Transitions post-forestières en forêt sèche caducifoliée et fourré xérophile (sud-ouest de Madagascar)

Transitions after slash and burn deciduous dry forest and xerophytic thicket (southwestern Madagascar)

- D. HERVÉ ¹
 V. RATIARSON ²
 J. R. RANDRIAMALALA ³
 H.A. RANDRIAMBANONA ⁴
 S. RAZANAKA ⁴
- (1) Institut de Recherche pour le Développement (IRD UMR 220), BP 64501, 34394 Montpellier, France
- (2) Ecole Nationale d'Informatique, Université de Fianarantsoa, BP 1487, Fianarantsoa 301, Madagascar
- (3) Département des Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, BP 175, Antananarivo 101, Madagascar
- (4) Centre National de Recherche sur l'Environnement (CNRE), BP 1739, Antananarivo 101, Madagascar

Résumé

Les formations de forêt sèche et fourré xérophile du sud-ouest de Madagascar sont plus menacées de déforestation que les forêts humides de l'Est mais les processus sont mal connus. Ces formations sont peu résilientes et leur mise en culture par abattis-brûlis conduit à une savanisation. Nous utilisons l'imagerie satellitaire Landsat 7 multi-dates pour suivre les transitions post-forestières sur 20 ans, de 1990 à 2000 et de 2000 à 2010 dans trois sites: au Nord de Toliara, la forêt de Mikea, et au Sud de Toliara, les communes de Betioky-Sud et de Soalara-Sud. Ces sites couvrent un gradient pluviométrique de 600 à 400 mm annuels et quatre types de sols: dalle calcaire, sable ferrugineux, sable roux et sable beige.

Les différences de végétations initiales, l'exploitation des formations sèches pour le charbon de bois et le pâturage caprin à proximité des villages, et la possibilité de culture annuelle, spécifient des états d'occupation du sol que l'on cherche à retrouver sur les images satellitaires après classification (matrices de confusion). Les transitions entre ces états sont formalisées par des schémas de transition et quantifiées entre deux dates, pour alimenter les matrices de transition d'un modèle markovien. Trois modèles sont retenus pour les formations sèches, dont les domaines de validité sont finalement discutés.

Mots-clés: forêt sèche, fourré xérophile, LANDSAT 7 TM, Markov, savane, abattis-brûlis

Abstract

Dry forest and xerophytic thickets of the southwestern Madagascar are most threatened by deforestation than the rain forest of the East but the processes are poorly understood. These dry forests are less resilient than rain forest and their shifting cultivation leads to a savannah. We use Landsat 7 imagery multi track dates for post-forest transitions over 20 years from 1990 to 2000 and from 2000 to 2010 at three sites: North of Toliara, the Mikea dry forest, and South of Toliara, the communes of Betioky Sud and Soalara Sud with xerophytic thickets. These sites cover an annual precipitation gradient from 400 to 600 mm and four types of soil: limestone slab, ferruginous sand, red sand and beige sand.

Differences in initial vegetation, woody charcoal exploitation and goat grazing nearby villages, and the place of agriculture, specify land use states that are observed in classified satellite images (confusion matrices) and specific transitions that are formalized in a Markov chain (transition matrices built between two dates). Three models are selected for dry vegetation. The range of validity of each of the three selected models is finally discussed.

Keywords: dry forest, xerophytic thickets, savannah, LANDSAT 7 TM, Markov, slash and burn

Introduction

La déforestation est mieux mesurée sur les forêts humides de l'est malgache que sur les forêts sèches de l'ouest malgache. Pourtant, les évaluations de 1990 à 2005 à l'échelle de Madagascar montrent un recul de la forêt plus important, en particulier dans le sud-ouest de Madagascar (Steininger & Musinsky, 2007 ; Casse *et al.*, 2004).

Les forêts sèches sont globalement moins connues. Elles posent des problèmes d'interprétation par l'imagerie satellitaire car les feuilles en période de pluies laissent la place à des épines en saison sèche et une variété d'adaptations physiologiques réduisent la taille des feuilles (Le Floch & Aronson, 2013). Une autre caractéristique de ces forêts sèches est la prédominance d'espèces à tiges multiples partant de la base du tronc et la densité élevée de lianes (Raharimalala *et al.*, 2010).

Les forêts sèches caducifoliées sont réputées peu résilientes ou avec une régénération très lente après la mise en culture par abattis-brûlis (Leprun *et al.*, 2009 ; Grouzis *et al.*, 1999 ; Raharimalala *et al.*, 2010). Le climat semi-aride (Cornet & Guillaumet, 1976) explique en partie cette situation. Mais c'est surtout une moindre incidence du feu sur les savanes qui permettrait la régénération à partir de noyaux arbustifs ou forestiers.

Concernant les transitions post-forestières en forêt humide, un modèle markovien a été calibré sur une base de données d'historiques culturaux sur 50 ans d'une population de parcelles d'environ 0,1 ha (Ratiarson *et al.*, 2011 ; Hervé *et al.*, 2013 ; Hervé, dans cet ouvrage). La délimitation de ces parcelles a été facilitée par les infrastructures de correction du milieu : casiers rizicoles et terrasses en rideaux sur les pentes. Nous cherchons à construire, sur une base chronologique longue reconstituée avec des images satellitaires, un modèle équivalent pour les forêts sèches.

Dans le sud-ouest la taille des parcelles cultivées par le groupe familial peut dépasser les 10 ha. Un suivi historique de l'occupation du sol peut être réalisé sur des images LANDSAT 7 ETM+ (avec une

résolution de 30 m), leur gratuité permettant d'acquérir des scènes de plusieurs dates, ou des images SPOT (avec une résolution de 10 m ou moins), sur des zones ciblées. Dans ce contexte, le modèle markovien doit également s'adapter à une approche spatiale dans laquelle le nombre de pixels est élevé mais le nombre de dates comparables est réduit à 3 (délimitant deux périodes) ou guère plus. La présente étude couvre 20 ans, de 1990 à 2000 et de 2000 à 2010.

Dans le sud-ouest malgache qui nous intéresse (environs de Toliara), la végétation se répartit sur un gradient de température nord-sud et un gradient de pluviométrie ouest-est (du plus sec au plus humide) dans un climat local globalement sub-aride. On peut distinguer au nord de Toliara un gradient ouest-est allant de fourrés épineux xérophiles sur sables beiges littoraux à une forêt sèche caducifoliée, la forêt de Mikea, sur dalle calcaire et sables roux à l'est. Au sud de Toliara, un gradient fourrés bas sur sables beiges à l'ouest, au pied de la falaise Mahafaly (commune de Soalara, district Toliara II), et à l'est des fourrés hauts sur dalle calcaire ou sur sables ferrugineux (commune de Betioky sud, district de Betioky-sud). La végétation naturelle est formée de fourrés xérophiles à *Didiereaceae* et à *Euphorbiaceae* (Cornet & Guillaumet, 1976).

Nous nous demanderons si ces milieux contrastés dans leur combinaison sol-végétation sont soumis aux mêmes dynamiques sur une vingtaine d'années, en vérifiant si l'on retrouve les mêmes transitions et les mêmes états d'occupation du sol entre les trois sites sélectionnés. La construction de matrices markoviennes à partir des changements d'occupation du sol oblige à se poser des questions sur les transitions qui sont soumises aux écologues et aux agronomes qui effectuent les reconnaissances de terrain. Cette construction contribue de fait à la définition d'un programme de recherche.

Méthodologie

Le long des gradients pluviométrique (est - ouest) et de végétation (forêt sèche – fourré), trois sites ont été sélectionnés au nord et sud de Toliara car ils expriment les contrastes observés dans la région : Mikea (600-700 mm), Betioky-sud (696 mm ; 1972-2009) et Soalara (418 mm ; 1972-2002). A plus de 400 mm de pluviométrie annuelle, nous restons dans le domaine sub-aride (Le Floch & Aronson, 2013).

A la différence des forêts humides, pour les transitions post-forestières sous forêt sèche, on s'intéressera à l'effet possible du type de sol. La végétation des forêts sèches est clairsemée et laisse passer la lumière au sol, d'où l'importance du type de sol dans la réponse spectrale au rayonnement incident. Par ailleurs, l'eau dans le sol est en relation directe avec la biomasse produite. Une différence devrait se noter entre des sols superficiels sur dalle calcaire et des sols plus profonds sur sables dunaires. Le taux d'argile est un des indicateurs de cette disponibilité en eau dans le sol.

Leprun *et al.* (2009) caractérisent quatre types de sol au nord et au sud de Toliara: dalle calcaire, sable ferrugineux (roux sombre), sable roux (roux clair), sable beige sur la zone côtière. Les sables beiges ne sont observables qu'à Soalara, sur une bande côtière. Les sables ferrugineux se rencontrent à Betioky; ils sont principalement couverts de haut fourré, puis en moindre importance, de savane. Les sables roux, plus étendus à Soalara, sont principalement couverts de bas fourré. Le pourcentage de sols de dalle calcaire est très faible à Mikea alors que ce sol calcaire caillouteux prédomine à Betioky, car il correspond au début du plateau Mahafaly. Pour discriminer les types de sols par télédétection, Rakotovao (2013) utilise deux indices dans sa classification, un indice de rougeur ou indice de fer ferrique et un indice de stress hydrique (NDVI).

Les images Landsat 7 se prêtent bien à un suivi multi-dates de la végétation. Le problème des images optiques, Landsat ou Spot, est qu'elles ne captent pas les différences de hauteur de végétation entre fourré et forêt sèche, ou entre fourré haut et fourré bas. Cette dénomination fait également référence à la densité de la végétation : le fourré haut est plus dense et le fourré bas plus clair. Le fourré bas est un bush fermé, le fourré bas dégradé est un bush ouvert (Franc *et al.*, 2004).

Les différences de végétation sont très importantes entre période des pluies et période sèche, du fait des multiples adaptations morphologiques (Le Floch & Aronson, 2013) des plantes à la sécheresse (caducité du feuillage, microphyllie, aphyllie, crassulescence, pachycaulie). Il y a donc intérêt à analyser des images de période humide, à la condition qu'elles ne présentent pas de nuages, ou de combiner pour une même année des images en période humide et en période sèche.

Nous avons fait le choix de ne comparer que des fins de périodes humides à trois dates avec Landsat 5 TM du 11/04/1989 et Landsat 7 ETM+ du 06/05/2001 et du 07/05/2010, soit des intervalles de 12 ans et 9 ans, sur un total de 20 ans. Les changements d'occupation du sol ont été étudiés sur ENVI 4.8.

Le but est d'appliquer une approche spatiale de Markov aux changements d'occupation du sol observés entre 3 dates, à l'aide de l'imagerie satellitaire, en suivant le cheminement suivant :

- (1) Les classes d'occupation du sol sont déterminées par l'observation de terrain et confirmées et triées par l'analyse des images satellitaires.
- (2) Le travail de terrain permet de classer les transitions entre celles observées, possibles et impossibles, conduisant à un schéma de transition par site.
- (3) Les matrices de confusion 2010 pour Mikea, Betioky et Soalara permettent d'argumenter quels états d'occupation du sol sont fusionnés et quels états sont conservés.
- (4) Les matrices de transition sont construites sur les changements d'occupation du sol entre 3 dates, soit deux matrices de transitions par site, une pour chaque période.
- (5) Le test d'homogénéité de chaque matrice Markov permet de conclure sur chacune des deux périodes ou de proposer la fusion de ces deux périodes.
- (6) La comparaison finale des matrices de transition dans les 3 sites conduit à une discussion sur le fait de garder un ou plusieurs modèles de Markov représentant au mieux les dynamiques observées.

Résultats

TYPOLOGIE DES FORETS SECHES ET FOURRES XEROPHILES

Dans un contexte semi-aride, la diversité et la structure de la végétation ligneuse (composition botanique, taille et densité) sont affectées par les types de sols, le gradient de précipitation et dans une moindre mesure l'usage des terres.

Dans la zone de Toliara, au sud-ouest de Madagascar, coexistent des forêts sèches et des fourrés xérophiles. Cette distinction entre forêt sèche et fourré est validée par la biogéographie. Le fourré présente une végétation dense depuis la base dans laquelle la lumière pénètre jusqu'au sol, du fait du caractère microphylle, ou même aphylle de beaucoup d'espèces, qui restreint l'élagage naturel. Une strate arborée peut éventuellement dominer l'ensemble, mais elle sera toujours très discontinue.

Au-delà du plateau calcaire de Mahafaly, on n'est plus en forêt sèche mais on entre en fourré xérophile à *Didiereaceae* et à *Euphorbiaceae* (Razanaka, 1996). La différence de hauteur et de composition

botanique entre fourré haut et fourré bas suit le gradient pluviométrique et traduit les interactions solclimat.

La Forêt dense sèche (FS) se caractérise par une hauteur de 10 m de haut, supérieure à 10 m sur sables roux, inférieure à 10 m sur dalle calcaire, et des espèces à multi-troncs ramifiés depuis la base, avec une grande quantité de lianes et au total, peu d'ombre. La végétation est clairsemée ; l'effet du sol est important et au total, elle fait peu d'ombre.

Les Fourré haut (HF) entre 5 et 8 m de haut et le Fourré bas (BF) entre 3 et 5 m se distinguent par la hauteur et par la densité, les fourrés hauts étant les plus denses et les fourrés bas les plus clairs. La différence entre fourré et fourré dégradé se note par une différence de densité qui traduit l'état des fourrés, intact – non exploité car très éloigné des villages - ou dégradé, du fait de deux modes d'exploitation principaux : la transformation en charbon de bois et le pâturage caprin. L'espèce privilégiée pour le charbon est le tamarinier (*Tamarindus indica*).

La Savane (SV) se caractérise par un tapis graminéen de moins de 80 cm de hauteur, et se différencie de la steppe par la continuité de la couverture du sol en saison de pluie. Des étapes de régénération sont détectables dans la savane arbustive et la savane arborée. Forêt et savane peuvent apparaître dans le paysage comme deux formations distinctes, clairement délimitées, et sans transition entre les deux.

Pour déterminer les transitions possibles ou non, des questions sont posées aux écologues et aux télédétecteurs:

- 1) Qu'est-ce qui empêche le fourré haut de devenir avec le temps une forêt sèche ?
- 2) Le fourré bas peut-il évoluer vers le fourré haut ?
- 3) L'état dégradé du fourré haut n'a-t-il pas la même physionomie que le fourré bas ?
- 4) Comment une savane préservée du feu peut devenir un fourré ?

A Soalara, comme à Betioky, le caractère dégradé des fourrés tient à l'exploitation du charbon de bois et au pâturage des ruminants. L'exploitation du charbon est différenciée puisque seuls les sables sont exploités et non les dalles calcaires (Radosy, 2013). Le pâturage est à dominante de caprins à Soalara et à dominante de bovins à Betioky. Les processus de recrû arbustif puis arboré et de coupe sélective pour le charbon sont qualifiés de « dégradation » alors qu'ils sont de nature différente. Le recrû ou jachère après mise en culture par abattis-brûlis implique une homogénéisation du milieu donnant lieu à un recru avec l'espèce herbacée et/ou arbustive colonisatrice, à tendance mono-spécifique ; la hauteur homogène de l'arbuste dominant indique l'âge de la jachère. La structure de la végétation est donc différente de celle d'un fourré dégradé dans lequel l'espèce exploitée pour le charbon a été écrêtée ou coupée à la base. Cette densité réduite le rapproche du recrû arbustif, si bien que l'imagerie satellitaire ne parvient pas à les distinguer.

Les images satellitaires ne distinguent pas non plus des parcelles cultivées dans une mosaïque constituée de parcelles cultivées, parcelles en jachère récente (tapis herbacé discontinu), sols nus (parcelles labourées ou récoltées), d'où l'appellation « Zone agricole » (ZA) pour regrouper les trois. Les dalles calcaires ou affleurements rocheux observés à Mikea pourraient constituer une classe à part mais elle n'est pas assez représentée pour être distinguée sur les images. Les parcelles en jachère récente, avec un tapis herbacé ou une couverture discontinue d'une ou un petit nombre d'espèces dominantes, sont incluses actuellement dans la ZA, alors que les jachères plus vieilles (10 ans ou plus), avec des arbustes plus hauts et plus denses, sont regroupées dans la classe des recrûs âgés - fourrés dégradés.

Dans la zone côtière de Soalara prédomine un type particulier d'agriculture en enclos, le système de culture du Vala dans des enclos de branchage et épines qui isolent la ZA des troupeaux caprins et

ovins. Le système de clôture du Vala délimite un enclos appartenant à une famille élargie dans lequel des parcelles sont cultivées ou laissées en jachère et le recrû herbacé est alors pâturé par les animaux les plus fragiles du troupeau, animaux malades ou femelles gestantes. Un Vala abandonné est destiné à une régénération naturelle; le terrain est remis dans les terres communes si la haie est détruite et n'est pas restaurée.

L'élaboration d'une clôture suit deux étapes : 1) branchages à épines ; 2) plantation d'agave (*Agave* sp.) et ou de raquette (*Opuntia stricta* Haw.) et dans une moindre mesure de Jatropha (*Jatropha mahafalensis* Jum. & H. Perrier) qui n'est pas consommé par les animaux et qui est difficile à utiliser comme combustible du fait de sa basse capacité calorifique. Les arbustes *Euphorbia laro* Drake *et Commiphora* spp. peuvent également être introduits dans la haie. Ces haies constituent avec le temps de véritables murs de végétation, en particulier autour des villages, mais leur extension spatiale reste insuffisante pour qu'elles apparaissent sur des images SPOT à 10 m. Ces murs de raquette ont également une fonction fourragère car certaines espèces sont consommées en priorité par les bovins, secondairement par les ovins, et plus rarement par les caprins⁷.

EVOLUTION DES SURFACES ENTRE LES DEUX PERIODES

Mikea

Lasry *et al.* (2004) ont traité la dynamique de la déforestation dans la forêt sèche des Mikea entre 1971 et 2001 en comparant des images SPOT de différentes dates. 55 % de la surface forestière a disparu en 30 ans avec un taux de 1,8 % par an. La « déforestation » aux dépends de la forêt dense sèche, qui était dans la période de 1990 à 1999 d'un tiers de la surface, s'est accélérée entre 1999 et 2010, avec la disparition en 10 ans de la moitié de la surface forestière (Tableau I). Pendant la même période, la surface en recrûs a triplé d'approximativement 5 500 à 16 000 ha. Par contre le processus de savanisation, notoire entre 1990 et 1999, s'est stabilisé ensuite. C'est la même tendance qui s'observe pour la zone agricole, qui a augmenté dans une proportion de 1 à 5 entre 1990 et 1999 et puis est restée stable entre 1999 et 2010. L'accélération de la déforestation dans la période 1999-2010 ne s'est donc pas traduite par une augmentation équivalente de la surface cultivée, mais par une augmentation de la surface en recrû (Tableau I).

Tableau I: Matrices de transition Mikea (1990-1999-2010)

Etat initial 1990	MIKEA	Etat final 1999				
%	Forêt dense	Recrûs	Zone agricole			
Forêt dense	63,72	29,65	5,16	1,46		
Recrûs	8,2	68,71	10,50 12,59			
Savane	0,50	18,07	18,07 78,18 3,25			
Zone agricole	6,90	30,36 3,94 58,81				
Etat initial 1999	MIKEA	Etat final 2010				
Forêt dense	46,28	49,62	2,18	1,92		
Recrûs	1,64	85,56	8 4,8			
Savane	0,17	48,62	48,56	2,65		
Zone agricole	1,53	55,3 5,83 37,34				

⁷ Vilo vilo = Vilovilo ; Nobe = Notsobe ; Maozolo = Mavozolobe (on brûle pour fourrage) ; raquette douce = Doso (Tsisy tsilo) ; Raketa mena : raquette à multiples épines jaunes ; raquette à grande épine grise.

Betioky

Les fourrés hauts sont dominés par *Didierea madagascariensis* Ballon (*Didieraceae*), de 4 à 8 m de haut, et ont une strate inférieure discontinue composée de *Commiphora humbertii* H. Perrier (*Burseraceae*), *Commiphora lamii* H. Perrier et *Croton* spp. (*Euphorbiaceae*).

Randriamalala *et al.* ont mesuré sur des images Landsat 7 une diminution régulière de la surface en fourrés hauts au cours des deux périodes 1989-2001 et 2001-2010 (Tableau II). Les recrûs herbacés sont inclus dans la zone agricole et les recrûs plus âgés sont assimilés aux fourrés hauts. Durant ces vingt ans, la ZA augmente régulièrement, alimentée par les catégories haut fourré et savane. La surface en savane, fluctuante entre 1989 et 2001, s'est stabilisée entre 2001 et 2010. Les surfaces en savane ne donnent pas lieu à une régénération en fourrés à la différence des surfaces agricoles.

Etat initial 1989	ВЕТІОКҮ	Etat final 2001				
%	Haut fourré	Savane Zone agricole		Total		
Haut fourré	75,11	0,01	24,88	100		
Savane	0,59	55,8 43,61		100		
Zone agricole	13,93	2,2 83,87		100		
Etat initial 2001	BETIOKY	Etat final 2010				
Haut fourré	56,07	0,44	43,49	100		
Savane	0,11	0,11 91,93 7,96		100		
Zone agricole	10,69 8,71		80,6	100		

Tableau II: Matrices de transition Betioky (1989-2001-2010)

Rakotovao (2013) a étudié avec une mosaïque de deux scènes Landsat 7 (453527 ha couverts par les scènes n°160/076 et 160/077) les deux sites de Betioky et Soalara, durant une période de 10 ans avec un pas de temps de 5 ans, en traitant cette mosaïque à trois dates à 5 ans d'intervalle, 06/05/2001, 17/03/2006, 07/05/2010, et en validant sur le terrain l'interprétation satellitaire en mars 2012. Les cartes P1a, P1b, P1c indiquent une déforestation plus marquée en 2001-2006 qu'en 2006-2010, les surfaces en fourrés (tous fourrés confondus) diminuent au profit des surfaces en savane.

Betioky suit donc globalement une évolution de la couverture de fourrés semblable à celle de Mikea pour la forêt sèche.

Soalara

Les fourrés bas (2 à 4 m de haut) sont composés de *Didiereaceae* et *Euphorbiaceae*. Ils sont dominés par *Euphorbia stenoclada* Baillon (*Euphorbiaceae*), *Euphorbia Laro* Drake, *Grewia grevei* Baillon (*Malvaceae*) et *Albizia* sp. (*Fabeaceae*), avec une strate inférieure fermée de *Fabaceae* caractérisée par *Cordyla sp.*(*Cordyla madasgacariensis* R. Viguier, *Cordyla humbertii*, *Cordyla implicifolia*). Les fourrés bas occupent des zones très sèches sur sables beiges filtrants, en position littorale, et sur lithosols de dalle calcaire, à l'intérieur des terres.

La pression sur les fourrés bas, qui se traduit par une augmentation des surfaces du fourré bas dégradé et de la zone agricole, s'exprime surtout de 1989 à 2001, moins fortement entre 2001 et 2010 (Tableau III, Randriamalala *et al.*). Le caractère « dégradé » vient de l'exploitation du charbon de bois et du pâturage caprin ; l'exploitation du bois d'œuvre se fait dans des fourrés éloignés du village. Cette évolution se différencie donc de celle de Mikea et Betioky.

Etat initial 1989	SOALARA	Etat final 2001				
%	Bas fourré	Bas fourré dégradé	Zone agricole	Total		
Bas fourré	81,64	8,71	9,66	100		
Bas fourré dégradé	28,75	54,9	16,35	100		
Zone agricole	9,42	8,58	8,58 82			
Etat initial 2001	SOALARA		Etat final 2010			
Bas fourré	83,38	7,83	8,8	100		
Bas fourré dégradé	31,38	50,23 18,39		100		
Zone agricole	19,06	11,93 69,01		100		

AJUSTEMENT DES ETATS D'OCCUPATION DU SOL EN FONCTION DES MATRICES DE CONFUSION

Mikea (Forêt sèche)

Le tableau IV présente la matrice de confusion établie en 2010 entre les 4 états d'occupation du sol : F (Forêt dense sèche), J (Recrû), ZA (Zone Agricole), S (Savane).

Dans la matrice de confusion établie sur la classification en 2010 entre les 4 états d'occupation du sol ; F (Foêt dense sèche), J (Recû), ZA (Zone agricole), S (Savane), nous nous intéressons à la case Recrû. La case croisant la classe Recrû en horizontal et la classe Recrû en vertical ne fait que 89,1% ; la jachère se confond avec la savane pour 4,9% des cas (Savane – Recrû) et avec la zone agricole pour 6% des cas (Zone Agricole – Recrû). Dans ces conditions, il est décidé de maintenir pour la classification l'état Jachère (Recrû).

Betioky et Soalara (Fourré xérophile)

Les catégories d'occupation du sol de Betioky (HF, HFD, ZA, S) et de Soalara (BF, BFD, ZA = Vala) sont traitées dans la même matrice de confusion en 2010, en obtenant un Kappa = 0,942 ; et une précision globale = 95,45 % (Tableau IV).

Tableau IV: Matrice de confusion de la classification en 2010 (Betioky Sud et Soalara Sud)

Classes	BF%	BFD%	HF%	HFD%	Savane%	ZA%	EO%	EC%	Total
BF%	96,3	0,1	6,91			0,93	3,7	6,27	17,93
BFD%	1,25	99,23				0,35	0,77	3,54	9,35
HF%			89,3	19,12			10,7	10,7	11,73
HFD%			1,86	79,02		0,21	20,98	5,25	5,48
SV%					98,83	1,38	1,17	2,01	22,5
ZA%	2,45	0,67	1,93	1,86	1,17	97,13	2,87	3,33	33,01
Total	100	100	100	100	100	100			100

BF=Bas fourré, BFD=Bas fourré dégradé, HF=Haut fourré, HFD=Haut fourré dégradé, ZA=Zone agricole, EO=erreur par omission, EC=erreur par commission.

Classes	BF%	BFD%	HF%	SV%	ZA%	EO%	EC%
BF%	93,31	7,76	1,82	0	0,06	6,69	5.86
BFD%	3,72	91,74	0	0	0,5	8,26	8.71
HF%	0	0	93,01	0	0	6,99	0.00
SV%	0	0	0	100	1,09	0	1.76
ZA%	2,97	0,5	5,17	0	98,35	1,65	5.54
Total%	100	100	100	100	100		

Tableau V: Matrice de confusion de la classification en 2010 après fusion de HF et HFD

Précision globale = (10833/11307)=95.81%, Coefficient Kappa=0.9462, EO : Erreur d'omission, EC : Erreur de commission

BF : Bas fourré, BFD: Bas fourré dégradé, HF : Haut fourré, SV : Savane, ZA : Zone agricole

Dans la matrice de confusion du tableau IV, les catégories ZA et Savane présentent des confusions mais les pixels bien classés restent au dessus de 97 %. Par contre le haut fourré dégradé n'atteint que 79 %. Les hauts fourrés dégradés sont confondus avec les hauts fourrés dans 19,12 % des cas et avec la zone agricole dans 1,86 % des cas. La classe de haut fourré dégradé sera donc fusionnée avec celle de haut fourré, ce qui améliore notablement le pourcentage des pixels bien classés (Tableau V).

Des questions demeurent sur la similarité ou la différence entre les états observés. En quoi la jachère après culture, observée à Mikea, a-t-elle une physionomie proche de celle du haut fourré dégradé identifié à Betioky, le niveau de dégradation dépendant du pâturage et des prélèvements pour charbon de bois. A Betioky, après culture, l'alternative de recrû entre un fourré et une savane n'est pas documentée ; elle dépend en partie de la fréquence du feu.

Dans cette matrice de confusion, la classe « savane » apparaît bien classifiée (erreurs d'omission autour de 1 %), alors que les classes de fourrés sont relativement moins bien classifiées (erreurs d'omission supérieures à 6 %). Par ailleurs, des confusions demeurent entre les classes « Bas fourré dégradé » et « Bas fourré », d'une part, et entre les classes « Zone agricole » et « Haut fourré » d'autres part. Les réponses spectrales de ces classes sont en effet assez proches au moment de l'acquisition des images. On en conclut que la dégradation n'est pas discernée clairement sur les images avec des pixels de 30 m.

SCHEMAS ET MATRICES DE TRANSITION (1989-2001-2010)

La détection de changement conduit à deux matrices de transition dans chaque site: 1989-2001 et 2001-2010. On vérifiera l'homogénéité de ces matrices markoviennes.

Transitions Mikea

Quatre classes ont été sélectionnées dans la zone de Mikea : FS, ZA , SV, J (Figure O5). La Forêt sèche n'est pas exploitée pour le charbon de bois (trop éloignée pour les charrettes) ni par les bovins (pas de strate herbacée en forêt). A Mikea, la FS n'est pas exploitée pour le charbon de bois (trop éloigné pour les charrettes), ni par les bovins (pas de strate herbacée).

Transitions Betioky

La classe Savane existe bien à Betioky, maintenue par le feu et dédiée au pâturage des zébus (Figure 1). Par contre la fusion de HF et HFD conduit à 3 classes : HF, ZA et SV. La zone agricole est alimentée par la défriche de HF ou encore par le retournement de la savane.

Hypothèse: Savanisation de forêt peu résiliente; de savane, on ne revient pas à forêt-fourré.

Forêt = fourrés / ZA / Savane. On cherche donc à estimer la transition Forêt-Savane. C'est cette transition qui nous intéresse également pour les stations acridiennes.

Quatre classes ont été identifiées dans la zone de Betioky : HF, HFD, ZA, SV, mais la fusion de UF et HFD validée par la matrice de confusion a conduit à ne garder que 3 classes : HF, ZA et SV.

ZA est alimentée par la défriche de HF, ou encore le retournement de la savane.

L'abandon de la ZA donne de la savane (c'est le cas des parcelles antérieurement en savane), mais peut aussi donner HFD, la jachère rejoignant l'état d'un fourré dégradé.

Transitions Soalara

L'infrastructure de clôture végétale en Vala délimite des espaces réduits affectés à l'agriculture, et au pâturage des animaux les plus fragiles. Il n'y a plus d'espaces de savane à proprement parler.

Seulement trois classes ont donc été sélectionnées dans la zone de Soalara : BF, BFD et ZA (Figure 1) $BF \rightarrow BFD$ par charbon de bois

 $BFD \rightarrow BF$ par mise en défens

BFD → ZA par défriche (dans des parcs)

 $BF \rightarrow ZA$ par défriche (dans des parcs)

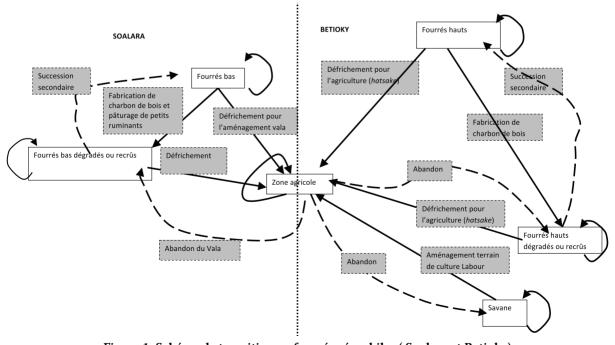


Figure 1. Schéma de transition en fourrés xérophiles (Soalara et Betioky)

Le fait que la zone agricole soit dans un parc enclos limite à cet enclos les surfaces en jachère assimilée à du bas fourré dégradé.

 $ZA \rightarrow BFD$ (inférieur à 3 % des transitions). L'abandon d'une zone agricole pendant plus de 20 ans (abandonné de mémoire d'homme) conduit au même état que le FBD.

Il n'y a plus d'espaces de savane à proprement parler à Soalara. A moins de 400 mm de précipitation annuelle, la savane laisse la place à la steppe.

Discussion

COMPARAISON DES ETATS D'OCCUPATION DU SOL

On constate que les sites de Mikea et Betioky ont tous deux un état savane, et que la différence entre forêt sèche et fourré haut, qui tient à une zonification biogéographique, n'entraîne pas de différence de rôle dans les transitions. La proximité des végétations des jachères de Mikea avec celles des hauts fourrés dégradés à Betioky, reste à vérifier. La sécheresse plus marquée sur la zone côtière limite la végétation des fourrés à des bas fourrés à Soalara, qui sont soumis à des pressions d'exploitation à proximité des villages. On ne retrouve pas de savane à Soalara, car la couverture herbacée est incorporée dans le Vala. La différence entre fourré haut et fourré bas est basée sur la zonification biogéographique.

Soalara resterait de toute façon à part, sans savane, avec le système foncier du Vala, qui correspond à un bocage fermé (infrastructure de haies) et qui rassemble à l'intérieur des états allant du fourré dégradé à la jachère herbacée sur-pâturée proche du sol nu.

COMPARAISON DES SCHEMAS DE TRANSITION

Un schéma de transition global pour les forêts sèches a 6 classes en considérant la classe ZA comme classe commune. Mais le ZA de Soalara en parc n'est pas équivalente à la ZA de Betioky; la principale différence serait le temps de séjour. Le temps de séjour en ZA Soalara est plus long et l'objectif est de constituer une réserve fourragère, alors que le temps de séjour en ZA à Betioky est plus court. Le premier est proche d'un état absorbant alors que le second est inclus dans une rotation. L'autre problème qui rend difficile la fusion des deux graphes de Soalara et Betioky est l'absence d'évolution observée entre bas fourré et haut fourré.

(1) Fourré - Forêt

Le temps de séjour ou le comportement est-il différent entre ces deux formations végétales ? Si aucune transition n'est repérée entre les deux, on s'interdit de fusionner les deux graphes de transition, d'où des modèles séparés si on valide la différence.

(2) L'état Recrû est-il semblable à l'état dégradé qui résulte de certains niveaux d'extraction ?

Les processus de recrû arbustif et de coupe sélective pour le charbon sont qualifiés de dégradation alors qu'ils sont de nature différente. La hauteur des arbustes dans la jachère, surtout l'espèce dominante, devrait marquer l'âge de la jachère. Comment se fait, après l'exploitation de charbon, la régénération à base d'arbustes entre les arbres restants ? On n'observe pas de processus de dégradation sur dalle calcaire ni à proximité des villages.

TYPES DE SOL

La contrainte édaphique apparaît sur le schéma de transition mais pas dans la matrice de transition ni dans la chaîne de Markov d'ordre 1. L'effet notoire du type de sol n'apparaît pas dans le modèle de transition simple markovien mais pourrait être introduit dans un Markov de second degré.

Sur dalle calcaire, le système actuel de foyer enterré ne permet pas la fabrication de charbon. Par contre, le pâturage est possible. Entre les dalles calcaires, la culture du maïs est la seule culture possible.

Les sables beige dans les situations côtières n'ont pas été étudiés par manque de temps.

VERS TROIS MODELES DE TRANSITION

Les résultats présentés nous font pencher vers la recherche des domaines de validité de trois modèles de transition distincts plutôt qu'un seul modèle générique qui couvrirait les forêts sèches et fourrés du sud-ouest.

Le modèle de Mikea a pour limite au nord une limite bio-géographique avec Morondave et la forêt de Kirindy (Raharimalala, 2010), si l'on démontre que ces formations végétales se distinguent.

Le modèle de Betioky est limité à l'est par les savanes, avec la disparition des zones cultivées.

Le domaine de validité du modèle Soalara s'étend jusqu'au parc national de Tsimanampetsotse, en bordure littorale Sud où dominent les sols salés, mais pas au-delà. Le modèle de Soalara s'étendrait donc sur la bande côtière, depuis Salary Bay jusqu'à Sud du plateau Mahafaly. Au-delà, plus au sud, on passe au modèle Androy qui a été décrit et documenté par Fanakoa (2010). Plus au Sud, la savane fait place à la steppe et l'alimentation des bovins repose sur des raquettes fourragères (Réau, 1996; Fanakoa, 2007). Les *raketa* (*Opuntia stricta*) constituent un complément alimentaire important aux zébus, la seule source de fourrage durant une partie de l'année. On peut considérer qu'il s'agit de plantations pérennes. Les *raketa* peuvent aussi être consommées par les humains.

Conclusion

L'application d'un modèle de chaînes de Markov aux données spatiales est contrainte par un nombre de dates restreint de l'ordre de 3 dates. Avec des images de Landsat 7 à 30m, la quantité de pixels reste limitée mais on peut espérer récupérer une dizaine de dates.

Pour des études plus détaillées, qui semblent nécessaires pour apprécier des stades de dégradation des formations végétales, on peut aussi traiter des images SPOT. Les images SPOT 5 en particulier, du fait de leur haute précision, fournissent un très grand nombre de pixels, mais sont disponibles pour un nombre de dates plus réduit (entre 3 et 10 dates selon les sites). Afin d'optimiser ces références de haute résolution, il est cependant nécessaire de poursuivre le dialogue inter-disciplinaire afin d'obtenir des données complémentaires permettant de formaliser les transitions et de finaliser l'analyse comparée des états de végétation et des phases d'extraction-dégradation.

Références bibliographiques

Casse T., Milhøj A., Ranaivoson S., Randriamanarivo J.R., 2004: «Causes of deforestation in southwestern Madagascar: what do we know?» *Forest Policy and Economics*, 6: p. 33-48.

Cornet A., Guillaumet J.L., 1976: « Divisions floristiques et étages de végétation à Madagascar ». Cahier *ORSTOM, Série Biologie*, 9: p. 35-42.

Fanakoa P.S., 2007: Dynamique des pratiques paysannes face à la déforestation de l'extrême sud de Madagascar. Thèse en sciences économiques UVSQ Versailles Saint-Quentin en Yvelines, 711 p.

Fanakoa P.S., 2010: « Understanding environmental issues using system dynamics methods. Pressure on Natural resources in Southern Madagascar". Les Cahiers du GERAD, G-2010-45, 08/2010, HEC Montréal – Canada, 21 p.

Franc A., Andriamaroahina T.R., Duranton J.F., Lecoq M., Legros Y., Luong-Skovmand M.H., Rabesisoa L.F., Randriamifidimanana H., Solofonaina H., 2004: La lute préventive antiacridienne à Madagascar. Contribution du CIRAD 2001-2003. Rapport final. FSP France, convention 1998-017. PCLA-Prifas N°66. CNA, Tuléar, Madagascar/CIRAD, Montpellier, 140 p.

Grouzis M., Razanaka S., Le Floc'h E., Leprun J.-C. 1999 : « Evolution de la végétation et de quelques paramètres édaphiques au cours de la phase post-culturale dans la région d'Analabo », dans S. Razanaka, M. Gouzis, P. Milleville, B. Moizo, C. Aubry (eds.), Sociétés paysannes, transitions araires et dynamiques écologiques dans le sud-ouest de Madagascar, Actes de l'atelier CNRE-IRD, 8-10/11/1999, Antananarivo, IRD-CNRE-SCAC: p. 327-337.

Hervé D., 2015: « 50 ans d'occupation du sol parcellaire après abattis-brûlis (forêt ombrophile de l'est malgache) », dans D. Hervé, S. Razanaka, S. Rakotondraompiana, F. Rafamantanantsoa, S. Carrière (eds.), Transitions agraires au sud de Madagascar, résilience et viabilité deux facettes de la conservation, Actes du séminaire de synthèse du projet FPPSM. 10-11/06/2013. Antananarivo. IRD-FSP/PARRUR: p. 45-70.

Hervé D., Müller J.P., Ratiarson V., Ramamonjisoa B., 2013: « Validation of agent-based land use model by Markovian model. Application to forest agriculture transitions in Madagascar ». Studia Informatica Universalis, V2CS special issue: p. 33-61.

Hosnah H.B., 2013 : Dynamique du couvert forestier dans le sud-ouest de Madagascar. Cas du fourré xérophile de Betioky-Sud et Soalara-Sud. DEA Foresterie-Développement-Environnement, ESSA-Eaux et Forets, Université d'Antananarivo, IRD, CNRE, 51 p. + annexes.

Lasry F., Grouzis M., Milleville P., Razanaka S., 2004 : « Dynamique de la déforestation et agriculture pionnière dans une région semi-aride du sud-ouest de Madagascar : exploitation diachronique de l'imagerie satellitale haute résolution ». Photo-Interprétation, 1 : p. 26-33.

Le Floc'h E., Aronson J., 2013: Les arbres des déserts. Enjeux et promesses. Actes Sud, 364 p.

Leprun J.C., Grouzis M., Randriambanona H., 2009: « Post-cropping change and dynamics in soil and vegetation properties after forest clearing: exemple of the semi-arid Mikea Region (southwestern Madagascar) ». Comptes-rendus Geoscience, 341: p. 526-537.

Masezamana H.N., Andrianarisoa J.H., Raoliarivelo L.I.B., Randriamalala R.J., 2013: Identification et analyse d'activités alternatives à la fabrication de charbon de bois dans le district de Toaliara II. Rapport DERAD, Q096, 67 p.

Radosy H.O., 2013 : Résilience des fourrés xérophiles face au pâturage des petits ruminants et à la fabrication de charbon de bois dans la commune rurale de Soalara-Sud (District de Toliara II, Région Atsimo-Andrefana). DEA Foresterie-Développement-Environnement, ESSA-Eaux et Forets, Université d'Antananarivo, IRD, CNRE, 51 p.

Raharimalala O., Buttler A., Ramohavelo C.D., Razanaka S., Sorg J.P., Gobat J.M., 2010: « Soil vegetation patterns in secondary slash and burn successions in Central Menabe, Madagascar ». Agriculture, Ecosystems and Environment, 139: p. 150-158.

Raherison M., Grouzis M., 2005: « Plant biomass, nutrient concentration and nutrient storage in a tropical dry forest in the South-West of Madagascar ». Plant Ecology, 180: p. 33-45.

Rakotovao V., 2013 : Evolution du biotope du criquet migrateur dans les communes de Soalara et le district de Betioky, sud-ouest de Madagascar. Master International Géosciences TRN Télédétection et Risques Naturels, Univ La Réunion, IOGA-IRD-CNRE, 45 p.

Ratiarson V., Hervé D., Müller J.P., 2011: Calibration et validation d'un modèle de dynamique d'occupation du sol postforestiere à base d'automate temporisé à l'aide d'un modèle markovien. Application a la transition foret-agriculture à Madagascar. *Cahiers Agricultures*, 20 (4): p. 274-279.

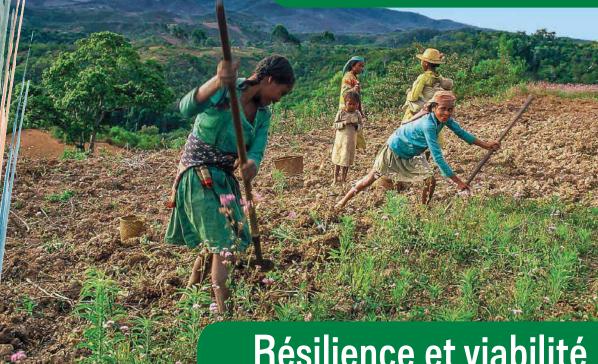
Razanaka S., 1996 : « Répartition des espèces xérophiles dans le sud-ouest de Madagascar », dans W.R. Lourenço (éd.), Biogéographie de Madagascar. Paris, ORSTOM : p. 171-176.

Réau B., 1995: Dégradation de l'environnement forestier et réactions paysannes. Les migrants Tandroy de la côte ouest de Madagascar. Thèse doctorale en géographie, Univ. Bordeaux 3.

Steininger M., Musinsky J., 2007: « Forest cover and change: Madagascar 1990-2000-2005». USAID. Mad_defor_irg07_final.pdf [en ligne] - Disponible sur internet: http://www.frameweb.org/ev.php? ID=70691_201&ID2=D0_T0PIC



au sud de Madagascar



Résilience et viabilité

deux facettes de la conservation

Editeurs scientifiques

Dominique Hervé, Samuel Razanaka, Solofo Rakotondraompiana, Fontaine Rafamantanantsoa, Stéphanie Carrière





Transitions agraires au sud de Madagascar. Résilience et viabilité, deux facettes de la conservation

Editeurs scientifiques

Dominique Hervé, Samuel Razanaka, Solofo Rakotondraompiana, Fontaine Rafamantanantsoa, Stéphanie Carrière

Actes du séminaire de synthèse du projet FPPSM : «Forêts, Parcs, Pauvreté au Sud de Madagascar» Antananarivo, 10-11 juin 2013

Antananarivo 2015















Mise au point des manuscrits et mise aux normes de la collection PARRUR

Noly Razanajaonarijery

Traduction des titres, résumés et mots clés en anglais

Domoina Rakotomalala

Conception de la couverture

François Adoré Razafilahy, MYE

Auteurs des photos de couverture

En recto de couverture, photo de Stéphanie Carrière En dos de couverture, photo de Dominique Hervé

Référence de l'ouvrage pour citation

Hervé D., Razanaka S., Rakotondraompiana S., Rafamantanantsoa F., Carrière S. (eds.), 2015. Transitions agraires au sud de Madagascar. Résilience et viabilité, deux facettes de la conservation. Actes du séminaire de synthèse du projet FPPSM «Forêts, Parcs, Pauvreté au sud de Madagascar», 10-11/06/2013, Antananarivo, IRD-SCAC/PARRUR, Ed. MYE, 366 p.

© IRD, 2015

ISBN: 978-2-7099-1891-6