

Scénarios de diminution du couvert forestier selon la pression démographique et l'intensification agricole

Scenarios of deforestation varying demographic pressure and agricultural intensification

D. HERVÉ¹

V. RATIARSON²

B.O. RAMAMONJISOA²

(1) Institut de Recherche pour le Développement (IRD UMR 220), BP 64501, 34394 Montpellier, France

(2) Ecole Nationale d'Informatique, Université de Fianarantsoa, BP 1484, Fianarantsoa 301, Madagascar

Résumé

Pour modéliser la dynamique de l'occupation du sol, des modèles stochastiques permettent de se projeter dans le futur et des modèles déterministes d'envisager des simulations en faisant varier certains paramètres. Les études de l'évolution du couvert forestier à Madagascar, sur un pas de temps de 5 à 10 ans, tentent de tracer des courbes à partir des années d'évaluation de ce couvert forestier ; les modèles déterministes permettent de représenter les facteurs de déforestation, les modèles stochastiques autorisent l'étude prospective basée sur les séries d'évolution de l'occupation du sol.

Deux facteurs liés entre eux expliquent l'abattis-brûlis responsable de la majeure partie de la déforestation : la pression démographique (nombre d'habitant par km²) et l'intensification agricole (rapport du nombre d'années cultivées sur le nombre d'années total après l'abattis-brûlis, donc la somme des années de cultures sur la somme des années de cultures et jachères arbustives ou herbacées, durant cette période). Le premier est classiquement mis en regard du stock de ressources naturelles dont l'exploitation doit être garantie le plus longtemps possible. Conformément à Boserup, la réduction de ce stock conduit la population concernée à rechercher des alternatives dans l'intensification des surfaces défrichées pour l'agriculture, ce que l'on constate tant dans les rizières de bas-fonds que sur les pentes cultivées sous pluie.

Nous montrons par des simulations comment le rythme de déforestation dépend de ces deux facteurs. Pour infléchir ces tendances, les leviers d'action ne sont pas les mêmes. Plusieurs facteurs jouent sur la croissance démographique mais les mesures pour être efficaces doivent être acceptées par les populations

riveraines des massifs forestiers. La marge de manœuvre d'une intensification agricole s'évalue par rapport à la saturation de l'espace déjà défriché, l'augmentation des rendements espérés, la gestion de la fertilité du sol en fonction de certains seuils et la durée minimum de la jachère pour assurer la durabilité des systèmes de culture recommandés. La discussion de ces scénarios montre que des leviers d'action existent hors forêt pour ralentir la vitesse de déforestation.

Mots-clés : abattis-brûlis, forêt ombrophile, modèle de simulation, saturation de l'espace, Markov

Abstract

To model the land use dynamics, stochastic models are used to project the future, and deterministic models to consider simulations by varying some parameters. With studies of forest cover changes in Madagascar, at a time step of 5 to 10 years, we are trying to draw curves of forest cover assessment: deterministic models are used to represent the drivers of deforestation, stochastic models are based on a series of changes in land prospective study.

Two interrelated factors explain the shifting cultivations responsible for deforestation: population pressure (number of inhabitants per square kilometer) and agricultural intensification (ratio of the number of years of cultivation on the number total of years after the slash and burn, which sums crops and shrubby or herbaceous fallow periods). The first is typically placed next to the stock of natural resources whose exploitation must be guaranteed as long as possible. According to Boserup, the reduction of the natural resource stock led the people concerned to look for alternatives in enhancing surfaces cleared for agriculture, which is observed both in lowland paddy rice, and in the slopes grown under rain.

We show through simulations how the speed of deforestation depends on these two factors. To influence these trends, the levels are not the same. Several factors affect population growth but the measures to be effective must be accepted by the local population of the forests. The agricultural intensification is evaluated relative to the saturation of land already slashed and burnt on forest, the increase in expected returns, the management of soil fertility based on certain thresholds, and the minimum length of fallow to ensure the sustainability of the recommended cropping systems. These scenarios discussion shows that levels of action exist outside forests to slow the rate of deforestation.

Keywords: slash and burn, rainforest, simulation model, land use, saturation, Markov

Introduction

Pour modéliser la dynamique de l'occupation du sol, des modèles stochastiques permettent de se projeter dans le futur, des modèles déterministes d'envisager des simulations en faisant varier certains paramètres. Les études de l'évolution du couvert forestier à Madagascar, sur un pas de temps de 5 à 10 ans, tentent de tracer des courbes à partir des années d'évaluation de ce couvert forestier, depuis la carte de végétation de Faramalala (1995). Le développement récent de l'imagerie satellitaire ouvre des possibilités de détecter les changements d'occupation du sol entre deux dates, en combinant différents capteurs et différents satellites (Landsat, Spot) et différentes résolutions dans des chaînes de traitement

adaptées à chaque situation. Ces méthodes ont été appliquées à des situations caractéristiques, avant et après la création d'une aire protégée par exemple (Hervé *et al.*, 2009 ; Huynh *et al.*, 2009 ; Hervé *et al.*, 2010 ; Ravonjimalala *et al.*, dans cet ouvrage) ou à des échelles locales, pour mesurer le recul d'un front forestier (Lasry *et al.*, 2004 ; Ravonjimalala *et al.*, 2014), ou encore dans un dispositif multi-site à une échelle nationale (Grinand *et al.*, 2013).

L'objectif de cette modélisation est l'élaboration de scénarios, permettant de se projeter sur des dispositifs d'action faisant référence pour la définition des politiques environnementales. Afin de servir à des simulations, les modèles de dynamique de l'occupation du sol doivent être au préalable calibrés et validés, ce qui suppose de disposer de deux jeux de données chronologiques sur l'occupation du sol, l'un pour la calibration et l'autre pour la validation, sur la période la plus longue possible (Ratiarson, 2011). L'usage annuel d'un lot de 170 parcelles localisées sur la lisière forestière du COFAV, à l'est de Fianarantsoa, a été pour cela reconstitué sur une période de 33 ans (1973-2006).

Cet historique d'occupation du sol est résumé dans une chaîne de Markov afin de calibrer, puis valider deux modèles de dynamique de l'occupation du sol, un modèle à base de règles, un automate temporisé (Ratiarson *et al.*, 2011) et un modèle à base d'agents ou système multi-agents (Hervé *et al.*, 2013). Chaque modèle a ses propres contraintes quant aux données utilisées et son propre domaine de validité. Les modèles stochastiques autorisent l'étude prospective basée sur les séries connues d'évolution de l'occupation du sol. Les modèles déterministes permettent de représenter les facteurs de déforestation ; nous avons construit pour cela des modèles à base de règles. Les modèles les plus explicites sont les systèmes multi-agents. Des scénarios d'évolution du couvert forestier sont construits avec ces modèles multi-agents sur la base de simulations informatiques.

Les systèmes multi-agents sont utilisés classiquement pour explorer des scénarios. L'état initial étant fixé et les paramètres fixés, on lance la simulation. On peut aussi faire varier les paramètres autour de leur valeur calibrée. Nous construisons un protocole de scénarios répondant aux deux hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 : Deux facteurs liés entre eux, la pression démographique et l'intensification agricole, ont des effets importants sur l'abattis-brûlis responsable de la majeure partie de la déforestation.

Hypothèse 2 : L'augmentation des besoins alimentaires des agriculteurs pour répondre à la croissance démographique peut être atteinte par une intensification agricole, sans mettre à contribution le couvert forestier.

Nous montrons par des simulations comment le rythme de déforestation dépend de ces deux facteurs, la pression démographique et l'intensification agricole.

Le choix des modèles est justifié et la modélisation conceptuelle est détaillée avant d'implémenter un système multi-agent, en rappelant brièvement comment il a été calibré puis validé. Une fois validé, ce modèle a été utilisé dans des simulations permettant de faire jouer dans certains intervalles de variation des facteurs explicatifs de la déforestation. Nous nous limiterons dans ce papier à explorer des scénarios à partir de deux facteurs, la croissance démographique et l'intensification agricole, en dégageant des interprétations et des enseignements.

Problématique conduisant au protocole de simulation

Nous nous proposons de travailler sur deux facteurs, liés entre eux, mais qui ont un effet inverse sur l'abattis-brûlis responsable de la majeure partie de la déforestation : la croissance démographique comme facteur aggravant et l'intensification agricole, comme facteur de réduction de la déforestation. Reprenons tout d'abord la définition de ces deux variables.

- La pression démographique, exprimée comme un taux de croissance démographique (%), aboutit localement à une densité de population (hab./km²). Mais il est difficile d'obtenir des densités de population localisée dans chacun des écosystèmes, et tout particulièrement dans le domaine forestier, car les limites administratives qui servent aux recensements ne recoupent pas les unités de végétation.
- Dans un contexte de terres disponibles pour la mise en culture, l'intensification agricole est exprimée par la durée respective des phases de culture et de jachère après l'abattis-brûlis. On peut exprimer cette variable par le rapport : Nombre d'années de culture sur Nombre d'années de jachère, centré sur la valeur 1 ; ou par le rapport (exprimé en pourcentage) : Nombre d'années de culture/Nombre total d'années cultivées et en jachère depuis le premier abattis-brûlis sur la forêt, qui s'applique directement à notre cas de figure. La somme des années de culture et des années de jachère est l'âge de la parcelle depuis la première défriche.

Lorsque nous parlons d'intensification agricole, nous nous référons spécifiquement à cette période. Il s'agit de défricher toute nouvelle parcelle dans l'espace déjà défriché et non par un nouvel abattis-brûlis sur la forêt. Nous nous situons donc dans une première étape d'intensification agricole, qui consiste à trouver de nouvelles terres à cultiver.

Un cycle de culture est la succession d'une mise en culture par abattis-brûlis (précédent forêt) ou défriche-brûlis (précédent jachère), d'une succession de cultures, puis d'une période de jachère (abandon de culture). Il se caractérise par une durée en culture suivie par une durée en jachère. L'âge de la parcelle depuis la première défriche sur la forêt peut donc être décliné en un certain nombre de cycles de culture.

Depuis la première défriche conduisant à une mise en culture, jusqu'au dernier abandon de culture, se définit la période d'exploitation de la parcelle. L'âge de la jachère (jachère finale, pourrait-on préciser) se définit par la période depuis le dernier abandon de culture. L'âge de la parcelle est donc la somme de la période d'exploitation et de la durée de la dernière jachère. C'est en se référant à cette dernière jachère que l'on caractérisera la parcelle par son âge de jachère. On cherche ainsi à comparer des parcelles d'âges de jachère différents pour évaluer les dynamiques de la fertilité du sol ou de la régénération forestière.

La pression démographique est classiquement mise en regard du stock de ressources naturelles dont l'exploitation doit être garantie le plus longtemps possible. Conformément à Boserup, la réduction de ce stock conduit la population concernée à rechercher des alternatives dans l'intensification des surfaces défrichées pour l'agriculture. Concrètement, il est très difficile d'obtenir des données de démographie locale, à l'échelle fine de la gestion villageoise des ressources naturelles, et d'établir des correspondances entre des unités de recensement des populations et des unités spatiales de gestion des ressources.

On constate que cette théorie de Boserup s'applique aux hauts plateaux malgaches (Locatelli, 2000), tant dans les rizières de bas-fonds que dans les pentes cultivées sous pluie. Le premier niveau d'intensification

est la saturation de l'espace foncier disponible : front de défrichement avec avancée de la défriche et recul de la forêt (Lasry *et al.*, 2005); aménagement des bas-fonds en rizières jusqu'à la saturation des bas-fonds disponibles (Rakotoasimbahoaka *et al.*, 2010 ; Rakotoasimbahoaka, 2011) et, dans le cas des forêts humides, l'articulation entre les deux, aménagement des bas-fonds et défriche des versants.

Le second niveau d'intensification est une intensification à surface constante, qui correspond à l'augmentation sur la surface cultivable des années de culture par rapport aux années de jachère. Peut-on augmenter le nombre d'années de culture successives ? Peut-on réduire d'autant la durée des jachères intercalaires ? Faut-il attendre des jachères de 20 ans pour garantir un niveau suffisant de régénération ou peut-on se satisfaire de jachères de 10 ans ? Cette seconde intensification, qui se réalise aux dépens de la durée de la jachère, a pour principale limite le niveau de fertilité du sol.

Un troisième niveau d'intensification agricole correspond à l'augmentation des rendements à surface constante et durée de jachère réduite, soit par l'utilisation d'intrants, soit par des pratiques agricoles qui stimulent les processus naturels de la fertilité, mais qui peuvent exiger plus de travail.

Afin de limiter l'extension des surfaces agricoles aux dépens des surfaces forestières, nous évaluerons les marges de manœuvre des niveaux d'intensification agricole 1 et 2, en simulant leurs impacts sur le rythme de la déforestation, mais sans traiter ici du troisième niveau d'intensification agricole.

Méthodes

Le site choisi est le corridor forestier de Fianarantsoa (COFAV), dans une lisière forestière située à l'est du village d'Ambendrana (commune d'Androy).

Trois modèles de transition ont été appliqués :

- Le premier modèle est un modèle markovien de transition sur des parcelles non spatialisées ;
- Le second modèle est un modèle à base de règles, sur des parcelles non spatialisées, qui est un automate temporisé ;
- Le troisième modèle est un modèle à base d'agents agriculteurs sur des parcelles spatialisées ; c'est un système multi-agent (SMA).

Des étapes de formalisation sur des modèles simplifiés, de nature stochastique puis déterministe, ont été nécessaires avant de construire des modèles plus complexes dans lesquels les agents agriculteurs étaient représentés explicitement avec leurs décisions. Le cahier des charges du modèle multi-agent est d'étudier par simulation l'effet des décisions des agriculteurs sur la dynamique des occupations du sol post-forestières.

MODELE CONCEPTUEL DU SYSTEME MULTI-AGENT

Espace environnemental : un territoire villageois constitué d'un nombre fixe de parcelles indépendantes.

Spatialisation : l'espace est découpé en 3 bandes (zones) parallèles d'est en ouest-, selon leur distance à la forêt, Forêt (F), Lisière (L), Savane (S), dans lesquelles sont localisées les parcelles.

Agents : les agriculteurs répartis entre 3 types sont formalisés comme des agents prenant deux types de décisions : mise en culture et abandon de culture.

Objets : parcelles de bas-fonds et de pente.

Moteur de changement d'état : une parcelle abandonnée doit être remplacée par au moins une nouvelle parcelle cultivée pour satisfaire les besoins alimentaires de la famille, considérés comme constants d'une année à l'autre.

Cette construction du modèle conceptuel assume donc un certain nombre de simplifications.

La stratégie foncière qui consiste pour un agriculteur à défricher une parcelle sans la cultiver ou seulement pour un à deux ans, afin de rappeler son droit foncier sur cette parcelle, cette stratégie foncière n'est pas prise en compte dans un premier temps dans le modèle.

Les nouvelles parcelles cultivables sont choisies sans conflit d'accès aux parcelles, parmi les surfaces cultivables les plus âgées possibles, c'est-à-dire en priorité sur des jachères les plus anciennes. Nous n'intégrons pas dans le modèle des interactions ou des compétitions entre agents ni les voisinages entre parcelles. Nous formalisons ces choix de parcelles en classant les remises en culture suivant le précédent, dans un ordre décroissant de fertilité potentielle, tout en intégrant l'interdiction de défricher de nouvelles parcelles en forêt; ce qui classe le précédent forêt après les précédents jachère et herbe :

- 1) Jachère → Culture (remise en culture)
- 2) Herbe → Culture (labour)
- 3) Forêt → Culture (défriche de forêt)
- 4) Au cas où la forêt n'est plus disponible, reprendre une parcelle abandonnée Culture → Culture, avec le risque d'aboutir assez vite à une fertilité du sol très réduite.

Données : Nombre de parcelles par type d'agriculteur (taille de l'exploitation) et par zone (3 bandes pertinentes par rapport à la forêt : savane, lisière et forêt). Les parcelles sont considérées localisées et non jointives, indépendantes les unes des autres, donc sans voisinage.

Variables :

τ_c, τ_j, τ_h : les variables de durée pour désigner les durées de séjour ou les âges respectifs dans les états de Culture, Jachère, Herbe sont des variables compteur qui sont initialisées à zéro au démarrage et qui s'incrémentent à chaque pas de temps.

CPT_NC : compteur du nombre de cycles agricoles

NbAgent : nombre d'agents

NbParcelles : nombre de parcelles par agent.

Paramètres dont on va chercher à fixer la valeur par le processus de calibration :

DUREE_C, DUREE_J, DUREE_H : durées de séjour en Culture, Jachère et Herbe, maximum avant une transition (valeurs seuils).

NB_CYCLES : le nombre de cycles culturels (NC)

La calibration du modèle consiste à trouver les paramètres optimaux, par un automate temporisé. Les valeurs ainsi ajustées sont ensuite utilisées dans le SMA.

Ces paramètres sont des seuils de changements d'état : si $\tau_c > \text{DUREE_C}$ fixée, alors la transition peut avoir lieu : soit abandon en jachère, soit abandon en herbe.

Si Nb cycles < seuil, alors jachère ; sinon herbe.

Ces paramètres sont fixés suivant les experts du domaine.

Initialisation :

L'état initial consiste à construire une grille de N parcelles homogènes réparties dans les 3 bandes, appartenant à M agents. N parcelles réparties dans trois bandes (Na, Nb, Nc) et M agents sont répartis dans 3 types : M1, M2, M3.

Les durées de séjour τ_c , τ_j , τ_h sont initialisées aléatoirement pour chaque parcelle. Chaque agent a ses propres parcelles réparties dans une ou trois bandes et les décisions sont décentralisées au niveau de chaque agent. Les agents sont réactifs, c'est-à-dire que chaque agent agit sur ses propres parcelles, qui sont donc identifiées par une fonction d'appartenance.

Les agents agissent sur l'environnement en parallèle, pour satisfaire leurs propres besoins familiaux. La règle du premier défricheur se traduit par le fait qu'une parcelle prise par un agent est interdite d'accès à tout autre agent.

Pour gérer la couverture des besoins alimentaires de la famille, chaque agent prend deux types de décisions, la décision de culture (mise en culture puis culture successive) et la décision d'abandon de culture (arrêt de culture après un certain nombre de cycles culture-jachère). Nous détaillons ci-dessous les algorithmes de chacune de ces décisions. En effet, dans le SMA, chaque agent a sa propre stratégie.

DECISION DE CULTURE

Pour chaque pas de temps t et pour chaque agent i , l'algorithme va construire la liste des parcelles cultivables par l'agent i lorsqu'une parcelle est abandonnée.

Etape1 : choix d'une mise en culture par l'agent i au temps t

Tant que $NbParcelleNécessaires(i,t) > NbParcelleCultivées(i,t)$

Choisir une parcelle cultivable la plus âgée et la plus proche des bas-fonds dans l'ordre suivant (ordre commun à tous, agissant comme une règle villageoise) :

- 1) s'il existe une parcelle dans l'état Jachère telle que $\tau_j > DUREE_J$, alors remise en culture par défriche;
- 2) s'il existe une parcelle dans l'état Herbe telle que $\tau_h > DUREE_H$, alors remise en culture par labour;
- 3) s'il existe une parcelle en pente dans l'état Forêt, alors défriche de forêt ;
- 4) si l'agent ne trouve rien de toute cela, alors reprendre la parcelle abandonnée soit

$NbParcelleAbandonnées(i,t) = -1$;

$Etat_parcelle = Culture$ et $\tau_c = 0$;

$NbParcelleCultivées(i,t) = +1$;

FinTant que

DECISION D'ABANDON

Etape2 : choix d'abandon par l'agent i , pour chaque parcelle cultivable, au temps t

$CPT_NC = +1$

SI $CPT_NC > NB_CYCLES$, ALORS

SI non Déjà_Abandonnée_en_herbe ou $\tau_c > DUREE_C$ ALORS

abandon en Herbe :

- $\tau_h = 0$;

- NbParcelleCultivées(i,t) = -1 et NbParcelleAbandonnées (i,t)= +1 ;
- Déjà_Abandonnée_en_herbe $\rightarrow$ true ;

FINSI

SINON

SI $\tau_c > \text{DUREE_C}$ ALORS abandon en Jachère :

- $\tau_j=0$
- NbParcelleCutlivées(i,t)=-1 et NbParcelleAbandonnées (i,t)= +1 ;

FINSI

Fin Parcelle

FIN AGENT

Etape 3 : évolution des parcelles

Pour chaque parcelle non choisie

- Selon l'état de l'occupation du sol

Culture : τ_c++ ;

Jachère : τ_j++ ;

Herbe : τ_h++ ;

Fin Parcelle

- Mémoriser la trajectoire de chaque parcelle
 - Détermination des besoins supplémentaires en parcelles dus à la croissance démographique au taux α :
 - a) $\Delta N(t) = N(t+1)-N(t) = \alpha N(t)$ =nombre d'agents supplémentaires
 - b) attribuer NbParcelleNécessaires(t) pour chaque agent supplémentaire
 - c) NbAgent =+ $\Delta N(t)$
- FIN SUR PAS DU TEMPS

Résultats

MODELE SMA IMPLEMENTÉ

La figure S1 montre la plate forme d'interface pour l'utilisation du modèle SMA de simulation multi-agent de la dynamique de l'occupation du sol.

CALIBRATION ET VALIDATION DU SMA

Calibration du modèle

Pour caractériser un agriculteur, on a besoin de 12 variables :

- type d'agriculteur (3 types : 1, 2, 3),
- zone du corridor (3 zones : savane, lisière, forêt),
- état des parcelles (4 états : rizière, culture, jachère, herbe),
- le nombre de parcelles par type d'agriculteur et par zone (3 types d'agriculteur par 3 zones soit 9 variables).

Ces variables complémentaires serviront pour définir l'état initial du modèle, ce qui complexifie par conséquent la calibration du modèle. Le modèle ne peut plus être calibré au niveau de l'exploitation agricole.

Validation du modèle

Nous décidons de simuler une situation proche de la réalité en fixant la même règle pour tous les agriculteurs c'est à dire en fixant les 4 paramètres à leurs valeurs ajustées et jugées acceptables (3 ans de culture, 2 ans de jachère, 4 ans d'herbe, et 4 cycles culturaux) et en partant d'un état initial qui correspond à 10 exploitations et un espace bien délimité de 900 parcelles. Ces 10 agriculteurs sont répartis proportionnellement dans les 3 types (12% pour le type 1 soit 1 exploitation localisée dans la savane, 58% pour le type 2 soit 6 exploitations en lisière et 30% pour le type 3 soit 3 exploitations en forêt). Chaque agriculteur agit sur ses propres parcelles, réparties dans les 3 zones selon son type d'appartenance, à raison d'une parcelle par an.

La comparaison de la matrice observée résumant les histoires culturelles à 4 états d'occupation du sol de 170 parcelles, depuis le premier défrichement de parcelles de lisière, avec la matrice simulée construite à partir des données historiques générées par la simulation selon χ^2 conduit à valider le modèle (Tableau I).

Tableau I : Matrice de Markov observée et simulée pour valider le modèle SMA

Etats	Matrice observée				Matrice simulée			
	Forêt	Jachère	Culture	Herbe	Forêt	Jachère	Culture	Herbe
Forêt	0	0	1	0	0	0	1	
Jachère	0	0,65	0,35	0	0	0,69	0,31	
Culture	0	0,32	0,65	0,03	0	0,29	0,69	0,02
Herbe	0	0	0,17	0,83	0	0	0,17	0,83

Hypothèse nulle H_0 : la matrice observée est égale à la matrice simulée

Statistique du test : 04,99 ; seuil critique : 21,03

Conclusion : H_0 acceptée, alors le modèle est validé

SCENARII DANS UN CONTEXTE DE CONSERVATION DE LA FORÊT

Etat initial du système

- Un nombre donné d'exploitations.
- Un espace bien délimité de 900 parcelles initialement en forêt avec un nombre des parcelles cultivées implicitement égal au nombre des agents sur la base d'une parcelle nécessaire par agent.
- Ces agriculteurs et ces parcelles sont localisés spatialement dans les 3 zones distinctes (forêt, lisière et savane).
- Les agriculteurs sont répartis dans les 3 types, proportionnellement à l'importance de chaque type déterminée par la typologie. Chaque agriculteur agit sur ses propres parcelles à raison d'une parcelle par an. On fixe une même règle de durées de séjour (3 ans de culture, 2 ans de jachère, 4 ans d'herbe, et 4 cycles culturaux) pour tous les agriculteurs.

Scenarii de diminution de la forêt

Les scénarios sont conduits avec un système multi-agent dont les paramètres ont été fixés par l'automate temporisé.

SCENARIO 1 : Déterminer au bout de combien d'années (a) la forêt ne diminue pas de surface en deçà d'un seuil de préservation, (b) la forêt va disparaître, selon le taux de croissance démographique (Tableau II).

Tableau II : Scénario de disparition de la forêt en fonction du taux de croissance démographique, à population initiale fixée

Taille de population initiale N_0	Taux de croissance démographique α	(a) Seuil de préservation 5 % et 95 % disparu	(b) Disparition totale de la forêt (100 %)
200	1 %	58 ans	63 ans
200	2 %	34 ans	39 ans
200	3 %	27 ans	30 ans

La différence entre un seuil de préservation de 5 % et la disparition totale de la forêt se réduit au fur et à mesure que s'accroît le taux de croissance démographique (Tableau II). En diminuant le taux de croissance démographique de 3 % à 1 %, on multiplie par deux la durée d'atteinte du seuil de préservation de la forêt. Entre 30 et 60 ans, ce délai est celui d'une génération.

SCENARIO 2 : Déterminer le nombre d'années au bout duquel (a) la forêt ne dépasse pas un seuil de préservation de 5 %, (b) la forêt disparaît, selon la taille initiale de la population, avec un taux de croissance démographique fixé à la valeur moyenne de 2 % (Figure 1).

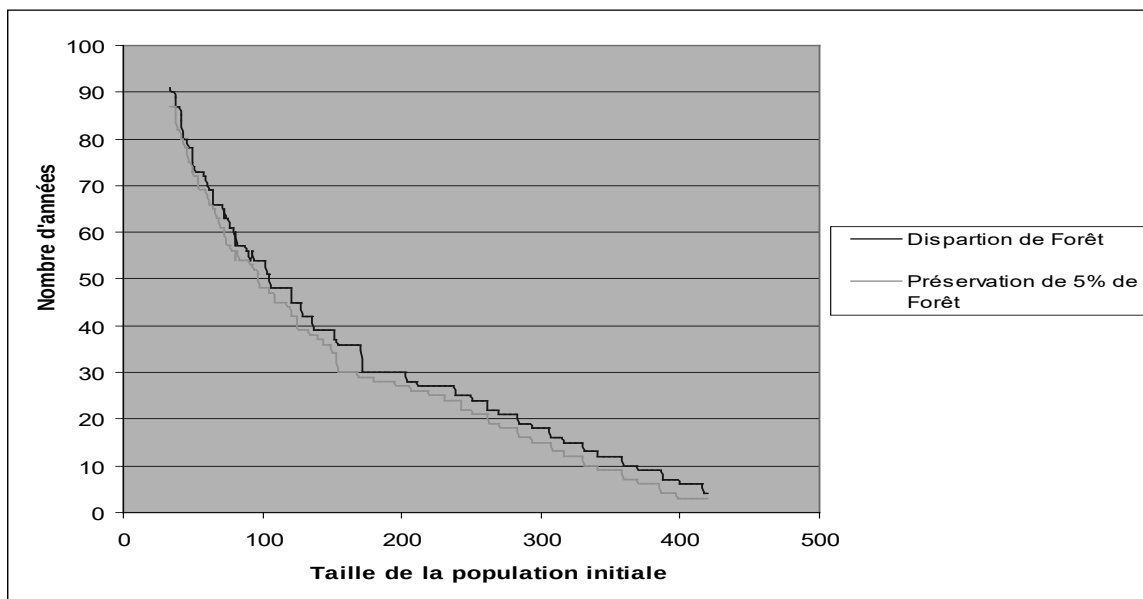


Figure 1 : Vitesse de disparition de la forêt selon la taille de la population initiale

L'interprétation de la figure 1 montre que l'objectif de préservation de 5 % de la forêt ne différencie pas la forme de la courbe exponentielle négative de la disparition de la forêt. Au-delà d'une population initiale de 200 individus, le nombre d'années de disparition de la forêt peut descendre en deçà de 30 ans, la durée qui résulte dans la simulation précédente d'une croissance démographique élevée.

Scénarii d'interdiction de défriche et d'intensification du système de culture

L'évolution annuelle de la forêt est simulée, suivant qu'on autorise la défriche de la forêt avant la culture de 3 ans, ou la succession de cultures avant de défricher la forêt pour une durée de 4 et 5 ans.

Les précédents cultureux sont d'abord ordonnés suivant la liste n°1, qui conserve la forêt mais sans trop risquer sur l'agriculture. L'ordre de défriche fixé sur tous les scénarios antérieurs considère que le retour sur la même parcelle que l'agriculteur avait décidé d'abandonner n'est qu'un ultime recours, temporaire, après la défriche de la forêt, elle-même préservée par les défriches préalables de jachère et d'herbe :

- 1-Jachère
- 2-Herbe
- 3-Forêt
- 4-Culture [3 ans, alors que la durée de séjour normale est de 2 ans]

Cette option revient sur la décision d'abandon au prix d'un rendement marginal considéré initialement comme trop faible. Cette solution n'est donc pas durable sans une gestion de la fertilité qui permettrait l'augmentation du rendement par unité de surface.

Les précédents cultureux sont ensuite ordonnés suivant la liste n°2, qui conserve la forêt à tout prix, au risque d'une crise agricole. Le nouvel ordre testé considère que la forêt doit être préservée à tout prix, même en acceptant une limitation de la production en culture, et place donc avant la défriche de la forêt plusieurs options de culture répétée sur la même parcelle :

- 1-Jachère
- 2-Herbe

3-Culture [4 ans alors que durée normale est de 2 ans]

4-Forêt

Dans cette seconde option, le scénario pour le précédent Culture consiste à faire varier la durée de culture successive, de 3 ans à 4 ans et à 5 ans. On fait tourner le modèle en adoptant ce nouvel ordre de défriche et on regarde en sortie le % de forêt restant (Figure 2).

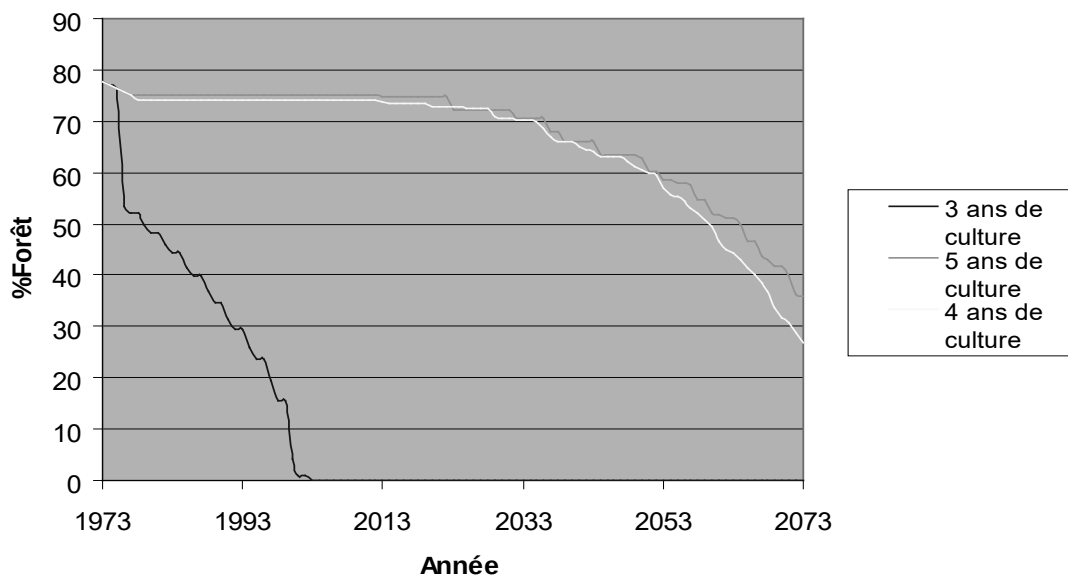


Figure 2 : Durée au bout de laquelle la forêt disparaît selon le nombre d'années de culture successive avant d'avoir à défricher de la forêt

On observe une forte différence entre une succession de culture de 3 ans qui aboutirait à une disparition de la forêt en 25 ans et une durée de culture supérieure (4 ou 5 ans) qui repousserait la disparition de la forêt à plus de 60 ans. Cette courbe interpelle sur les possibilités de repousser la déforestation en trouvant les moyens d'intensifier le système de culture avec des années successives de culture sans réduire drastiquement la fertilité du sol.

La dernière option revient sur la décision d'abandon au prix d'un rendement marginal considéré initialement comme trop faible (liste ordonnée n°2). Cette solution n'est donc pas durable ; elle permettrait tout juste d'attendre l'opportunité d'une nouvelle parcelle à défricher. L'augmentation du rendement par unité de surface s'impose alors, pour la survie de la famille.

Scenarii d'évolution de la forêt suivant l'intensité d'utilisation du sol depuis la première défriche

Les états non cultivés après la mise en culture (C) peuvent être Jachère (J) ou Herbe (H). La durée totale d'exploitation est donc la durée de culture plus la durée en jachère ou en herbe. L'intensité d'usage du sol se mesure par le rapport entre le nombre d'années cultivées et le nombre d'années d'exploitation (Figure 3).

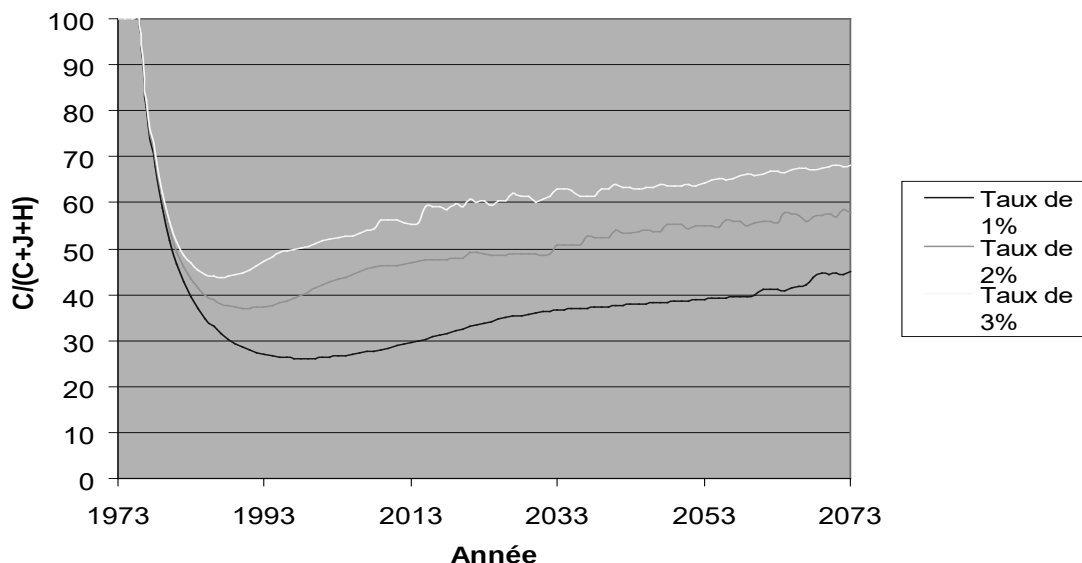


Figure 3 : Evolution annuelle de l'intensité de l'usage du sol ($C/(C+J+H)$) suivant le taux de croissance démographique

Au bout des 20 premières années après la première défriche, l'intensité d'usage du sol chute à sa valeur minimum qui s'échelonne suivant le taux de croissance démographique de 25 % pour un taux de croissance de 1 % à 35 % pour un taux de croissance de 2 % et à 45 % pour un taux de croissance de 3 % (Figure 3). Puis très progressivement, les courbes indiquent des lentes augmentations de l'intensité d'usage du sol jusqu'à respectivement 40 %, 55 % et 70 %. C'est donc en prévision d'un rapport de 60 à 70 % entre l'état Culture et le total des Jachères (non cultivé) : $C/\text{total } J$, que les agronomes doivent travailler pour des recommandations de successions de culture qui n'épuisent pas le sol.

Discussion et conclusion : des enseignements pour l'action publique

La discussion de ces scénarios montre que des leviers d'action existent hors forêt pour ralentir la vitesse de déforestation. La dynamique de la forêt n'est pas indépendante de l'intensification agricole des surfaces défrichées. Les marges restantes d'intensification agricole ne sont pas indépendantes des surfaces potentiellement disponibles par abattis-brûlis.

Pour infléchir ces tendances, les leviers d'action ne sont pas les mêmes. Plusieurs facteurs jouent sur la croissance démographique mais les mesures pour être efficaces doivent être acceptées par les populations riveraines des massifs forestiers.

L'effet des intensifications agricoles est notoire sur le rythme de recul de la forêt. La marge de manœuvre d'une intensification agricole s'évalue par rapport à l'augmentation des rendements espérés, la gestion de la fertilité du sol en fonction de certains seuils et la durée minimum de la jachère pour assurer la durabilité des systèmes de culture recommandés.

Quels enseignements en tirer pour mener de front des politiques environnementales et des politiques agricoles qui garantissent le maintien d'une certaine surface en forêt ?

Références bibliographiques

Faramalala M.H., 1995 : *Formations végétales et domaine forestier national de Madagascar*. Antananarivo, Madagascar : Conservation International, 1 carte.

Grinand C., Rakotomalala F., Grond V., Vaudry R., Bernoux M., Vieilledent G., 2013 : « Estimating deforestation in tropical humid and dry forests in Madagascar from 2000 to 2010 using multitemporal landsat satellite images and the random forests classifier ». *Remote Sensing of Environment*, 139 : p. 68-80.

Hervé D., Andrianarivo A., Razanaka S., Batti A., Dadu L., Delaître E., Huynh F., 2010 : « Evolution Estimated by Remote Sensing of Forest Boundaries in Two Parks in the Rainforest of Madagascar Labeled UNESCO », dans 30th EARSeL Symposium : Remote Sensing for Science, Education and Natural and Cultural Heritage. 31 May – 3 June 2010, Paris : UNESCO, Abstract Book, p. 47-48.

Hervé D., Batti A., Andrianarivo A., Razanaka S., Delaître E., 2009 : *Suivi des sites patrimoniaux UNESCO par télédétection spatiale. Rapport d'étude. Etude de cas – Site de Madagascar*. Convention IRD-CNES / UNESCO (IRD n° 3787 A1-ISI40-ASMS).

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.

Huynh F., Petit M., Fotsing J.M., Wafo Tabopda G., Hervé D., Laque A.E., 2009 : *Suivi des sites patrimoniaux UNESCO par télédétection spatiale*. Rapport final, IRD-CNES, 30/03/09 (Convention CNES N°82325-ZCTI 6000013245, IRD N° 3787A1-ISI40-ASMS), 160 p.

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 satellitaire haute résolution ». *Photo-Interprétation*, 1 : p. 26-33.

Lasry F., Milleville P., Razanaka S., Grouzis M. (eds.), 2005 : *Pratiques paysannes et environnement dans le sud-ouest de Madagascar*. Cédérom. Marseille : IRD Editions.

Locatelli B., 2000 : *Pression démographique et construction du paysage rural des tropiques humides. L'exemple de Mananara (Madagascar)*. Thèse de doctorat de l'Engref spécialité Science de l'Environnement, Ecole de Génie Rural des eaux et forêts. Montpellier (France), 441 p.

Rakotoasimbahoaka C., 2011 : *Modélisation de la dynamique d'aménagement des bas-fonds rizicoles dans les communes du corridor forestier de Fianarantsoa*. Thèse doctorale en informatique, Ecole Nationale d'Informatique, Université de Fianarantsoa (Madagascar), 206 p.

Rakotoasimbahoaka C., Ratiarson V., Ramamonjisoa B., Hervé D., 2010 : « Modélisation de la dynamique d'aménagement des bas-fonds rizicoles en forêt », dans A. Shibi, E. Badouel, I. Lokpo (eds.), *Actes du 10^{ème} Colloque Africain sur la Recherche en Informatique et Mathématiques Appliquées*, 18-21/10/10, INRIA-Hope Connexion, CARI 2010, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, Rubrique Modélisation des systèmes complexes, p. 293-300.

Ratiarson V., 2011 : *Complexification, calibration et validation de modèles informatiques : Applications à la modélisation de la dynamique de l'occupation du sol post-forestière en lisière ouest du corridor forestier de Fianarantsoa, Madagascar*. Thèse doctorale en informatique, Ecole Nationale d'Informatique, Université de Fianarantsoa (Madagascar), 160 p.

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

Ravonjimalala H.R., Razanaka S., Hervé D., Bogaert J., Randriambanona H., Paegelow M., Rakotondraompiana S., 2014 : « Multitemporal spatial analysis of the Mikea dry forest landscape (Southern Madagascar) », dans Proceedings of 10th International Conference of the African Association of Remote Sensing of the Environment, *Space technology for societal benefits in Africa*, 27-31/10/2014, University of Johannesburg, South Africa, Plenary Session Abstracts, Peer-Reviewed Paper, p. 88.

Ravonjimalala R., Razanaka S., Randriambanona H.A., Hervé D., Rakotondraompiana S., 2015 : « Evolution de la déforestation pour la culture de maïs sur défriche-brulis de la forêt de Mikea, avant et après sa mise sous statut d'aire protégée », 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. 85-94.

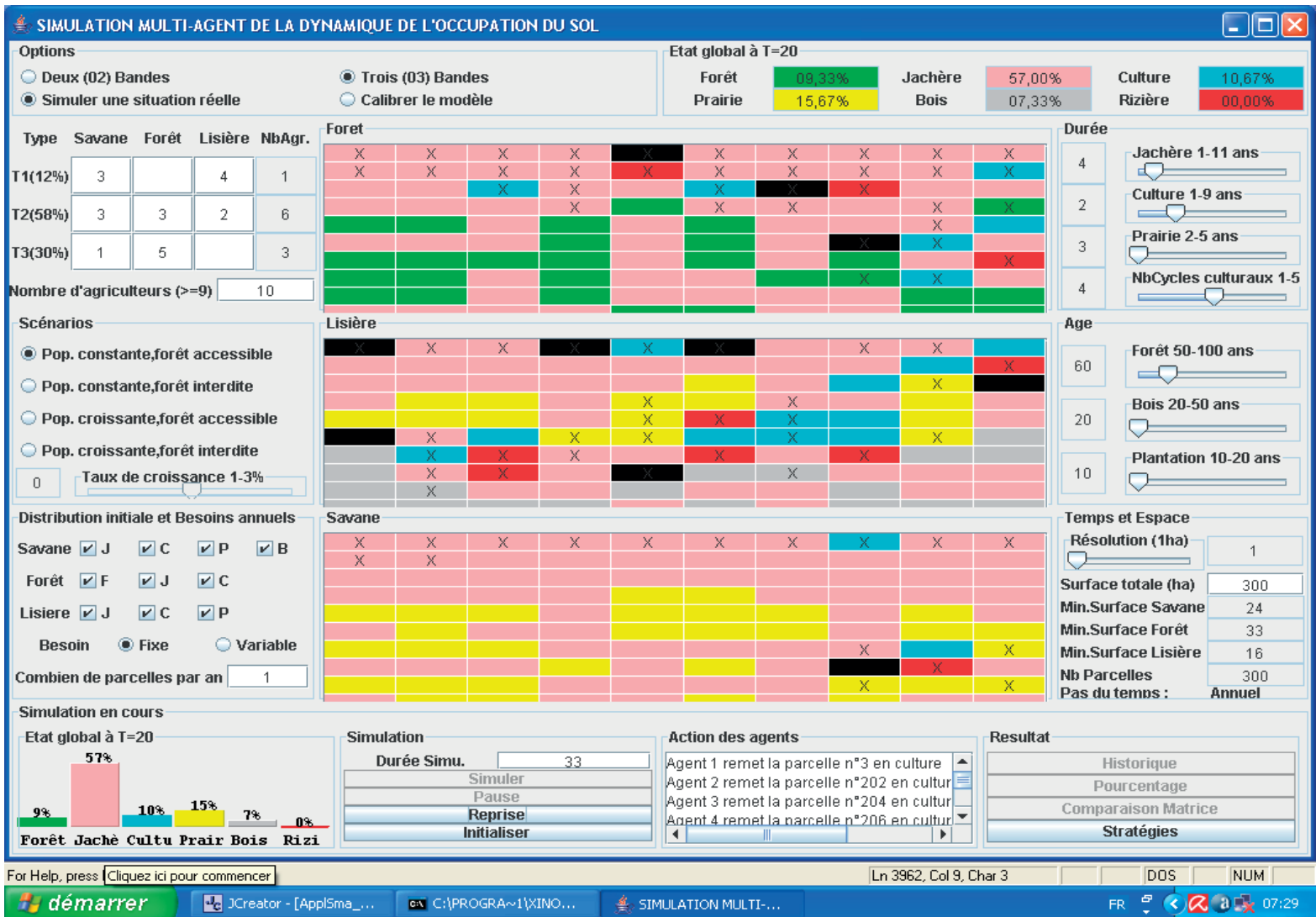


Figure S1 : Simulation multi-agent de la dynamique de l'occupation du sol

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



Institut de recherche
pour le développement



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.