues avec les champs de culture au cours de la classification de l'image Landsat.

La carte obtenue a été vérifiée au cours d'une mission de validation sur le terrain en mois d'avril 2015 permettant d'élaborer une matrice de confusion et de calculer l'indice Kappa, pour estimer l'exactitude de la classification. La matrice de confusion est un tableau à double entrée dans lequel sont confrontés la réalité sur le terrain et le résultat de la classification. Il permet d'évaluer l'intensité de la liaison entre des données de référence et le résultat de la classification.

Sur le tableau de la matrice de confusion, les erreurs de classifications sont totalisées. Il existe deux types d'erreurs: les erreurs d'omission dans le cas où des points de référence d'une catégorie sont attribués à une autre catégorie; et les erreurs de commission dans le cas contraire où les points d'une catégorie lui sont attribués par erreur. En complément de ces deux types d'erreur, la valeur du coefficient kappa ( $\kappa$ ) a été calculée (25). Ce coefficient mesure l'intensité de la concordance réelle entre deux jugements catégoriels appariés; il est proche de 0 lorsque la concordance est peu significative et de 1 lorsque la concordance est très forte.

Les caractéristiques spectrales des classes d'occupation du sol obtenues suite à la classification finale de l'image Landsat 2014 ont été utilisées comme base pour une classification supervisée par maximum de vraisemblance des images datées de 2004 et de 1996. Sur base des cartes multi-dates obtenues, la simulation de l'évolution future des classes d'occupation de la zone d'étude a été réalisée à l'aide de l'élaboration d'une matrice de transition (5, 27) et de l'utilisation d'une chaîne de Markov (29, 30). La matrice de transition a servi à construire une matrice de probabilités annuelles qui représente le changement d'état d'une classe sur l'horizon d'un an (30). Les taux des superficies des classes du paysage en 1996 ont été transcrits en un vecteur. En considérant l'occupation du sol comme un processus stochastique (22) et les différents changements comme des états de cette chaîne (31), le produit de la matrice de probabilités annuelles et du vecteur représentant la composition du paysage d'une année particulière en utilisant une chaîne de Markov de premier ordre permet de simuler la superficie des classes du paysage à une date ultérieure. La simulation obtenue a été vérifiée et validée en comparant la composition paysagère simulée avec celle observée respectivement sur les images 2004 et 2014 par l'intermédiaire des tests  $\chi^2$ . L'année 2050 a été choisie comme année de projection dans la simulation. Ce choix a été basé sur les objectifs d'Aichi (7), qui est un plan stratégique en faveur de la biodiversité stipulant que «d'ici 2050, la diversité biologique est valorisée, conservée, restaurée et utilisée avec sagesse, en assurant le maintien des services fournis par les écosystèmes, en maintenant la planète en bonne santé et en procurant des avantages essentiels à tous les peuples».



(Rakotondrasoa, 2015)

**Photo 1:** Forêt Dense Humide Sempervirente de la Réserve Spéciale d'Ambatovaky.



(Rakotondrasoa, 2015)

**Photo 2:** «Savoka» à Ambavala (formations secondaires apparaissant quelques années après la mise en culture temporaire).

## Résultats

### Matrice de confusion et Indice de Kappa relative à la classification de l'image de 2014

L'évaluation de la classification de l'image de 2014 est représentée par la matrice de confusion (Tableau 2). Les valeurs en diagonale indiquent le nombre de pixels bien classés (la classification effectuée sur ordinateur correspond à la réalité sur terrain) et ceux hors diagonale le nombre de pixels mal classés pour chaque unité d'occupation du sol. Le rapport de la somme des pixels bien classés sur le total de pixels utilisés dans la classification nous donne le pourcentage de classification global qui est de l'ordre de 84,1%. En effet, sur les 126 points GPS collectés sur terrain, 106 correspondent à la classification. L'analyse de cette matrice permet aussi d'avancer que le niveau de précision de la classe «savoka» a été le plus faible: sur les 57 points GPS collectés dans cette catégorie, 45 correspondent à la classification de l'image satellite, soit 79%; le reste a été confus aux deux autres types d'occupation du sol. Ce niveau de précision serait dû à l'hétérogénéité structurale et spécifique de la physionomie du «savoka» en fonction de son âge. En effet, on distingue trois types de savoka selon leur âge, à savoir: (i) savoka jeune de deux à cinq ans qui peut atteindre deux à trois mètres de hauteur avec quelques arbustes; (ii) savoka d'âge moyen de cinq à dix ans à l'intérieur duquel les arbustes commencent à dominer en éliminant peu à peu les plantes herbacées; et (iii) savoka vieux de plus de 10 ans avec une dominance des arbustes et de *Ravenala madagascariensis* et d'autres espèces pionnières telles que *Harungana madagascariensis* et *Albizia lebeck* (17).

L'indice de Kappa est un indice qui permet de «retirer» la portion de hasard ou de subjectivité de l'accord entre les techniques. Après calcul, l'indice Kappa est égal à 82%. D'après Pontius, une étude de l'occupation du sol peut être validée si  $\kappa > 50\%$  (25); cela permet de conclure que le résultat de la classification de l'image 2014 est statistiquement acceptable.

### Cartographie d'occupation du sol par époque

Les classifications des images Landsat ont permis d'obtenir trois cartes d'occupation du sol datées de 1996, 2004 et 2014 (Figure 1) avec chacune trois classes.

Les proportions des classes d'occupation du sol du paysage de la RSA pour les trois années d'études sont présentées dans le tableau 3. On en déduit que le paysage de la RSA est dominé par la classe «forêt», mais avec une régression notable (d'environ 82 à 68 %). Les 18% à 32% restants sont formés par les «savoka» et les «champs de culture». Les tests  $\chi^2$  indiquent que les distributions de la proportion des différents types d'occupation du sol de la RSA ne sont

pas significativement différentes entre les années 1996 et 2004 ( $\chi^2 = 28,67$ ;  $p > 0,05$ ). Par contre, la différence des distributions est significative entre les années 2004 et 2014 ( $\chi^2 = 132,29$ ;  $p < 0,05$ ): il y a eu donc un changement significatif pour la deuxième période. Le changement majeur d'occupation du sol de la Réserve au cours de la période 2004-2014 a été une augmentation d'environ 47% de la superficie des «savoka» ainsi qu'une augmentation de 43% de la classe «champs de culture» qui sont respectivement passés de 4489 ha à 6592 ha et de 1053 ha à 1501 ha.

Pour la totalité de la période d'étude (1996-2014), les distributions de la proportion des classes d'occupation du sol présentent une différence significative ( $\chi^2 = 31,92$ ;  $p < 0,05$ ): on assiste à une nette régression de la superficie forestière (20753 ha en 1996 et 17131 ha en 2014, soit une perte de 17,5% correspondant à un taux annuel de déforestation de 0,9%). Si on raisonne selon deux périodes, les taux de déforestation annuels de la RSA sont de 0,6% entre 1996 et 2004 et de 1,3% entre les années 2004 et 2014.

### Dynamique du paysage

La figure 3 illustre les changements observés de 1996 à 2014 dans une partie de la zone d'études. Les changements d'occupation de sol survenus dans RSA pendant les deux périodes 1996-2004 et 2004-2014 sont présentés dans les tableaux 4 et 5. Chaque valeur des tableaux correspond à la proportion de l'aire convertie de la classe indiquée sur la ligne vers la classe en tête de colonne; et les valeurs en gras indiquent les taux de permanences des classes. A titre d'exemple (pour la première ligne du tableau 4): sur 82,3% de la surface du paysage qu'occupait la forêt en 1996, 75,5% sont restés intacts; 5,5% ont été dégradés et convertis en «savoka» et 1,3% convertis en champs de culture.

Selon les tableaux 4 et 5, la forêt s'est révélée être la classe qui a subi la plus grande conversion, plus précisément des régressions. En effet, sur les 82,3% qu'occupait la forêt en 1996; 5,5% ont été convertis en «savoka» et 1,3% en «champs de culture» en 2004. Ainsi, en 2004, la proportion restante de la «forêt» était de 78,0%. Avec la dégradation continue des forêts, cette proportion n'a pas cessé de diminuer et la forêt n'occupait plus que 67,9% de la RSA;

Concernant la classe «champs de culture», sa superficie reste plutôt stable (5,5% en 1996, 4,2% en 2004 et 6,0% en 2014). Par contre, si on examine bien les tableaux 4 et 5, on peut voir que le taux de permanence de cette classe (sur les diagonaux, en gras) est faible. Autrement dit, la population exploite les terrains seulement pendant quelques années et change de terrains à cultiver au fur et à mesure du temps.



(Rakotondrasoa, 2015)

**Photo 3:** Champs de culture à Ambinaniroa (culture de riz pluvial sur «tavy» ou culture sur brûlis).

**Tableau 2**

Matrice de confusion de la classification de l'image de 2014

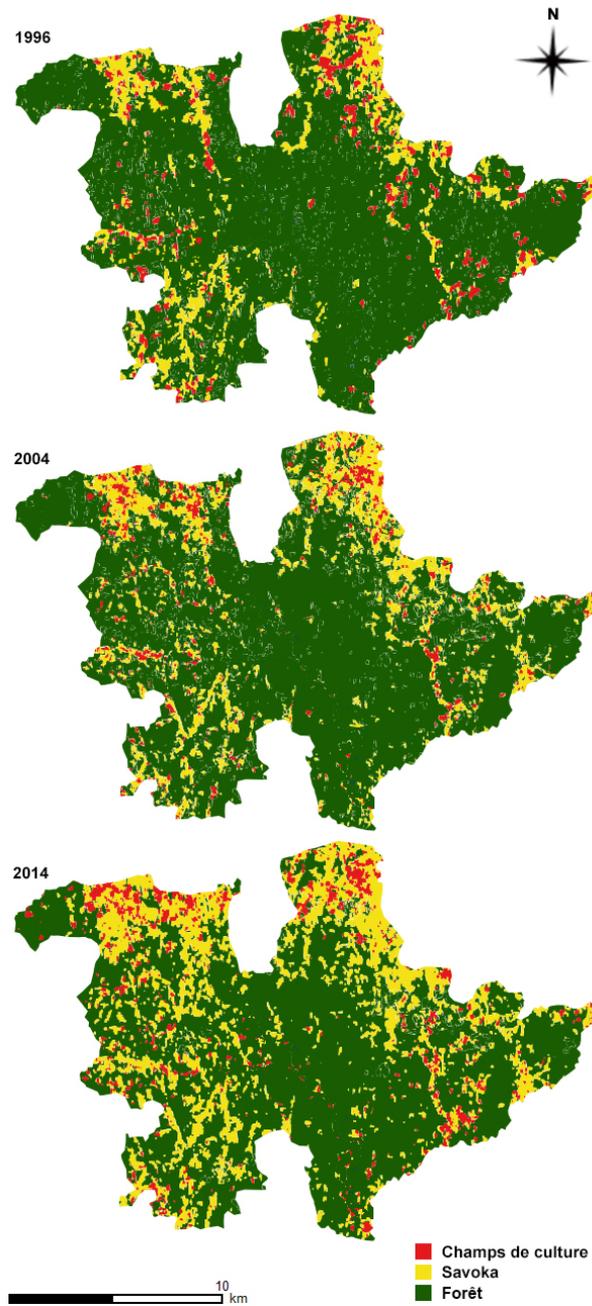
	Points de contrôle			Total	Erreur de commission (%)
	Forêt	Savoka	Culture		
Classification Forêt	34	4	0	38	10,53
Savoka	8	45	4	57	21,05
Culture	0	4	27	31	12,9
Total	42	53	31	126	
Erreur d'omission (%)	19,05	15,09	12,9		

**Tableau 3**

Proportions des classes d'occupation du sol du paysage de la Réserve Spéciale d'Ambatovaky pour les trois années d'étude

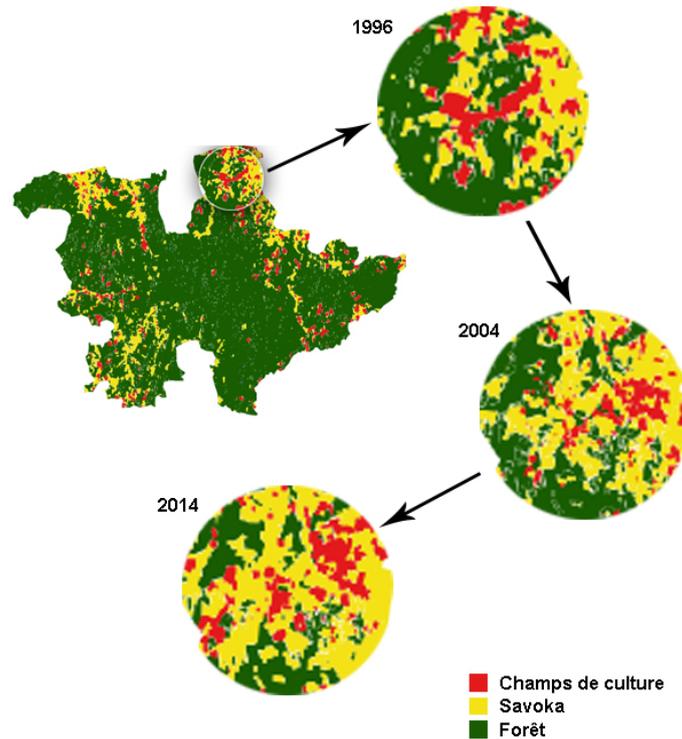
Année	Forêt		Savoka		Champs de culture	
	Superficie (ha)	Proportion (%)	Superficie (ha)	Proportion (%)	Superficie (ha)	Proportion (%)
1999	20753	82,3	3093	12,2	1377	5,5
2004	19681	78	4489	17,8	1053	4,2
2014	17131	67,9	6592	26,1	1501	6

(Les données sont issues des cartes élaborées à partir des images Landsat datées de 1996, 2004 et 2014)



(Obtenue après classification des images LANDSAT , projection WGS84)

**Figure 2:** Cartes d'occupation du sol de la Réserve Spéciale d'Ambatovaky en 1996, 2004 et 2014.



(Obtenue sur base des cartes d'occupation du sol issues des classifications des images LANDSAT datées de 1996, 2004 et 2014 de la Réserve Spéciale d'Ambatovaky)

**Figure 3:** Illustration des changements observés au niveau de la Réserve Spéciale d'Ambatovaky entre 1996 et 2014.

**Tableau 4**

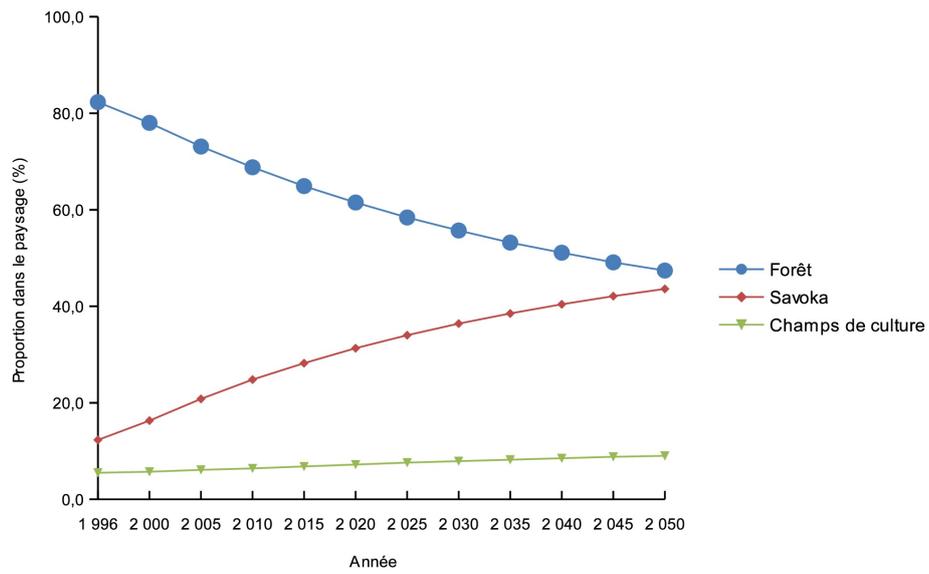
Matrice de transition illustrant, en pourcentage (%) la surface des types d'occupation du sol du paysage de la RSA [données de 1996 (lignes) et 2004 (colonnes)].

	2004			
1996	Forêts	Savoka	Champs de culture	Totaux
Forêts	75,5	5,5	1,3	82,3
Savoka	1,1	9,1	2	12,2
Champs de culture	1,4	3,2	0,9	5,5
Totaux	78	17,8	4,2	100

**Tableau 5**

Matrice de transition illustrant, en pourcentage (%) la surface des types d'occupation du sol du paysage de la RSA [données de 2004 (lignes) et 2014 (colonnes)].

	2014			
2004	Forêts	Savoka	Champs de culture	Totaux
Forêts	66,3	9,1	2,6	78
Savoka	1,5	14,4	1,9	17,8
Champs de culture	0,1	2,6	1,5	4,2
Totaux	67,9	26,1	6	100



(Obtenu à partir de l'utilisation de la Chaîne de Markov sur base des cartes d'occupation du sol datées de 1996, 2004 et 2014 de la Réserve Spéciale d'Ambatovaky)

**Figure 4:** Dynamique de l'occupation du sol de la Réserve Spéciale d'Ambatovaky de 1996 à 2050.



(Rakotondrasoa, 2012)

**Photo 4:** «Tavy» à Ambavala (destruction de la forêt primaire par abattage suivi de brûlis en vue de la culture du sol).

Les nouveaux terrains de culture sont issus à la fois du défrichement de la forêt et des «savoka», comme indiquent les tableaux 4 et 5 à travers les proportions de ces deux types d'occupation du sol converties en champs de culture pour les deux périodes d'étude. En conséquence, pour les deux périodes, une augmentation considérable de la superficie des «savoka» a été notée. En 1996, le «savoka» occupait 12,2% de la superficie de la RSA; cette proportion a augmenté et a atteint 17,8% en 2004 et 26,1% en 2014 (soit une augmentation de 45,9% entre 1996 et 2004 et de 46,6% entre 2004 et 2014). Cette augmentation est liée à la conquête périodique de nouveau terrain de culture par la population locale. En effet, les terrains de culture laissés évoluent en «savoka», qui sont des formations secondaires composées par des espèces à croissance rapide. Et cette conquête de terrain est une des principales causes de la déforestation; la population défriche la forêt pour la convertir en champs de culture. La simulation de l'évolution future de l'occupation du sol de 1996 à l'horizon 2050 est présentée dans la figure 4. Les tests de comparaison de la composition paysagère simulée avec celle observée sur les cartes ont affichées les valeurs suivantes  $\chi^2 = 29,6$ ;  $p > 0,05$  et  $\chi^2 = 17,2$ ;  $p > 0,05$  respectivement pour l'année de vérification 2004 et pour l'année de validation 2014. Autrement dit, il n'y a pas de différence significative entre la proportion des types d'occupations du sol issue de la simulation et ceux des cartes élaborées pour les deux années 2004 et 2014. En conséquence, la simulation obtenue est vérifiée, validée et jugée recevable.

La simulation obtenue montre que la forêt et le «savoka» occuperont presque la même superficie en 2050. En effet, la couverture forestière diminuera progressivement. Elle occupait 82,3% du paysage total en 1996 et serait de 47,4% en 2050. La réduction de cette classe s'effectuerait principalement en faveur de l'augmentation de la superficie des «savoka», qui passeront de 12,3% en 1996 à 43,6% en 2050. Concernant les champs de culture, leurs superficies vont connaître une augmentation: 5,5% en 1996 et 9,0% en 2050. Il est à signaler que ces tendances partent 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 1996 à 2014; cette hypothèse correspond au principe de la «stationarité» (30).

## Discussion

Sur le plan méthodologique, l'étude cartographique et la production des cartes à partir du traitement d'images satellites par télédétection ont permis de détecter l'évolution spatiale et temporelle de l'occupation du sol. La validation de la classification effectuée sur ordinateur grâce aux relevés de points GPS sur terrain a permis de confirmer les cartes produites. En effet, la matrice de confusion a permis de calculer la précision globale de la classification et l'indice Kappa, qui sont respectivement 84,1% et 78,9%. L'élaboration des cartes multidates a ressorti où ont eu lieu les changements d'occupation du sol de la RSA et quelle a été la superficie d'une classe convertie en une autre classe.

Par ailleurs, la chaîne Markov a été choisie pour effectuer la modélisation de la dynamique du paysage forestier de la RSA. En effet, pour maîtriser l'évolution de ces processus de transformation du paysage, il est important de 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 (3). La chaîne de Markov a permis d'appréhender les changements de catégorie au niveau des classes d'occupation du sol pour les deux périodes d'études 1996-2004 et 2004-2014. Elle a l'avantage de fournir une méthode de complexité limitée par laquelle un système dynamique pourrait être détaillé et examiné (3). 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 (23).

Pour la première période d'étude, c'est-à-dire entre 1996 et 2004, la couverture forestière de la RSA a régressé avec un taux annuel de déforestation égal à 0,6%. Ce taux est bas comparé à celui que Zaehring a ressorti pour toute la forêt humide du Nord-Est de Madagascar qui est de 1% pour la période de 1995-2005 (32). Cependant, pour presque les mêmes périodes, ce taux est élevé par rapport au taux moyen annuel de déforestation des aires protégées malgaches qui est de 0,3% entre 1990 et 2000 (24). En outre, entre les années 2004 et 2014, la déforestation de la RSA a eu plus d'ampleur, une perte annuelle de forêt d'environ 1,3% a été enregistrée. Ce taux rejoint celui trouvé par Allnutt *et al.* pour le parc national Masoala entre 2010 et 2011 qui est de 1,27% (1). Cependant, pour d'autres forêts de l'Est, les taux de déforestations restent stables, c'est le cas du corridor Manompana avec un taux de 1,07% entre 1991 et 2004 et 1,09 entre 2004 et 2009 (11). Ainsi, on peut conclure que la couverture forestière de la RSA a diminuée malgré son statut

d'aire protégée. Les actions de conservation ne se limitent pas à la seule protection des ressources naturelles, mais elles sont inséparables des actions de développement économique et social. Une croissance démographique non accompagnée d'une croissance économique pourrait être fatale à la pérennisation des ressources naturelles, car, dans ce contexte, la population devra avoir recours aux ressources naturelles. En effet, la zone d'étude présente un taux de croissance démographique annuel élevé d'environ 2,8% entre 2011 et 2014 (35). Cet accroissement démographique engendre de sérieux problèmes d'insuffisance de parcelles culturales et de migration. Cette difficulté est ressentie progressivement par les familles paysannes qui exploitent les mêmes parcelles dont elles ont héritées de leurs parents et grand-parents. La migration se manifeste par le déplacement vers les régions plus fertiles et surtout à la périphérie des forêts primaires.

Les tendances obtenues suite à la simulation à partir de la chaîne de Markov de premier ordre, ont révélé une diminution de la superficie forestière de la RSA. Ces tendances partent 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 1996 à 2014. Il en découlerait que la couverture forestière va diminuer au profit principalement des «savoka», des formations secondaires post-culturales (1).

L'augmentation de la superficie des «savoka» découle du développement et de l'extension du «tavy» (photo 4). Notre hypothèse stipulant que «les pratiques culturales, notamment l'agriculture itinérante sur brûlis ou «tavy», favorisent la régression du couvert forestier du paysage d'Ambatovaky, malgré son statut d'aire protégée» est ainsi acceptée. La limitation spatiale incite les paysans à cultiver le riz sur «tavy». Le fond du problème réside donc dans le fait que l'intensification

de la production agricole ne peut plus suivre les évolutions démographiques du milieu rural (20). En effet, les populations dictées par leurs besoins accrus sont contraintes à conquérir de nouveaux terrains pour l'agriculture de subsistance dans certaines régions à Madagascar (10).

Dans le cas d'Ambatovaky, la population riveraine défriche la forêt pour la convertir en champs de culture qu'elle abandonne après quelques années pour défricher une autre partie de la forêt. Cette pratique tend à réduire annuellement la superficie des différents types de forêts humides à Madagascar. En effet, la déforestation des forêts primaires du versant Est peut en grande partie être attribuée à la culture sur brûlis (20)

## Conclusions

Dans cette étude, nous avons déterminé la dynamique spatio-temporelle du paysage forestier de la Réserve Spéciale d'Ambatovaky. Des classifications des images Landsat datées de 1996, 2004 et de 2014 ont permis de produire des cartes d'occupation du sol de la RSA. Ces cartes ont constitué une base pour la modélisation de l'évolution de la dynamique du paysage forestier de la RSA. Il en ressort que la couverture forestière de la zone d'étude régressera au fur et à mesure de temps malgré son statut d'aire protégée. La perte de la forêt se manifestera au profit des champs de culture, qui sera laissés après quelques années d'exploitation et se convertira en « savoka ». Cette situation peut être en relation avec la pression démographique élevée entraînant une insuffisance des terres agricoles disponibles. Notre recherche a mis en évidence que les actions de conservation ne doivent pas se limiter à la seule protection des ressources naturelles, mais qu'elles sont inséparables des actions de développement économique et social de la population riveraine.

## Références bibliographiques

- Allnutt, T. F., Asner G. P., Golden C. D. & Powell G. V. N., 2013, Mapping recent deforestation and forest disturbance in northeastern Madagascar, *Trop. Conserv. Sci.*, **6**, 1-15.
- Aubert S., Razafiarison S. & Bertrand A., 2003, *Déforestation et systèmes agraires à Madagascar. Les dynamiques des tavy sur la côte orientale*. CIRAD, CITE, FOFIFA, Montpellier, Antananarivo.
- Barima Y.S.S., Egnankou M.W., N'doumé C.T.A., Kouamé F.N. & Bogaert J., 2010, Modélisation de la dynamique du paysage forestier dans la région de transition forêt-savane à l'est de la côte d'Ivoire, *Rev. Téléédéct.*, **9**, 129-138.
- Barrett C.B., 1999, Stochastic food prices and slash-and-burn agriculture, *Environ. Dev. Econ.*, **4**, 161-176.
- Bell E. J., 1974, Markov analysis of land use change: an application of stochastic processes to remotely sensed data, *Socio-Econ. Plan. Sci.*, **8**, 311-316.
- Blanc-Pamard C. & Rakoto Ramiarantsoa H., 2003, *Madagascar: Les enjeux environnementaux*. In: Lesourd M., *L'Afrique. Vulnérabilité et défis*. Nantes: Editions du temps, 354-376.
- Bodin B., Ravilious C., Mant R. & Bastianelli C., 2014, *Les synergies entre la REDD+ et les objectifs d'Aichi de la Convention sur la Diversité Biologique en Afrique Centrale - L'apport de l'analyse spatiale pour la planification conjointe de deux engagements internationaux sur les forêts*. UNEP-WCMC, Cambridge, UK.

8. Caloz R. & Collet C., 2001, *Traitements numériques d'images de télédétection*. Québec, Canada: Presses de l'Université du Québec.
9. Chavez J.P.S., 1988, An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data, *Remote Sens. Environ.*, **24**, 459 - 479.
10. Clark M., 2012, Deforestation in Madagascar: Consequences of Population Growth and Unsustainable Agricultural Processes, *Global Majority E-Journal*, **3**, 61-71.
11. Eckert S., Ratsimba H. ., Rakotondrasoa L.O., Rajoelison L.G. & Ehrensperger A., 2011, Deforestation and forest degradation monitoring and assessment of biomass and carbon stock of lowland rainforest in the Analanjirofo region, Madagascar, *For. Ecol. Manage.*, **262**, 1996–2007.
12. FAO, 2012, *Situation des forêts 2012. Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rome.
13. FAO, 2013, *FAO Statistical Yearbook 2013. Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rome.
14. Gautier L. & Goodman S.M., 2003, *Introduction to the flora of Madagascar*. In *The Natural History of Madagascar*, ed. S.M. Goodman & J.P. Benstead, 229-250. Chicago, IL, USA: University of Chicago Press.
15. Groupe des Spécialistes des Plantes de Madagascar, 2011, Liste rouge des plantes vasculaires endémiques de Madagascar.
16. Harper G.J., Steininger M.K., Tucker C.J., Juhn D. & Hawkins F., 2007, Fifty years of deforestation and forest fragmentation in Madagascar, *Environ. Conserv.*, **34**, 325–333.
17. Kiener A., 1963, Le "tavy" à Madagascar : ses différentes formes et dénominations, bilan du tavy et problèmes humains, moyens de lutte, *Bois et For. Trop.*, **90**, 9-16.
18. Madagascar National Parks, 2010, *Plan de sauvegarde sociale et environnementale de la réserve spéciale Ambatovaky*.
19. McConnell, 2002, Madagascar: Emerald isle or paradise lost?, *Environ.*, **44**, 10-14.
20. Messerli, P. 2003, *Alternatives à la culture sur brûlis sur la Falaise Est de Madagascar: Stratégies en vue d'une gestion plus durable des terres*, African Studies Series, A17, Geographica Bernensia, Berne.
21. Minten B. & Moser C., 2003, *Forêts: usages et menaces sur une ressource*. In : *Agriculture, pauvreté rurale et politiques économiques à Madagascar*, ed. B. Minten, J.C. Randrianarisoa & L. Randrianarison, 86-89, Cornell University, Ithaca.
22. Moore A.D., 1990, The Semi-Markov process - a useful tool in the analysis of vegetation dynamics for management, *J. Environ. Manage.* **30**, 111-130.
23. Muller M.R. & Middleton J., 1994, A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara region, Ontario, Canada, *Landscape Ecol.*, **9**, 151-157.
24. ONE, DGF, FTM, MNP & CI, 2013, *Evolution de la couverture des forêts naturelles à Madagascar 2005-2010*. Antananarivo, Madagascar.
25. Pontius R.G. Jr., 2000, Quantification error versus location in comparison of categorical maps, *Photogram. Eng. Remote Sens.*, **66**, 1011-1016.
26. République de Madagascar, 1990, *Loi n° 90-033 du 21 décembre 1990 portant Charte de l'Environnement malagasy, Madagascar*.
27. Schlaepfer R., 2002, *Analyse de la dynamique du paysage. Fiche d'enseignement 4.2, Laboratoire de Gestion des Ecosystèmes*, Ecole Polytechnique de Lausanne, Suisse.
28. Styger E, Rakotondramasy H.M., Pfeffer M.J., Fernandes E. C.M. & Bates D.M., 2007, Influence of slash-and-burn farming practices on fallow succession and land degradation in the rainforest region of Madagascar, *Agric., Ecosyst. & Environ.*, **119**, 257–269.
29. Toyi M.S., Barima Y.S.S., Mama A., André M., Bastin J -F., De Cannière C., Sinsin B. & Bogaert J., 2013, Tree Plantation Will Not Compensate Natural Woody Vegetation Cover Loss in the Atlantic Department of Southern Benin, *Tropicultura*, **31**, 62-70.
30. Urban D.L. & Wallin D.O., 2002, *Models of landscape change*. In: *Learning landscape ecology: a practical guide to concepts and techniques*, Eds S.E. Gergel & T.M.G. Springer, New York, pp. 35-48.
31. Weng Q., 2002, Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling, *J. Environ. Manage.*, **64**, 273-284.
32. Zaehring J.G., Eckert S. & Peter M., 2015, Revealing Regional Deforestation Dynamics in North-Eastern Madagascar—Insights from Multi-Temporal Land Cover Change Analysis, *Land*, **4**, 454-474.
33. [http://landsat.usgs.gov/Landsat\\_Processing\\_Details.php](http://landsat.usgs.gov/Landsat_Processing_Details.php)
34. [http://www.indexmundi.com/fr/madagascar/croissance\\_demographique\\_%28taux\\_de\\_croissance%29.html](http://www.indexmundi.com/fr/madagascar/croissance_demographique_%28taux_de_croissance%29.html)
35. <https://www.instat.mg/madagascar-en-chiffre/>

L.O. Rakotondrasoa, Malgache, PhD, Enseignant chercheur, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département des Eaux et Forêts, Antananarivo, Madagascar.

F. Malaisse, Belge, PhD, Professeur honoraire, Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Gembloux, Belgique; Membre ARSOM.

J. Bogaert, Belge, PhD, Professeur ordinaire, Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Gembloux, Belgique; Professeur ERAIFT, Knshasa, R.D. Congo; Membre ARSOM.