DYNAMIQUES SPATIO-TEMPORELLES DES SAVANES INCLUSES EN FORÊT (MADAGASCAR)

Dominique HERVE[1-2]*, Avisoa ANDRIANARIVO[1-3], Andry RANDRIANARISON[1-3], Gaëtan RATOVONIRINA[1-3], Vonjison RAKOTOARIMANANA[1-3], Samuel RAZANAKA[1-4]

[1] *Modélisation pour l'Environnement à Madagascar (Institut de Recherche pour le Développement - Université de Fianarantsoa), Ecole Nationale d'Informatique, BP 1487, 301 Fianarantsoa, Madagascar*

[2] *Institut de Recherche pour le Développement, Ambatoroka, BP 434, 101 Antananarivo, Madagascar*
Tel: (261) 20 2233098. Télécopieur: (261) 20 2236982
Courriel : dominique.herve@ird.fr

[3] *Université d'Antananarivo, BP 906, 101 Antananarivo.*
Faculté des Lettres, Département de Géographie, Courriel : anarivoandriana@gmail.com
Faculté des Sciences, Département de Biologie et Ecologie Végétale
Courriel : arandrianarison@yahoo.fr, gaets08@yahoo.fr, vonjison@yahoo.fr

Soumis le 1er mars 2009; accepté le 30 juin 2010 - © *Revue Télédétection*, 2010, vol. 9, n° 3-4, p. 182-194

Résumé :

Le « corridor forestier » de Fianarantsoa, vestige des forêts humides de l'Est malgache, est menacé de fragmentation, au niveau des axes piétonniers qui le traversent d'Ouest en Est. Le long du sentier de Sahabe-Tsianivoha, au centre du corridor, des savanes incluses, car entourées de forêt, ont été observées en 2008. Les trajectoires de 11 unités de savanes incluses, situées le long du sentier, et de 7 unités situées hors sentier, sont reconstituées grâce à des images multi-supports (carte 1937, photos aériennes au 1/50 000 de 1957 et 1991, SPOT-2 20 m d'août 1999 et SPOT- 5 10 m d'avril 2008). Ces savanes incluses ont entre 50 et 70 ans d'âge, proviennent de la forêt et se maintiennent en herbe par le feu répété, sans globalement augmenter de surface depuis 1957. Plus on s'éloigne du village, plus la régénération forestière l'emporte. Les savanes de versant, dans les mosaïques forêt-savane plus proches du village, sont également stables après avoir augmenté de surface. Par contre les unités situées en dehors du sentier ont augmenté de taille entre 1957 et 2008. Récemment, avant avril 2008, 7 nouvelles ouvertures de la forêt sont apparues, dont 5 le long du sentier, pour aménager les bas-fonds les plus éloignés en rizière et défricher les bas de versants, justifiant une activité de veille permanente. Il apparaît donc que, suivant les périodes, la savane régresse ou s'étend, au contact avec la forêt, et selon des trajectoires différentes localement. On en déduit une méthode d'étude spatiale des dynamiques de ces savanes incluses applicable à l'ensemble du « corridor forestier ».

***Mots-clés** : savanes incluses, forêt, Madagascar, sentier piétonnier, corridor*

Spatial and temporal dynamics of savanna included into forest (Madagascar)

Abstract

The Fianarantsoa forest corridor, which links two national parks, Ranomafana and Andringitra, is representative of the relic eastern rain forest of Madagascar. Its central portion is threatened by fragmentation. Breaking up is possible in each of the 10 tracks which cross the corridor allowing men and food transit between West and East. We study in the more important one, the Sahabe-Tsianivoha footpath, the spatial dynamics of savanna included into forest. The temporal dynamics of 11 included savanna units alongside the track and of 7 units localized out of the footpath, are deduced from the treatment of 1937 topographic map, 1957 and 1991 aerial photographs, SPOT-2 image 20 m from August 1999 and SPOT-5 image 10 m from April 2008. Spatial analysis with aerial and satellite imagery show that the savanna units, actually surrounded with forest, came from forest 50 to 70 years ago. They stayed in savanna by repeated fire, without expanding too much. The green savanna biomass is the fodder reserve of zebu livestock. The included savanna surface area shows a relative stability, with fluctuations, but the savanna surface area outside the footpath axis, increases. The diagnosis of a major deforestation along these footpaths may not be general either in space or in time. 4 types of included savanna trajectories are identified after 1957: surface area constant increasing, irregular increasing, stable and decreasing. Decreasing tendency, which means forest regeneration, is observed in the units very

far from the village. However, 5 new open zones appear in the footpath forest and 2 outside the footpath just before April 2008, in zones very far from Sahabe village, very near the eastern cliff. This kind of land use dynamic after 50 years of apparent stability justifies some permanent observatory activity. A spatial methodology to study these included savannas is tested in the patchy forest landscapes of central corridor to be applied in other included savannas of the eastern forests of Madagascar.

***Keywords**: included savannas, forest, Madagascar, footpath, corridor.*

1. INTRODUCTION

En milieu tropical humide, la déforestation conduit à des végétations herbacées. Dans certaines situations, la savane s'installe définitivement (Avenard, 1969), dans d'autres, elle n'est qu'un état transitoire dans la régénération forestière (Rakotoarimanana et al., 2008, Günther et al., 2007). L'origine des savanes malgaches, comme celles d'Afrique centrale (Vande Weghe, 2004), est controversée (Keay, 1959, Klein, 2002), d'origine paléo-climatique (Burney, 1997, Humbert, 1927, Perrier de la Bathie, 1921), édaphique, ou par l'action du feu (Kull 2004, Burney 1996) et de l'homme (Gade, 1996). Dans sa bibliographie sur le contact forêt-savane en Afrique tropicale, Avenard (1969) signale l'existence en forêts humides d'îlots de savane ou de grandes clairières plus ou moins parsemées d'arbres. Ces savanes entourées de forêt, ou « savanes incluses », ont été étudiées par le programme ECOFIT (Servant et Servant-Vildary, 2000) et des interprétations ont été apportées sur leur origine et leur persistance (Favier et al. 2004).

Par ailleurs, les ressources forestières de Madagascar ont subi depuis des siècles de nombreuses pressions dues aux cyclones, à l'exploitation minière, à l'exploitation forestière, aux feux de brousse et à la mise en culture par abattis-brûlis. L´Organisation des Nations Unies pour l´Alimentation et l´Agriculture (FAO) a estimé en 1997 que dans les pays en développement, le rythme annuel de la déforestation se chiffre à 15,5 millions d´hectares pour la période 1980-1990 et à 13,7 millions d´hectares pour la période 1990-1995. Les pays les plus touchés sont ceux ayant des forêts de type tropical humide comme la grande île de Madagascar. Les estimations du taux de déforestation font l'objet de débats à Madagascar. Des estimations à partir de satellite du taux de disparition moyen annuel des forêts naturelles malgaches donnent, pour la période 1990-2000, 0.82% par an et 0.79% pour la forêt humide, pour la période 2000-2005, 0.55% par an et 0.35% pour la forêt humide (Harper et al., 2007). Dufils (2003) estime à 0,61% le taux annuel moyen de déforestation de la forêt sempervirente entre 1993 et 2000 dans le corridor Ranomafana – Andringitra (figure 1). Ces forêts laissent peu à peu la place à des formations secondaires qui, à la suite du passage répété du feu, deviennent des savanes arborées puis herbeuses, ces dernières pouvant rester relativement stables dans une mosaïque forêt-savane (Rakotoarimanana et al., 2008). La conservation de la couverture forestière est devenue un enjeu national à Madagascar, notamment depuis les plans environnementaux adoptés de 1990 à 2005 (Chaboud et al. 2007).

Dans ce contexte, la dynamique de ces savanes incluses traduit celle de la lisière forêt-savane depuis leurs origines en éclairant les processus conjoints de régression et régénération de la forêt ; nous les choisissons à ce titre comme indicateurs de l'évolution du couvert forestier.

Le couloir forestier de l'ex-province de Fianarantsoa représente un vestige de la forêt dense humide sempervirente des hautes terres de l'Est malgache, qui contribue au maintien de la biodiversité des massifs forestiers qu'il relie, les parcs nationaux de Ranomafana et d'Andringitra (Rasolonandrasana et Goodman, 2000), même si son rôle comme corridor forestier garantissant les flux génétiques nécessaires à la survie des espèces menacées n'a pas été démontré (Carrière-Buchsenschutz, 2006, Carrière et al., 2008). C'est la raison pour laquelle les responsables de la conservation cherchent à tout prix à éviter la rupture de ce couloir forestier, en particulier là où les mosaïques de forêt-jachère-savane prennent l'aspect d'îlots de savanes totalement entourées de forêt (Rakotoarimanana et al., 2008). L'analyse spatiale de ces savanes incluses amène à se poser un certain nombre de questions : Quelle est l'origine et comment ont évolué les savanes incluses jusqu'à présent ? Quelles sont les causes de leur persistance dans un état herbacé alors qu'elles sont entourées de forêt résiliente? A partir de ces ouvertures, la forêt avoisinante est-elle en cours de régression ? Ainsi, cette recherche a pour objectifs de déterminer à quelle période sont apparues ces savanes incluses, si leur surface a changé jusqu'à maintenant, et d'en déduire la dynamique de la lisière forestière. Nous testons l'hypothèse d'une extension des savanes incluses le long d'un sentier traversant le corridor forestier est malgache par une analyse spatiale multi-dates et multi-supports.

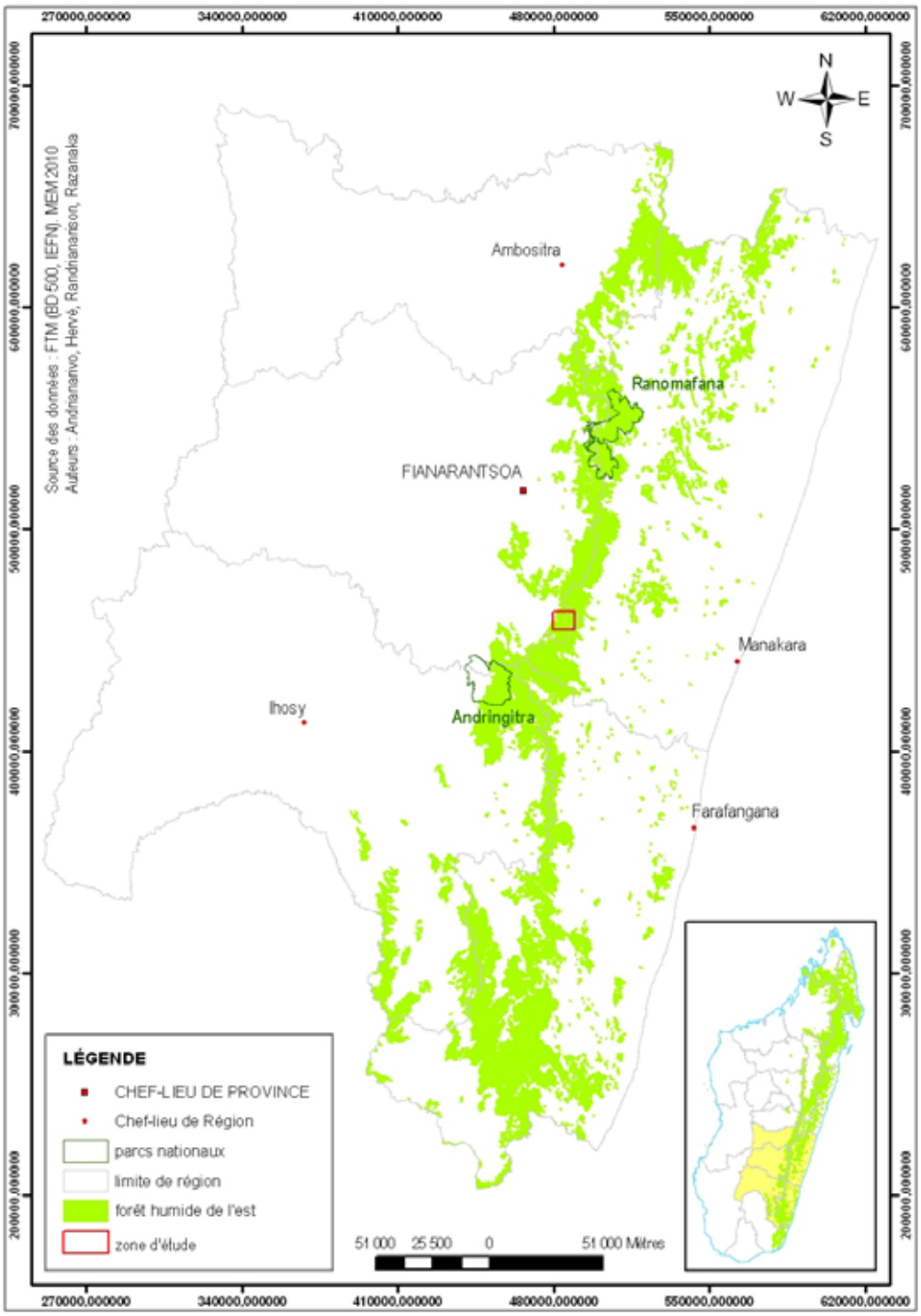


Figure 1. Le couloir forestier de l'ex-province de Fianarantsoa
Figure 1. The Fianarantsoa humid forest

2. MILIEU D'ÉTUDE

Le couloir forestier de Fianarantsoa qui relie les parcs nationaux de Ranomafana et Andringitra, appartient à la forêt humide de Madagascar, qui longe tout l'escarpement Est de l'île, du Nord au Sud (figure 1). La bande ouest, au nord de ce couloir, présente une mosaïque de forêt naturelle plus ou moins dégradée, jachères à différents stades d'évolution, formations herbeuses, rizières et cultures de pente (Serpantié et al., 2007), et, au centre du couloir, des plantations d'eucalyptus qui persistent dans les situations sommitales (Moreau, 2002). La traversée de cette bande de forêt naturelle entre les parcs de Ranomafana et Andringitra, hormis une route et une voie de chemin de fer au Nord, n'est possible qu'en empruntant l'une des 10 pistes piétonnières, parcourues par les hommes chargés de produits entre l'Ouest (riz, tabac) et l'Est (alcohol de canne, fruits) (figure 2). La fenêtre de la zone d'étude est centrée sur le sentier le plus emprunté, qui relie le fokontany betsileo d'Andohanimananatanana, chef lieu de Sahabe, à l'ouest, au fokontany tanala de Tsianivoha à l'est du corridor (figure 3) ; il traverse un chapelet de savanes incluses qui pourrait constituer une menace

de rupture du couvert forestier (Raharinomenjanahary et al., 2008). L'altitude varie de 1100 à 1250 m, la pluviométrie annuelle est de 1600 mm et la température moyenne annuelle de 18,9 °C. Le climat est de type tropical unimodal de moyenne altitude, frais et sec d'avril à septembre, et pluvieux de novembre à mars. Les sols sont ferralitiques rouge et jaune/rouge particulièrement pauvres. Le couloir de 400 km de long et 15 km de large est couvert d'une forêt dense sempervirente ombrophile de moyenne altitude caractérisée par la série à *Weinmannia sp.* (Cunioniaceae) et *Tambourissa sp.* (Monimiaceae) définie par Humbert et Cours Darne (1965). La formation herbacée appartient aux savanes à *Aristida similis* (Morat, 1973). La caractéristique des savanes incluses est que cette formation est totalement entourée par la forêt. Les bas-fonds sont aménagés en rizières et les versants sont exploités en cultures annuelles par des agriculteurs et éleveurs betsileo.

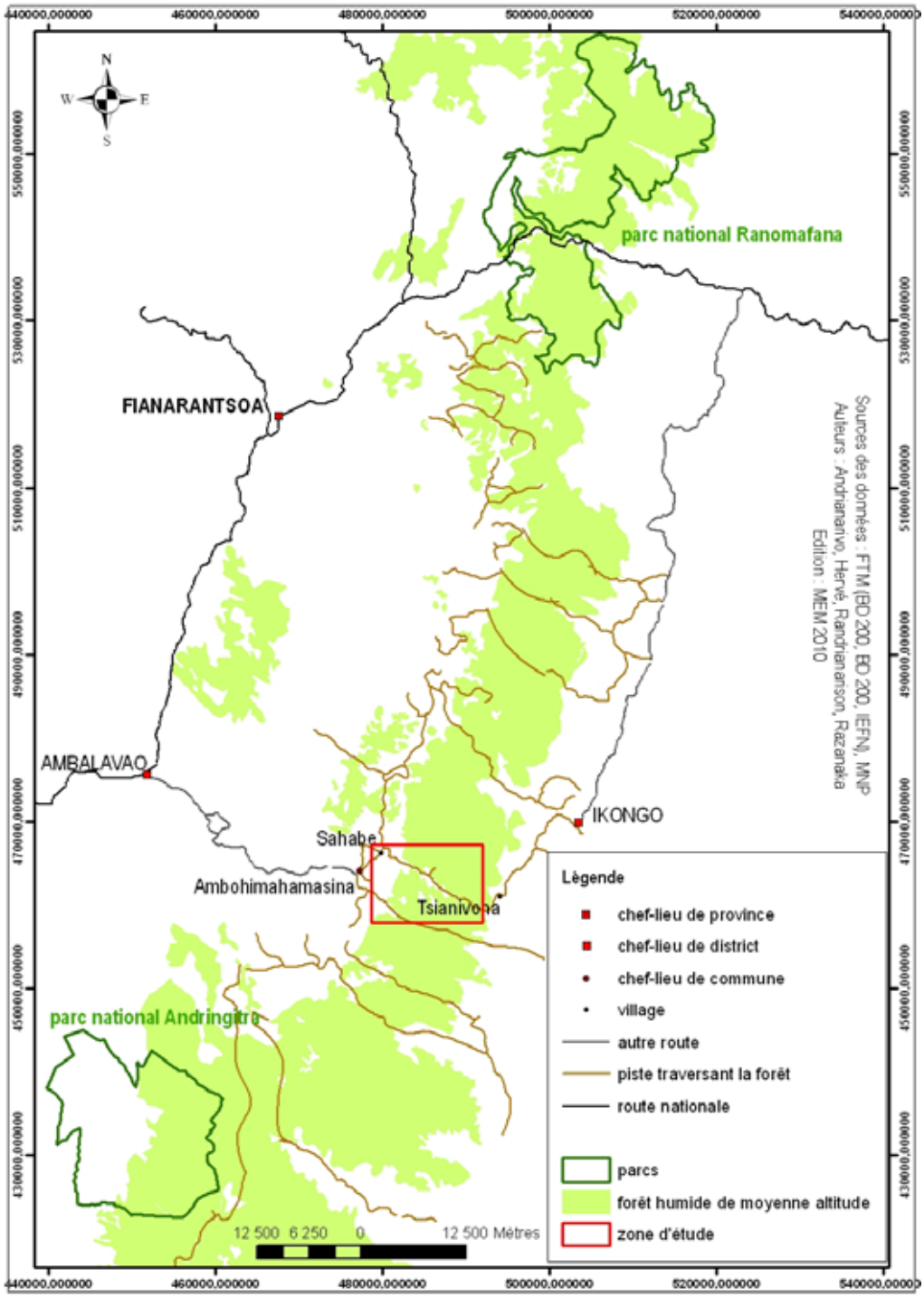


Figure 2. Les pistes piétonnières traversant le « corridor » entre Ranomafana et Andringitra
Figure 2. Tracks crossing the "corridor" between Ranomafana and Andringitra

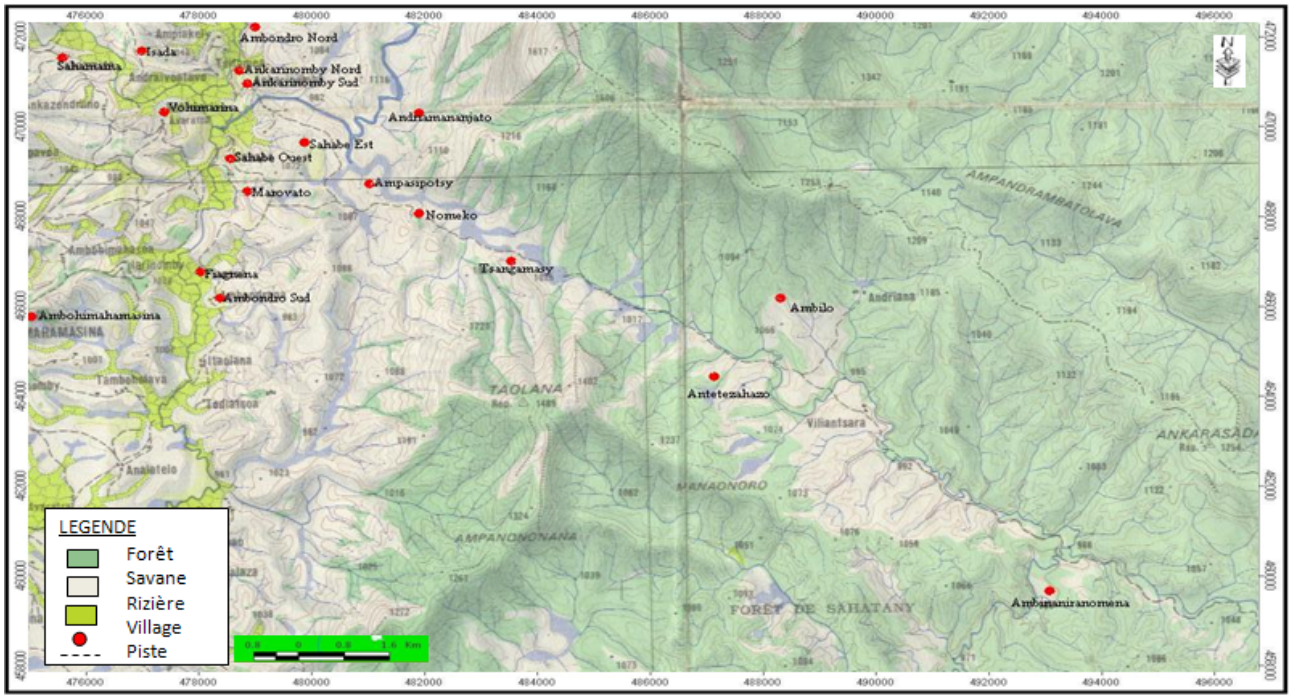


Figure 3. La zone d'étude : le sentier Sahabe - Tsianivoha
Figure 3. The studied zone: the Sahabe - Tsianivoha footpath

3. MATÉRIELS ET MÉTHODES

3.1. Unités paysagères

Nous distinguons deux unités paysagères dans lesquelles se trouvent les savanes observées en 2008, les « unités de savanes incluses » et les « unités composites ».

Les « unités de savanes incluses » sont des clairières dans la matrice forestière, des îlots herbacés entourés de forêt, formant un chapelet le long de la piste piétonnière (A) ou situés en dehors de cet axe (B). Elles peuvent contenir une faible proportion de marais, rizières et recrûs forestiers, mais la surface en savane est proche de la surface totale de l'unité. Leurs contours ont été repérés et délimités précisément à partir de la photo-interprétation par lunettes stéréoscopiques de l'imagerie aérienne de 1991.

Les « unités composites » sont des zones non totalement entourées de forêt et dans lesquelles des savanes sur versants coexistent avec d'autres usages du sol. Les savanes sont situées sur des versants dont la pente varie de 12 à 43%, en aval d'un massif forestier, constitué de bois plantés d'*Eucalyptus sp*. et secondairement de *Pinus sp.* ou de forêt naturelle, mais dont il ne reste qu'une formation sommitale (Moreau, 2002). Dans ce cas, les savanes ne sont pas bornées latéralement par la forêt, on ne peut les isoler comme des unités spatiales de savanes incluses. Elles font partie de mosaïques agri-forestières composites, regroupant également rizières, marais, cultures sur pente, et bois plantés. On n'abordera pas la dynamique des savanes dans ces unités spatiales « composites » ; on se contentera de repérer comment ces unités se sont mises en place aux dépends de la forêt, avec le recul de la frontière forêt-non forêt.

Le long du sentier, des prospections dans les savanes et les forêts de contact, et l'échantillonnage des biomasses aériennes, ont permis de caractériser les formations végétales (Randrianarison, 2009, Ratovonirina, 2009).

3.2. Matériel utilisé

L'analyse spatio-temporelle de ces unités paysagères visant à estimer les surfaces des savanes incluses depuis 1937 s'apparente aux méthodes multi-dates et multi-supports (N'Guessan et al, 2003). L'analyse spatiale repose sur la photo-interprétation de photographies aériennes à l'échelle 1/50 000 de 1957 et de 1991 et le traitement d'images SPOT acquises dans le cadre du programme d'Incitation à l'utilisation Scientifique des Images SPOT (ISIS) du Centre National d'Études Spatiales (CNES). Nous avons choisi deux images SPOT à 4 bandes spectrales XS1, XS2, XS3, XS4 : SPOT 2,20 m, du 7 août 1999 et SPOT 5,10 m, du 15 avril 2008. Des cartes topographiques sont utilisées comme référence pour situer la limite forestière aux dates antérieures : les feuilles « O54 Alakamisy Itenina » au 1/100 000 de 1940 (issue de données de 1937) et 1975 (issue de données de 1958), et la feuille « O54 Sud Ambohimahamasina » au 1/50 000 de 1976 (issue de données aériennes de 1957 et terrain de 1972). En combinant ces différentes sources, nous reconstituons l'évolution des savanes incluses à différentes dates : 1937, 1957, 1991, 1999, 2008. Entre 1999 et 2008, nous utilisons une image de Google Earth qui, en 2008, n'avait pas la résolution maximale affichée pour d'autres zones à l'Ouest du

corridor, et sur laquelle ne sont donc pas fournies les métadonnées correspondantes. Nous en déduisons que ni SPOT ni Quickbird, mais trois couvertures Landsat (2001, 2005, 2007) ont pu être utilisées par Google Earth pour construire cette image de notre zone d'étude. Malgré l'imprécision de la date, l'observation du sentier sur l'image Google Earth nous sert à vérifier une présence/absence de nouvelles ouvertures dans la forêt, entre 2001 et 2007, donc avant 2008. Par la suite, nous convenons de désigner cette période par sa moyenne : [2004].

3.3. Détermination des surfaces des savanes incluses

3.3.1. Photos aériennes

La qualité médiocre des photos aériennes a été contournée en augmentant les contrastes des couleurs sous le logiciel Adobe Photoshop 7.0. Les photos aériennes ainsi corrigées ont été géoréférencées en utilisant ArcView 3.3 et son extension Image Analysis 1.1a., sur la base de données de l'Institut national de cartographie et de géodésie (FTM) : cartes de la couverture forestière nationale de 1994 et 2000 (IEFN Inventaire écologique et forestier national), bases de données au 1/100 000 et 1/500 000 datant de 2005.

La seconde étape consiste à faire une classification non supervisée sous ArcView, en ajustant progressivement les paramètres jusqu'à obtenir des polygones se superposant correctement à l'image brute. Les polygones sont ensuite exportés en vecteur (shapefile) pour le calcul de surface. Les surfaces des savanes incluses de 1957 et 1991 sont approchées par celles des unités spatiales de savanes incluses issues du traitement. L'erreur est faible car ces unités spatiales sont majoritairement en savane.

3.3.2 Images satellites

Les images satellites ont été traitées sous le logiciel ENVI 4.5 de International Telephon and Telegraphe Visualization, et prétraitées par correction radiométrique.

La reconnaissance de terrain de 2008 s'est appuyée sur des croquis très détaillés de chaque unité de savane incluse, confectionnés à partir de l'augmentation permise par les lunettes stéréoscopiques, sur la photo aérienne de 1991. La classification supervisée de 1999 a donné 4 catégories : savane, forêt, bois (eucalyptus + pins), autre, et celle de 2008, 6 catégories : savane, forêt, bois (eucalyptus + pins), rizières, ouvertures récentes (marais et défriche de bas de versants), autre. On ne dispose donc d'un usage du sol détaillé qu'en 2008.

Les images sont ensuite prises une à une et catégorisées en mode binaire : forêt + bois et non-forêt + non-bois, en 2008 puis en 1999. On délimite ainsi des unités spatiales de non forêt. Ces images catégorisées en raster sont transformées en vecteur. Les unités spatiales de savanes incluses prennent alors la forme de polygones fermés dont la surface est mesurée sous ArcGIS. L'estimation des surfaces en 1999 est sans doute sous-évaluée puisque la résolution de 20 m exclut les plus petites unités. La version ESRI ArcGIS 9.2 avec l'extension Image Analysis est ensuite utilisée pour la confection des cartes.

Pour les images Google Earth on a procédé à une capture d'écran, puis calage pour le géoréférencement selon la carte FTM scannée, au même titre que les photos aériennes. Une classification non supervisée, puis une extraction en vecteur ont permis de déterminer la surface des polygones sous ArcView.

3.4. Les unités paysagères composites

Dans le cas des unités paysagères composites, les savanes sur versant sont incluses dans une mosaïque, qui a pris la place de la forêt. On procède à l'extraction de la limite forêt-non forêt qui délimite des unités, à la main sur la carte de 1940 (limites de 1937), et à partir de la classification non supervisée pour 1957. Ces limites sont exportées sous forme vectorisée sous ArcView et reportées sur le fonds de carte de ? (figure 6). On compare les deux limites forestières de 1937 et 1957 mais sans calculer de surface.

4. RÉSULTATS

4.1. Typologie des unités spatiales de savanes incluses du sentier

4.1.1. Délimitation

Les unités spatiales de savanes incluses ont été délimitées grâce aux photos aériennes de 1991. La photo aérienne de 1957 montre, le long de la piste piétonnière, un chapelet d'unités de savanes incluses qui a pu être observé sur le terrain dans son intégralité en 2008 (figure 4). Par contre la carte IGN de 1940, basée sur des relevés de terrain de 1937, ne montre aucune ouverture dans la forêt qui aurait pu être une amorce de savane incluse. Cette carte montre que le sentier est encore en forêt et que la seule aire défrichée se trouve à l'ouest, à proximité de Sahabe ; les marais ou bas-fonds le long des rivières n'apparaissent pas encore aménagés en rizières. La figure 6 indique la limite de la forêt reportée sur le fonds de la carte topographique de 1975 établie sur des photos aériennes de 1957. Nous en déduisons que la date

d'apparition de ces unités de savanes incluses se situe probablement entre 1937 et 1957, qu'elles proviennent toutes d'une défriche de la forêt et qu'elles se sont maintenues jusqu'en 2008.

Le long du sentier Sahabe-Tsianivoha, dans sa partie betsileo, nous avons identifié sur le terrain en 2008 11 unités spatiales de savanes incluses (A) disposées en chapelet, qui correspondent aux unités ouvertes en forêt dans l'intervalle 1937-1957 (figure 4). La typologie de ces 11 unités est établie à partir de l'évolution de leurs surfaces entre 1937 et 2008 (Tableau 1). Hors de ce sentier, 7 unités spatiales de savanes incluses (B) sont distinguées comme îlots de savane dans une matrice forestière. L'évaluation de leur surface aux différentes dates est indiquée dans le tableau 2.

Les unités de savanes incluses (A et B) se distinguent des unités composites le long du sentier car elles sont entourées de forêt, et des unités composites hors sentier, car elles sont majoritairement en savane et non habitées. Lorsqu'elles entrent en coalescence avec les unités voisines du fait de la réduction de la bande forestière qui les séparait, ou lorsqu'elles sont habitées (campements), d'autres usages du sol apparaissent : rizières, parcelles cultivées, boisements et elles font alors partie d'unités composites.

Tableau 1. Surface des unités de savanes incluses le long du sentier (ha)
Table 1. Surface area of included savannas units alongside the footpath (ha)

Source/Année Code	Photo aérienne 1957	Photo aérienne 1991	SPOT 1999	Google Earth [2004]	SPOT 2008
A1	0,4	0,2	0,1	0,35	1,22
A2	3,4	1,8	0,74	0,6	0 ,87
A3	0,3	1,5	0,84	1,6	2,74
A4	0,3	0,2	0,2	0,4	1,73
A5	2,4	3,5	1,76	2,3	2,28
A6	5,9	8,2	8,36	7,3	7,79
A7	8,5	14	11,8	11	15,27
A8	0,71	1,19	1,12	1,1	1,35
A9	25,33	25,79	25,54	24,64	23,64
A10	2,56	2,11	1,36	1,41	2,13
Total	49,8	58,49	51,82	50,7	59,02

Tableau 2. Surface des unités de savanes incluses hors sentier (ha)
Table 2. Surface area of included savannas units localized out the footpath (ha)

Source/Année Code	Aérien 1957	Aérien 1991	SPOT 1999	SPOT 2008
B1	5,36	17,83	10,96	12,04
B2	x	x	2,96	7,47
B3	34,16	35,15	41,16	39,04
B4	52,36	-	23,44	54,23
B5	11,73	-	7,56	12,25
B6	-	-	x	6,97
B7	-	-	6,2	4,6
Total	103,61		92,28	136,6

(X) Présence confirmée mais évaluation de surface impossible.
(-) Evaluation de surface impossible (flou, nuages).

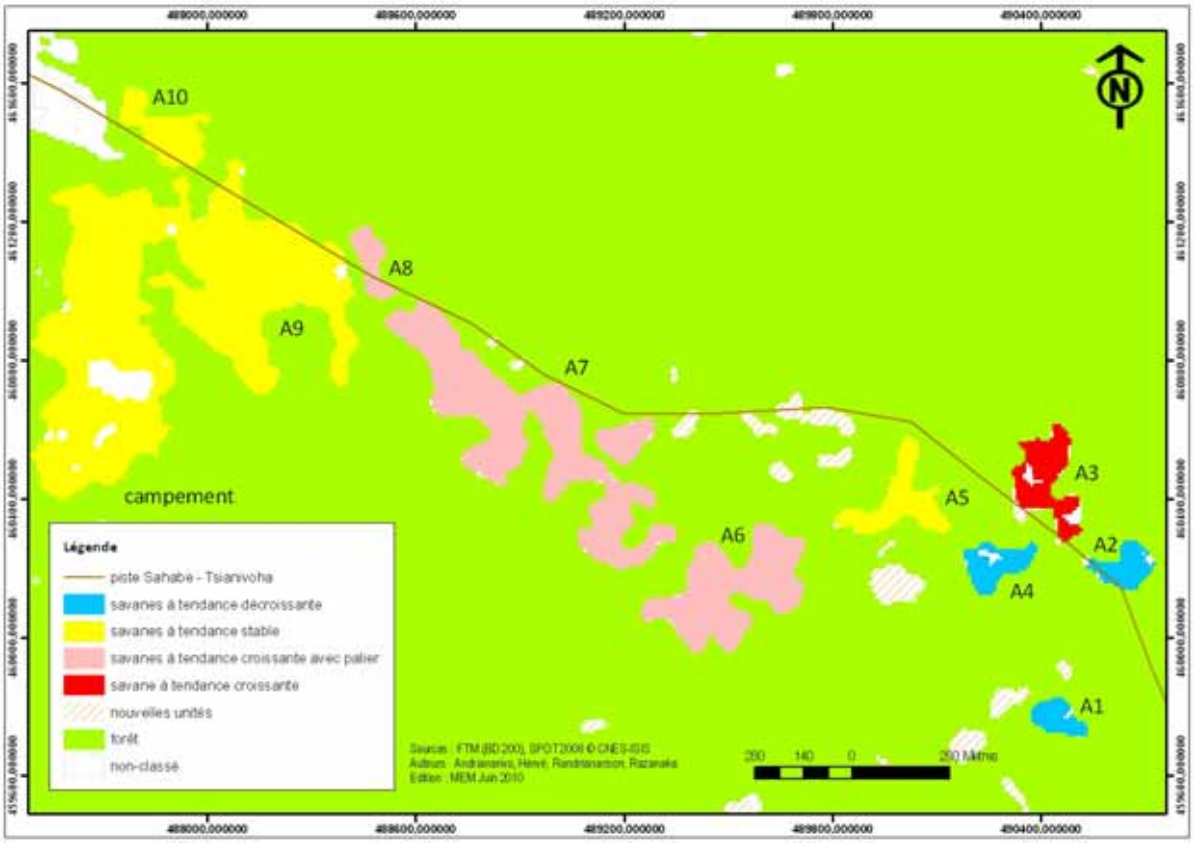


Figure 4. Typologie des unités de savanes incluses du sentier Sahabe - Tsianivoha
Figure 4. Typology of included savanna units alongside the Sahabe - Tsianivoha footpath

4.1.2. Evolution des surfaces

Le long du sentier, les surfaces de toutes les zones de savanes incluses augmentent entre 1937 et 1957. C'est à partir de 1957 que les allures des courbes se différencient en quatre types (figure 5, tableau 1) :

1. Tendance croissante soutenue suivie par la seule unité A3. Elle présente une tendance croissante entre 1957 et 1991, est stoppée après 1991 et reprend à nouveau jusqu'en 2008 (figure 5-1).
2. Tendance croissante avec pallier suivie par les unités A6, A7, A8. L'unité A6 présente une tendance croissante entre 1957 et 1991, puis un pallier, mais qui reprend à la hausse en 2008 (figure 5-2).
3. Tendance stable suivie par les unités A5, A9, A10. L'unité A10 présente une tendance croissante entre 1957 et 1991, puis des fluctuations qui aboutissent en 2008 à une surface tout juste inférieure à celle de 1957 (figure 5-3).
4. Tendance décroissante suivie par les unités A1, A2, A4. L'unité A4 présente une tendance décroissante depuis 1957 et au-delà de 1991-1999, suivie d'une augmentation en 2008 (figure 5-4), représentative des unités les plus éloignées de Sahabe. On observe avant 2008 une réduction de la savane au profit de la forêt, ce qui signifie que dans ces unités la forêt se régénère.

La surface totale de ces savanes incluses passe de 0 en 1937 à 49,8 ha en 1957, 58,49 ha en 1991, 51,82 ha en 1999, 50,7 ha en [2004], 59,02 ha en 2008 (tableau 1). On retrouve les fluctuations observées dans le détail pour certaines unités, le pic de 1991, puis le pallier des années 2000, qui correspond à une reprise de la forêt, enfin l'augmentation récente des surfaces en savane jusqu'en 2008. Globalement, ces savanes incluses avaient récupéré en 1999 la même surface qu'elles avaient en 1957, mais leur surface avait à nouveau augmenté en 2008.

A ce constat s'ajoute l'accroissement significatif des ouvertures sur la forêt (6,31 ha) pour une autre occupation du sol que des savanes. Ces nouvelles ouvertures, constatées sur les images SPOT 2008, étaient absentes des images Google Earth [2004] (figure 4). Avant avril 2008 sont apparues 5 nouvelles unités ouvertes en forêt sur l'axe de la piste piétonnière (5,47 ha), et 2 unités hors sentier (0,84 ha). Aucune des 5 unités n'avaient été repérées lors du travail de terrain de janvier à juillet 2008 : 3 îlots sur le rebord ouest de la falaise sont dans un site peu accessible situé au-delà des dernières unités repérées sur le terrain (2,91 ha), et 2 îlots ne sont pas visibles depuis le sentier (2,56 ha). Leur signature spectrale les distingue des savanes ; ce sont des zones humides, marais ou rizières aménagées dans des bas-fonds, et éventuellement des défriches de bas de pentes. L'ensemble de ces ouvertures récentes sur la forêt confirment qu'une dynamique récente de déforestation est à l'œuvre.



Figure 5. Evolution des surfaces des unités de savanes incluses le long du sentier (ha)
(1) tendance croissante soutenue A3, (2) tendance croissante avec pallier A6, (3) tendance stable A10, (4) tendance décroissante A2
Figure 5. Evolution of the surface area of included savanna units alongside the footpath (ha)
(1) constant increasing A3, (2) irregular increasing A6, (3) stable A10, (4) decreasing A2

4.2. Unités hors sentier

Les 7 unités hors sentier, qui ont pu être individualisées dans la matrice forestière pour estimer leur surface, sont encore des savanes incluses. La présence de nuages et la moindre qualité des photos aériennes n'ont permis de reconstituer que partiellement les années 1957 et 1991, mais plus complètement sur les images SPOT 1999 et 2008 (tableau 2). Les surfaces de ces unités augmentent avec ou sans pallier, ou diminuent mais en retrouvant en 2008 leur surface de 1957. Les totaux, incomplets, ne sont pas comparables mais il semble que la surface en 2008 dépasse celle de 1957.

4.3. Unités composites

Dans les unités composites du sentier, l'évolution de la lisière forêt-savane n'est claire qu'entre 1937 et 1957 (figure 6) et très limitée entre 1957 et 1991. Les surfaces de ces unités se stabilisent à partir de 1991, ce qui correspond à une évolution sensiblement similaire aux savanes incluses. Dans les unités composites hors sentier, de surface plus importante que les unités de savanes incluses, les savanes coexistent avec d'autres usages du sol ; leur surface ne peut donc pas être estimée par celle des unités auxquelles elles appartiennent.

On interprète donc les unités composites comme une coalescence d'unités de savanes incluses, dans des mosaïques paysagères, en grande partie habitées, constituant des îlots de taille importante hors sentier ou regroupées dans un paysage agri-forestier à l'ouest du sentier et à proximité de Sahabe (figure 3). Par contre, dans les situations les plus éloignées, à l'est de Sahabe, des savanes incluses peuvent se réduire en donnant lieu ainsi à des régénérations forestières.



Figure 6. Limites de la forêt 1937 sur fonds de carte 1975
Figure 6. 1937 forest limits on 1975 topographic map

5. DISCUSSION

5.1. Origine des savanes incluses

La comparaison de la carte de 1940 au 1/100 000 et la photo aérienne de 1957 révèle les difficultés de valorisation des documents anciens. Les relevés de 1937 indiquent clairement une limite forestière. Moins clairement, les manchons dessinés le long des rivières semblent représenter des marais ou bas-fonds non aménagés en rizières. Ce qu'on retient, entre 1937 et 1957, c'est le recul de la forêt à l'ouest du sentier sortant de Sahabe et l'ouverture de clairières vers l'est, qui n'apparaissent pas sur la carte de 1940.

Nous avons mené des enquêtes en 2008, dans les environs de Sahabe, auprès des plus anciens. Selon ces témoignages, il apparaît qu'à la fin de la période coloniale, entre 1937 et 1957, des surfaces importantes de forêts ont été exploitées pour le bois par les colons alliés aux merina et une main d'œuvre betsileo. Cette exploitation s'est déroulée dans une période sans doute troublée par les soulèvements de mars 1947. Les enquêtes et les observations dans les savanes incluses révèlent des restes d'occupation sédentaires et des traces de plantation de caféiers, d'eucalyptus et de vignes. C'est à partir de 1957 que les évolutions diffèrent.

5.2. Tendances d'évolution des surfaces de savane incluse

La tendance croissante soutenue est peu représentée. L'augmentation de surface de l'unité A3 est due à la coalescence de plus petites unités.

Parmi les tendances stables, l'unité paysagère « campement » (A10) a eu une évolution d'unité composite. Habitée depuis 30 ans, sa surface défrichée était déjà définie en 1957 (tableau 1), autour d'un marais qui a été aménagé en rizière dans les années 2000 ; sa culture en riz a été constatée en 2008. Dans les unités les plus proches de Sahabe, qui ont des surfaces plus importantes que les savanes incluses, la surface en savane fluctue mais varie peu. On peut considérer que cette surface est stabilisée.

La tendance croissante avec pallier indique une courbe qui continue de croître après 1957 jusqu'en 1991. On atteint à cette période un pallier durant laquelle la surface de ces unités est maximum. Les surfaces diminuent ensuite jusqu'en [2004] puis augmentent à nouveau jusqu'en 2008. Ces savanes correspondent à des zones de pâturage. On observe un passage répété du feu mais les réglementations sur la date des mises à feu et l'utilisation de pare-feu sont respectées. La surface brûlée produit un pâturage jeune de bonne qualité fourragère pour les troupeaux de zébus.

La tendance décroissante concerne la période postérieure à 1957. De 1957 à [2004], c'est-à-dire pendant une cinquantaine d'années, ces savanes sont recolonisées par le couvert forestier. Après une perturbation qui a pu durer 20 ans, mais probablement 10 ans du fait des soulèvements, ne peut-on pas analyser ces résultats en termes de régénération du couvert forestier sur une durée de 50 ans ? De telles données sur la régénération forestière sont excessivement rares. L'éloignement par rapport à l'agglomération de Sahabe, et l'abandon du feu depuis la fin des années 1990, peuvent être interprétés comme des causes de la régression des surfaces des savanes incluses. Cependant, du fait d'une évolution récente et par coalescence, les surfaces ont pu augmenter en 2008.

5.3. Les savanes des unités spatiales composites

La défriche aboutissant aux savanes composites est importante entre 1937 et 1957 (20 ans), moins importante entre 1957 et 1991 (34 ans) et pratiquement nulle entre 1991 et [2004]. Ce qui signifie que la limite de la forêt reste stable mais que l'occupation du sol évolue au sein de ces unités paysagères. De manière qualitative, la tendance d'évolution de ces savanes de versant se rapproche de celle des savanes incluses « stables ». Il semble que les savanes incluses et que les savanes de versants inclues dans des unités composites puissent s'inscrire sur les mêmes trajectoires. En effet les unités de savanes incluses (A et B) se distinguent des unités composites dans ou hors sentier car elles sont majoritairement en savane et non habitées. Lorsqu'elles entrent en coalescence avec les unités voisines ou lorsqu'elles sont habitées (campements), d'autres usages du sol que la savane apparaissent : rizières, parcelles cultivées, boisements et elles ont tendance à devenir des unités composites. Ces coalescences paraissent plus développées le long du sentier à proximité de la zone agricole du village.

Hors sentier, certaines de ces unités composites apparaissent entourées de forêts mais ne peuvent être qualifiées pour autant de zones de savanes incluses. Ce sont des îlots de taille plus importante, qui ont pu provenir de la coalescence de ces dernières. Ces unités contiennent des rizières, bois, savanes et éventuellement des parcelles cultivées sur pente. Nous avons vu que la surface de ces unités paysagères tend à croître au dépend de la forêt qui les entoure, mais nous n'avons pas pu vérifier si elles étaient habitées.

5.4. Les ouvertures sur la forêt les plus récentes

7 ouvertures sont apparues dans la forêt, de taille significative (6,31 ha au total), de signature spectrale différente des savanes, entre [2004] et 2008. Ces défriches récentes concernent l'aménagement de marais en rizières et la défriche des bas de versants, mais leur signature spectrale reste difficile à interpréter et les vérifications n'ont pu être réalisées au moment de notre travail de terrain de 2008 ; ces zones d'accès très difficile ne nous ont pas été alors signalées. Il est probable que cette dynamique récente, qui se superpose à celle des savanes, provienne d'une anticipation sur les restrictions escomptées avec l'officialisation de la nouvelle aire protégée (NAP) repoussée de septembre 2008 à septembre 2009.

5.5. Révision de la méthode utilisée

Les analyses classiques en agronomie (parcelles) ou en écologie (habitats) où l'on cherche à identifier et suivre dans le temps des unités de petite taille exigent une résolution plus élevée que celle des capteurs satellites. Vu la taille des unités observées sur le terrain, d'une dizaine de mètres de diamètre au minimum, leur distinction sur les photos aériennes au 1/50 000 a posé problème car la surface minimum observable est de 2500 m². Les images de la zone étudiée sous Google Earth n'avaient pas la plus haute résolution offerte seulement sur certaines zones, mais une résolution de l'ordre de 30 m.

Les images SPOT-2 20m sont également limites pour distinguer au sol des surfaces de moins de 60 m par 60 m alors que la plus petite savane incluse fait 0,1 ha, sauf si la tache est très homogène. L'utilisation d'images SPOT-5 de 10 m. de résolution a permis d'améliorer l'analyse.

Mais pour des études écologiques plus fines sur le contact forêt-savane, notamment en écologie du paysage où la connectivité et les arbres isolés peuvent jouer un rôle important sur la régénération forestière, il faudrait passer à la très haute résolution (SPOT 5 à 2,50 m par exemple). Des pistes de recherche s'ouvriraient alors sur les lisières, le processus de régénération favorisé par des arbres isolés, la connectivité entre deux unités de savanes incluses qui, selon les périodes, peuvent entrer en coalescence ou se séparer.

6. CONCLUSION

L'étude spatio-temporelle des savanes incluses du sentier Sahabe-Tsianivoha, montre que ces savanes datent de 50 à 70 ans et sont toutes issues de forêt. Globalement elles n'augmentent pas de taille mais sont stables (surface en 2008

proche de celle de 1957) ou régressent. Leur dynamique varie selon leur distance au village. Ainsi les savanes situées le plus à l'est, sur le rebord de la falaise, diminuaient de surface jusqu'à une période récente où un nouveau front de défriche s'est ouvert juste avant 2008. A l'ouest, l'augmentation des surfaces en savane est liée à des activités d'élevage et au passage répété du feu pour entretenir des pâturages herbacés. Les surfaces en savane ont augmenté sensiblement en dehors du sentier, plus que le long du sentier, contrairement à ce qu'on pouvait attendre. Par contre les défriches récemment constatées, concernent en priorité le sentier et pourraient être inquiétantes si elles se poursuivaient, comme indicatrices d'un relâchement de la conservation après les mesures des années 2000.

Le travail de terrain a permis de confirmer une typologie des savanes incluses le long d'une piste piétonnière qui traverse le corridor. Cette typologie a été confrontée aux savanes incluses hors sentier, en concluant que les surfaces de savane sont globalement stables sur le sentier et croissantes hors sentier. On ne peut donc pas mettre en relation automatiquement une voie de passage très fréquentée avec une extension des surfaces en savane et il faudrait vérifier si toute piste piétonnière traversant le corridor présente également un chapelet de savanes incluses. Une réponse pourrait être apportée à ces questions en étudiant par télédétection les 9 autres sentiers qui traversent le corridor forestier Ranomafana - Andringitra (figure 2). Vu les effets de seuil et les surfaces minima atteintes par certaines savanes en 2008, et l'utilité de mobiliser des connaissances en écologie pour favoriser la régénération forestière, on perçoit l'intérêt d'un diagnostic complémentaire avec des images satellites SPOT de très haute résolution.

Sur la base de cette étude spatiale, un diagnostic écologique s'impose pour confirmer la résilience de la couverture forestière. En effet il s'agit de cerner, après la perturbation de la période 1937-1957, et dans les zones précises de savane où la forêt s'est régénérée, les conditions dans lesquelles la forêt a pu se reconstituer pendant 50 ans.

Les évolutions repérées des savanes diffèrent donc selon leur localisation et ne peuvent en aucun cas être généralisées. Une activité d'observatoire s'impose pour repérer de telles évolutions après une cinquantaine d'année de situation globalement stable. C'est à cette condition qu'il deviendra possible de piloter ces évolutions spatiales en termes d'aménagement du territoire.

Remerciements

Les images satellites proviennent de SPOTIMAGE, © CNES ISIS (août 1999, avril 2008). Que soient ici remerciés les habitants du village de Sahabe pour leur collaboration active à cette recherche.

Références bibliographiques

Avenard, J.-M. (1969) Réflexions sur l'état de la recherche concernant les problèmes posés par les contacts forêts-savanes. Essai de mise au point et de bibliographie. ORSTOM, Paris, Sér. Initiations - Documentations techniques, N° 14, 162 p.

Burney, D.A. (1996) Climate change and fire ecology as factors in the Quaternary biogeography of Madagascar. P. 49-58 in Lourenço W.R., Biogéographie de Madagascar, Paris, Editions de l'ORSTOM.

Burney, D.A. (1997) Theories and facts regarding Holocene environmental change before and after human colonization. P. 75-89 in Patterson, B.D. and Goodman, S.M. Natural and Human-induced Change in Madagascar, Washington: Smithsonian Institution Press.

Carrière-Buchsenschutz, S.M. (2006) L'urgence d'une confirmation par la science du rôle écologique du corridor forestier de Fianarantsoa. Etudes rurales, 178, p.181-196.

Carrière-Buchsenschutz, Hervé D., Andriamahefazafy, Méral P., 2008. Les corridors, passages obligés

Chaboud, C., Froger, G. and Méral, P. (2007) Madagascar face aux enjeux du développement durable. Des politiques environnementales à l'action collective locale. Paris, Karthala.

Dufils, J.-M. (2003) Chapter 4. Forest ecology. P. 88-96 in S.M. Goodman, J.P. Benstead (eds.) The natural history of Madagascar. The University of Chicago press. Chicago and London.

Favier C., Chave J., Fabing A., Schwartz D., Dubois M.A. (2004) Modelling forest-savanna mosaic dynamics in man-influenced environments: effects of fire, climate and soil heterogeneity. Ecological modeling 171: 85-102.

Gade, D. (1996) Deforestation Madagascar. Human role in changing the face of the earth. Mountain Research and Development, 16 (2), p. 101-116.

Günther, S., Weber, M., Enreis, R. and Aguirre, N. (2007) Influence of distance to forest edges on natural regeneration of abandoned pastures: a case study in the tropical mountain rainforest of Sothern Ecuador. European Journal of Forest Research, vol. 126, no 1, p. 67-75 (9).

Harper, G., Steininger, M., Tucker, C., Juhn, D. and Hawkins, F. (2007) Fifty years of deforestation and forest fragmentation in Madagascar. Environmental Conservation 34, p. 325-333.

Humbert, H. (1927) La destruction d'une flore insulaire par le feu. Principaux aspects

de la végétation à Madagascar. Mémoires de l'Académie Malgache. Fasc. IV, 47 p.

Humbert, H. et Cours Darne, G. (1965) Carte internationale du tapis végétal et des conditions écologiques. Travaux de la section scientifique et technique de l'Institut Français de Pondichéry (hors série), 3 coupures au 1/1 000 000 de Madagascar.

Keay, R.W.J. (1959) Derived savannah, derived from what ? Bull. IFAN, sér. A (21), p. 427-438.

Klein, J. (2002) Deforestation in the Madagascar highlands. Established truth and scientific uncertainties. GeoJournal 56, p. 191-199.

Kull, C. (2004) Isle of fire. The political ecology of landscape burning in Madagascar. University of Chicago Press, 324 p.

Morat, P. (1973) Les savanes du sud-ouest de Madagascar. Paris, Mémoires ORSTOM, n° 68, 235 p.

Moreau, S. (2002) Les gens de la lisière. La forêt, l'arbre et la construction paysanne Sud-Betsileo, Madagascar. Thèse de doctorat en géographie, Ecole doctorale « Milieu, cultures et sociétés du passé et du présent », Université Paris X, 667 p.

N'Guessan, E., Bellan, M.-F. and Blasco, F. (2003) Suivi par télédétection spatiale d'une forêt tropicale humide protégée soumise à des pressions anthropiques. Télédétection, vol. 3, n° 5, p. 443-456.

Perrier de la Bâthie, H. (1921) La végétation malgache. P. 12-26, Annales de l'Institut Botanico-géologique Colonial de Marseille, Sér. 3(9), 268 p.

Raharinomenjanahary, V., Rasoamananjara, B., Razafyfara, L., Ralaiarivony, J. and Randriambololona, G. (2008) Evaluation de la dynamique écologique dans le corridor forestier Fandriana-Vondrozo. Ecoregional Initiative ERI, USAID, Fianarantsoa, Madagascar, 32 p.

Rakotoarimanana, V., Gondard, H., Ranaivoarivelo, N. et Carrière, S. (2008) Influence du pâturage sur la diversité floristique, la production et la qualité fourragère d'une savane des Hautes Terres malgaches (région de Fianarantsoa). Sécheresse, vol. 19, no 1, p. 39-46.

Randrianarison A. (2009) Dynamique des écosystèmes forestiers en contact avec les savanes incluses dans le corridor de Fianarantsoa, Mémoire DEA, Département Biologie Ecologie Végétale, Université d'Antananarivo, MEM-DBEV.

Rasolonandrasana, B., Goodman, SM. (2000) Importance du couloir forestier situé entre le parc national d'Andringitra et la réserve spéciale du pic d'Ivohibe pour la conservation des vertébrés terrestres. P. 135-154 in WR. Lourenco, SM. Goodman (eds). Diversité et endémisme à Madagascar. Mémoires de la société de Biogéographie, Paris.

Ratovonirina G. (2009) Dynamique des savanes incluses du centre du corridor forestier de Fianarantsoa, Mémoire DEA, Département Biologie Ecologie Végétale, Université d'Antananarivo, MEM-DBEV.

Servant M. et Servant-Vildary S. (éd.) (2000) Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers inter tropicaux. Actes du Symposium ECOFIT, ORSTOM-CNRS, Bondy (France), 20-22/03/1996.

Serpantié, G., Rasolofoharinoro, Carrière, S. (eds.) (2007) Transitions agraires, dynamiques écologiques et conservation. Le « corridor » Ranomafana-Andringitra (Madagascar). CITE-IRD, Antananarivo – Paris, 278 p.

Vande Weghe, J.-P. (2004) Forêt d'Afrique centrale: la nature et l'homme, Editions Iannoo SA. Belgique, 357 p.