

## Chapitre 10

# Simulation stochastique de l'historique de parcelles forestières depuis leur première défriche : le cas du couloir forestier de Fianarantsoa, Madagascar

*Ratiarson V.<sup>1</sup>, Treuil J.P.<sup>3</sup>, Ramamonjisoa B.O.<sup>1</sup>, Carrière S.M.<sup>4</sup>, Randriamalala J.<sup>4</sup> & Hervé D.<sup>2</sup>*

1) Ecole Nationale d'Informatique de l'Université de Fianarantsoa - Madagascar, BP 1487

2) Institut de Recherche pour le Développement (IRD), BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France

3) Institut de Recherche pour le Développement (IRD), 32 Avenue Henri-Varagnat, 93143 Bondy Cedex, France

4) GEREM-Fianarantsoa (Gestion des Espaces Ruraux et Environnement à Madagascar), IRD-CNRE BP 434, Antananarivo 101, Madagascar

**Résumé :** Le suivi de la dynamique d'un paysage pour prédire ses évolutions futures dans un contexte où la pression humaine sur les terres est de plus en plus forte, est un thème crucial en écologie. Sous l'effet des pratiques culturales sur abattis-brûlis et de la riziculture inondée, les terroirs villageois malgaches en lisière de forêt se caractérisent par une mosaïque paysagère de rizières, forêts, savanes, parcelles cultivées en pente, reboisements et de tous les stades de succession forestière post-culturelle. Nous nous situons en lisière forestière, là où des autorisations de défrichement de forêt ont été décrétées à des dates fixes blocs à des défriches par conditionnement à l'Ouest du couloir, nous distinguons 5 principaux compartiments d'occupation du sol entre lesquels existent des flux : forêt, culture, prairie, jachère et rizière. Les transitions entre les compartiments d'usage du sol sont régies par des règles de transition pouvant inclure des règles d'évolution écologique du couvert végétal et des règles d'action (défriche, mise en jachère, feu, labour). L'objectif est alors de calibrer un modèle de changement d'états basé sur la déforestation par abattis sur brûlis pour prévoir l'utilisation du sol après l'interdiction du défrichement de la forêt. Nous présentons une approche stochastique pour simuler les changements d'états d'occupation du sol gouvernés par des règles de parcelles forestières à partir de leur premier défrichement. Nous disposons des bases de données d'historiques de parcelles localisées dans deux sites du village d'Ambendrana (vallon, versants) du corridor forestier de Fianarantsoa. Les observations temporelles et spatiales des successions d'états sont représentées par des chaînes de Markov en testant deux modèles : 1) modèle de Markov purement homogène et 2) modèle de Markov homogène seulement par période. Le modèle est implémenté sur une plate-forme en Java et calibré avec la réalité en comparant à la date finale les résultats simulés et observés. Les résultats de la simulation permettent de conclure que le modèle de Markov par période est meilleur que le modèle totalement homogène. Ce dernier modèle pourra donc servir à calibrer les règles de transition utilisées par un modèle à base de règles ou un système multi-agent permettant de simuler l'effet de changements de règles.

**Mots clés :** Chaîne de Markov, Histoire culturelle, Corridor forestier malgaché, Modèle stochastique, Compartiment d'occupation du sol

## Introduction

A Madagascar, l'enjeu actuel pour les politiques environnementales est de concilier la conservation des forêts et la production agricole dans un contexte où la pression humaine sur les terres s'accroît. Le couloir RA forestier est un site d'étude qui présente un enjeu national pour la politique de conservation des forêts et de la biodiversité. En lisière du couloir forestier, la physionomie du paysage agricole du terroir villageois change d'une année à l'autre sous l'effet des pratiques agricoles effectuées par la population riveraine pour couvrir ses besoins alimentaires.

Sous l'effet des pratiques culturelles d'agriculture vivrière (abattis sur brûlis et riziculture irriguée) et des processus écologiques de régénération forestière, le paysage du terroir villageois se caractérise par une mosaïque paysagère de rizières, forêts, savanes, parcelles cultivées en pente, reboisements, lambeaux forestiers, vergers et tous les stades de succession forestière post-culturelle. En contexte de lisière de forêt, nous distinguons 5 principaux compartiments d'occupation du sol entre lesquels existent des flux : forêt, culture, jachère herbacée (prairie); jachère forestière (recrû forestier) et rizière. Les transitions entre ces compartiments sont régies par deux types de règles : des évolutions écologiques du couvert végétal et des actions humaines (défriche, mise en jachère, feu et labour).

L'étude de la dynamique paysagère constitue un thème central dans le domaine de l'écologie du paysage. Des géographes et naturalistes ont proposé une variété de bases théoriques et développé des modèles de simulation pour décrire les effets des facteurs biophysiques, économiques, et socio-culturels sur la dynamique paysagère. Les modèles de la dynamique paysagère incluent des systèmes dynamiques, des modèles discrets à états finis, des modèles de Markov et des automates cellulaires. Les modèles de la dynamique de changement d'état sont généralement des modèles complexes qui requièrent un ensemble de données fiables pour le calibrage des paramètres, comme le montre le modèle CLUE de conversion d'usage du sol et de ses effets (Veldkamp & Schoorl, 2001 ; Verburg *et al.*, 2004) dans lequel des analyses statistiques pour établir les relations quantitatives entre les usages du sol actuels et antérieurs et les facteurs bio-physiques, économiques et humains permettent de définir les procédures d'allocation du sol.

En écologie, les chaînes de Markov peuvent servir d'outil pour décrire la dynamique paysagère et simuler les évolutions futures des états d'occupation du sol. Elles ont été initialement conçues pour décrire des dynamiques de population : matrice de Leslie, avant d'être reprises pour l'approche des successions végétales (Usher, 1981 ; Lippe *et al.*, 1985 ; Baltzer, 2000 ; Flamm & Turner, 1994 ; Lândzer & Fillar, 2002) puis pour l'approche agronomique des successions de culture (Benoît *et al.*, 2001). Certains auteurs ont développé des chaînes de Markov spatialisées pour simuler l'évolution de l'occupation du sol dans un paysage agricole (Turner, 1987 ; Luijten 2002 ; Ladet *et al.*, 2005). Dans ce travail, nous utilisons des modèles stochastiques de Markov pour simuler l'historique de parcelles en forêt depuis leur première défriche, en tenant compte des dates de défriche et d'aménagement. Le choix des modèles de Markov est justifié par le fait que l'historique de parcelles est considéré comme une succession d'états dans laquelle l'état suivant dépend conditionnellement de l'état précédent. Dans le modèle, ces parcelles sont considérées comme indépendantes et non spatialisées.

## Méthode

### Description de la zone d'application

La zone d'application est localisée au sud des Hautes Terres en pays betsileo, dans le village d'Ambendrana (21 22'46"S ; 47 18'34"E ; Alt. 1132m) dans le *fokontany* d'Iambara et dans la commune d'Androy. Cette commune est localisée dans la partie nord-ouest du couloir RA. Ce qui reste du bloc forestier est aujourd'hui devenu une bande étroite de forêt variant de 5 à 15 km de large suivant les endroits. Une partie de la forêt de la région a été détruite par l'abattis-brûlis et les feux incontrôlés. La dégradation s'est accélérée depuis les années 70. L'altitude confère à la zone un régime climatique de type tropical à deux saisons : la saison sèche et fraîche de mai à septembre et la saison chaude et pluvieuse d'octobre à avril. Dans la région étudiée, les populations paysannes pratiquent la riziculture irriguée dans les bas-fonds, la culture sur brûlis sur les collines pour produire du manioc, du maïs, des haricots, et des patates douces, et l'élevage extensif de zébus. Sous l'effet de diverses pratiques culturelles, le paysage du terroir villageois est hétérogène d'où une diversité de compartiments d'usage du sol : forêt, culture, jachère, prairie et rizière.

## Données

Le paysage est très hétérogène en lisière de forêt. Pour comprendre les dynamiques d'usage du sol suivant la défriche de la forêt, nous reconstituons l'historique de l'usage des parcelles sur un pas de temps annuel depuis 20 ans dans deux sites contrastés de lisière, dans le village d'Ambendrana : (1) un Vallon dont la mise en valeur a combiné l'aménagement de talwegs en rizières et la défriche de la forêt, (2) un ensemble de Versants jointifs avec différentes expositions, dont la défriche et la régénération se sont échelonnées après l'aménagement du bas-fond. Les historiques d'usage traités ici portent sur 35 parcelles du Vallon et 25 parcelles des Versants.

Dans le cas du vallon qui correspond à un petit bassin versant, nous déterminons les limites passées et actuelles de la forêt, l'histoire de l'aménagement des talwegs en aval, et nous identifions pour chaque parcelle son propriétaire. L'arbre généalogique des familles des premiers défricheurs est alors reconstitué afin d'obtenir les âges des propriétaires et de comprendre dans quel ordre s'est faite la mise en valeur. Les dates du premier défrichement et du premier aménagement de bas-fonds étant connues, on complète l'historique de chaque parcelle par enquête auprès d'un membre adulte de la famille principale propriétaire et, par déduction, en comparant les parcelles entre elles. Nous avons pu ainsi reconstituer sur 20 ans l'usage annuel de la plupart des parcelles de ce Vallon. La même méthode a été appliquée sur le site Versants en distinguant les grandes périodes de défriche.

Cette base de données rend compte des flux entre jachère, culture, prairie et rizière à partir d'une source de forêt. En lisière forestière, les autorisations de défriche de forêt ont été décrétées à des dates fixes contribuant à des défriches par blocs. A partir de l'année 2000, la source de parcelles en forêt s'est bloquée à la suite des mesures de mise en défens prises par les GCF (Gestion Contractualisée de Forêt) et d'interdiction de défriche. Cette mesure a parfois été anticipée par des défriches plus importantes juste avant l'interdiction.

## Modélisation de l'occupation du sol

Nous partons d'un modèle de changement d'états entre 5 compartiments d'occupation du sol : forêt, jachère, culture, prairie et rizière (Figure 25). Chaque transition est étiquetée par un événement discret en caractère normal résultant de la décision d'un agriculteur (défriche, aménagement, labour, mise en feu et abandon) ou un événement continu en italique dans le cas de processus écologiques (régénération forestière, abandon en jachère ou en prairie). Les transitions peuvent être discrètes, temporisées et conditionnelles, et soumises à des règles définissant certaines lois de transformation de la mosaïque paysagère. La seule relation non réversible est celle qui conduit de la forêt à la rizière par l'aménagement de bas-fonds.

Pour modéliser les processus de changements d'états évoluant au cours du temps, nous avons utilisé la chaîne de Markov d'ordre 1 à temps discret, fondée sur l'hypothèse que l'état futur du processus ne dépend que de son état présent qui résume tout son passé (Haggstrom, 2002).

Pour construire une chaîne de Markov, il convient de définir :

- un espace fini d'états qui, dans le cas présent, est formé par l'ensemble {Forêt, Jachère, Culture, Prairie, Rizière} ;
- une matrice des probabilités de transition entre les différents états supposée homogène dans le temps ;
- une distribution initiale constituée par les probabilités initiales d'être dans les différents états.

Les caractéristiques les plus importantes d'une chaîne de Markov sont constituées par l'évolution des probabilités de changement d'états en fonction du temps et la possibilité de converger vers un état global stationnaire indépendamment de la situation initiale.

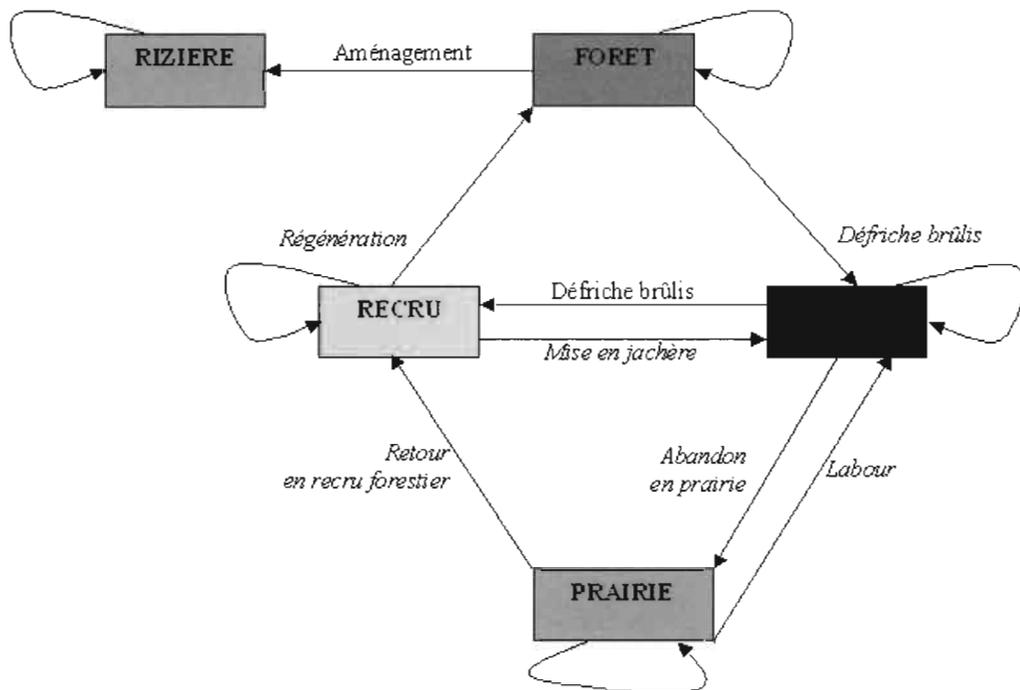


Figure 25. Schéma de transition d'état

## Résultats

### Analyse des histoires culturelles

De simples analyses statistiques sur la structure des données des histoires culturelles des parcelles du Vallon ont permis de faire les constatations suivantes :

- la longueur de séquence observée en forêt varie d'une période à une autre ;
- les dates de début de défrichement sont variables d'une parcelle à l'autre ;
- les dates d'aménagement des rizières sont variables ainsi que les dates des extensions par aménagement de petits casiers supplémentaires ;
- la durée de jachère varie de 1 à 11 ans ;
- la durée de culture varie de 1 à 9 ans ;
- le nombre de cycles culturels varie de 3 à 5 cycles culturels ;
- il reste des portions de forêt intacte, de forêt sacrée ou de site protégé ;
- l'état de prairie ne s'observe pas dans le Vallon (mise en valeur plus récente) alors qu'il couvre une portion d'un versant dans le site Versants.

Les agriculteurs betsileo s'engagent principalement en forêt pour aménager des rizières dans les bas-fonds avant de défricher les versants. On constate que la période d'aménagement précède celle du défrichement. La variabilité observée dans la structure des données nous amène à introduire dans le modèle de changement d'états la notion de période et à découper l'échantillon des parcelles en sous-échantillons. Dans le cas du Vallon, les parcelles peuvent être réparties en 5 classes différentes (paquets) en fonction des dates de première défriche et d'aménagement des rizières (Tableau 18).

Tableau 18. Classification des parcelles en fonction des dates de première défriche et d'aménagement de rizières : cas du vallon.

Nombre de parcelles	Classe	Observations
17	I	Défrichées en 2000
3	II	Défrichées en 1996
10	III	Défrichées en 1988
3	IV	Aménagées en 1999
2	V	Aménagées en 1986

## Calcul des matrices des probabilités de transition

Les matrices sont calculées à partir des données sur les histoires culturales. Dans un premier temps, on construit une matrice de contingence exprimant la relation entre des observations successives entre deux dates. Les colonnes et les lignes de la matrice de contingence représentent les états d'utilisation du sol. L'élément  $a(i,j)$  de la matrice est égal au nombre de transitions entre les états  $i$  et  $j$ . La probabilité  $p(i,j)$  de transition d'un état  $i$  à un autre état  $j$  se calcule par la formule  $p(i,j) = a(i,j)/n(i)$  où  $n(i)$  désigne le nombre de passages à l'état  $i$  (Berchtold, 1988). Dans le cas du modèle de Markov homogène pur, une seule matrice a été construite (Tableau 19) alors que dans le cas du modèle de Markov homogène seulement par période, 5 matrices ont été construites en fonction des 5 classes de parcelles définies à partir des dates de défriche et d'aménagement (Tableau 20).

Tableau 19. Matrices de contingence et de transition du modèle de Markov homogène pur sur 20 ans (1985-2005) : cas du Vallon.

Vallon Etat	Matrice de contingence					Matrice des probabilités de transition				
	Forêt	Jachère	Culture	Prairie	Rizière	Forêt	Jachère	Culture	Prairie	Rizière
Forêt	344	0	29		5	0,91	0	0,077	0	0,13
Jachère	0	67	31	0	0	0	0,68	0,32	0	0
Culture	0	44	129	0	0	0	0,25	0,75	0	0
Prairie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rizière	0	0	0	0	51	0	0	0	0	1

Tableau 20. Différentes matrices de contingence et de transition du modèle de Markov homogène par période sur 20 ans (1985-2005) : cas du Vallon.

Vallon Classe	Etat	Matrice de contingence				Matrice des probabilités de transition			
		Forêt	Jachère	Culture	Rizière	Forêt	Jachère	Culture	Rizière
I : Première défriche en 2000	Forêt	41	0	16	0	0,72	0	0,28	0
	Jachère	0	10	6	0	0	0,625	0,375	0
	Culture	0	14	49	0	0	0,22	0,78	0
II : Première défriche en 1996	Forêt	3	0	3	0	0,5	0	0,5	0
	Jachère	0	1	1	0	0	0,5	0,5	0
	Culture	0	3	19	0	0	0,14	0,86	0
III : Première défriche en 1988	Forêt	2	0	10	0	0,17	0	0,83	0
	Jachère	0	56	24	0	0	0,70	0,30	0
	Culture	0	27	61	0	0	0,30	0,70	0
IV : Premier aména gement en 1999	Forêt	0	0	0	2	0	0	0	1
	Rizière	0	0	0	38	0	0	0	1
V: Premier aména gement en 1986	Forêt	5	0	0	3	0,625	0	0	0,375
	Rizière	0	0	0	13	0	0	0	1

## Simulation et comparaison des situations simulées et observées en 2005

Pour simuler le modèle de changement d'état, une plate-forme informatique a été développée en utilisant le langage Java qui a été choisi pour sa portabilité et sa puissance en programmation orientée objet, visuelle et événementielle. L'interface graphique du logiciel comprend principalement une liste de choix de types de chaînes de Markov, une matrice de transition, un histogramme des états globaux et une interface graphique cellulaire où se déroule la simulation (Figure carnet central 26).

Les changements d'états sont simulés par les modèles de Markov basés sur des matrices de transition à partir d'une situation initiale. A chaque pas de temps, le simulateur estime les pourcentages de différents compartiments d'occupation du sol et la simulation se poursuit jusqu'à un certain temps fixé à l'avance. Le processus de Markov peut converger vers un état global stationnaire au bout d'un nombre suffisamment important d'itérations. Dans le cas du modèle de Markov homogène par période, à chaque pas de temps, chaque cellule passe d'un état à un autre état en appliquant la matrice de transition associée à la classe à laquelle elle appartient. Une vingtaine de simulations markoviennes d'une durée de 20 ans ont été exécutées à partir d'une situation initiale en forêt, ce qui a permis de déterminer l'état global simulé exprimé en terme de pourcentages moyens de forêt, culture, jachère, prairie et rizière. Nous avons analysé deux résultats :

- 1) la comparaison des états globaux simulés et observés en 2005 (Tableau 4) en calculant la différence relative par la formule :  $(\% \text{ Sim}2005 - \% \text{ Observé}2005) / (\% \text{ Sim}2005 + \% \text{ Observé}2005)$  pour chaque catégorie d'occupation du sol ;
- 2) la comparaison des évolutions réelles et simulées des différentes catégories d'occupation du sol durant les 20 années de simulation (1985-2005) (Figure 26).

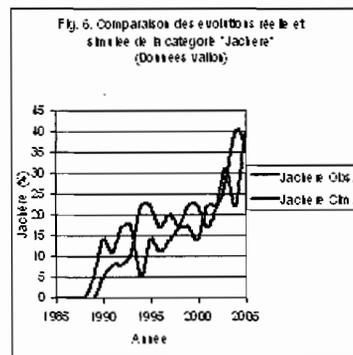
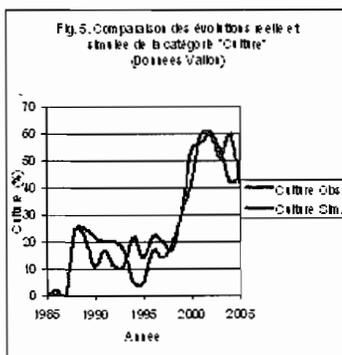
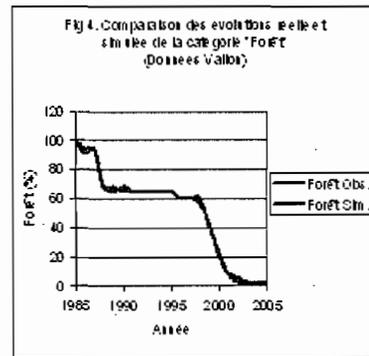
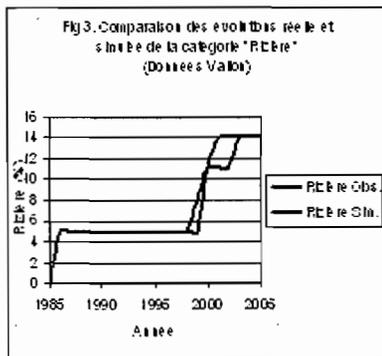


Figure 26. Comparaison des évolutions réelle et simulée de la catégorie (a) rizière ; (b) forêt ; (c) culture ; (d) jachère pour les données Vallon

Figure 26, concernant les données du Vallon, amène aux commentaires suivants :

- 1) on retrouve les deux périodes d'aménagement de rizières de 1985 à 1988 et de 2000 à 2005 (Figure 26a) ;
- 2) la défriche de la forêt se déroule quasiment aux mêmes périodes que l'aménagement, avec un décalage, mais s'achève avant l'année 2000 après laquelle les COBA ont interdit la défriche de la forêt (Figure 26b) ;
- 3) la période de mise en culture démarre avec la période de défriche (Figure 26c) ;
- 4) le pourcentage de surface en jachère (recrû) a tendance à augmenter tout au long de 20 ans (Figure 26d).

Les Figure 26a et b montrent une bonne correspondance entre les 2 courbes simulée et observée alors que les autres Figure 26c et d présentent des fluctuations.

Les résultats de la simulation par chaîne de Markov pure montrent que les états globaux simulés en 2005 diffèrent de ceux observés (2,86 % observé contre 14% simulé en forêt en 2005). Ces résultats ont été améliorés en utilisant la chaîne de Markov homogène par période : le paysage simulé est très proche du paysage observé (Tableau 21).

Tableau 21. Résultat de la simulation du modèle par chaînes de Markov homogène pure et homogène par période : cas du Vallon

Etat	Vallon	Markov homogène pure		Markov homogène par période	
	Observé2005 %	Simulé2005%	Différence relative	Simulé2005%	Différence relative
Forêt	2,86	14	0,661	3	0,024
Jachère	37,14	30	-0,106	38	0,011
Culture	45,71	44	-0,019	44	-0,019
Rizière	14,29	12	-0,087	14	-0,010

## Application aux données du site Versants

La même démarche de modélisation précédente est appliquée à la base de données " Versants " en découpant la base de données historiques des versants en 3 classes en fonction des dates de première défriche 1988, 1995 et 1999. L'état rizière n'apparaît pas car l'aménagement du bas-fond était antérieur à toutes les dates de défriche des versants étudiés. Par contre la transition à l'état prairie a déjà eu lieu. Pour ce second cas nous présentons directement les matrices de transition.

Tableau 22. Matrice de transition du modèle de Markov homogène pur sur 19 ans (1987-2006) : cas des Versants

Versants Etat	Matrice des probabilités de transition			
	Forêt	Jachère	Culture	Prairie
Forêt	0,88	0	0,12	0
Jachère	0	0,84	0,16	0
Culture	0	0,28	0,67	0
Prairie	0	0	0,19	0,81

Tableau 23. Différentes matrices de transition du modèle de Markov homogène par période sur 19 ans (1987-2006) : cas des Versants

Classe	EtatsVersants	Forêt	Jachère	Culture	Prairie
I : Première défriche en 1999	Forêt	0	0	1	0
	Jachère	0	0,94	0,06	0
	Culture	0	0,31	0,69	0,06
	Prairie	0	0	0	0
II : Première défriche en 1995	Forêt	0	0	1	0
	Jachère	0	0,8	0,2	0
	Culture	0	0,23	0,71	0,06
	Prairie	0	0	0,18	0,82
III : Première défriche en 1988	Forêt	0	0	1	0
	Jachère	0	0,78	0,22	0
	Culture	0	0,36	0,58	0,06
	Prairie	0	0	0,2	0,8

Tableau 24. Résultats de la simulation du modèle par chaînes de Markov homogène pure et homogène par période : cas des Versants

Etat	Versants	Markov homogène pure		Markov homogène par période	
	Observé2006 %	Simulé2006 %	Différence relative	Simulé2006 %	Différence relative
Forêt	0	18	1	0	0
Jachère	72	47	-0,21	61	-0,083
Culture	16	28	0,273	30	0,304
Prairie	12	7	-0,263	8	-0,2

La Figure 27, concernant les données des Versants amène aux commentaires suivants :

- 1) il y a trois périodes de défriche : de 1987 à, 1988, de 1994 à 1995 et 1998 à 1999 qui se traduisent par une augmentation de la surface en culture par palliers ;
- 2) le pourcentage de surface en jachère (Figure 27a) tend à croître dans le temps selon plusieurs palliers alors que le pourcentage en prairie reste très faible (Figure 27b).

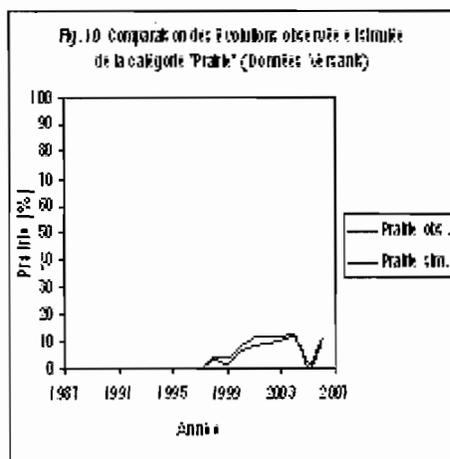
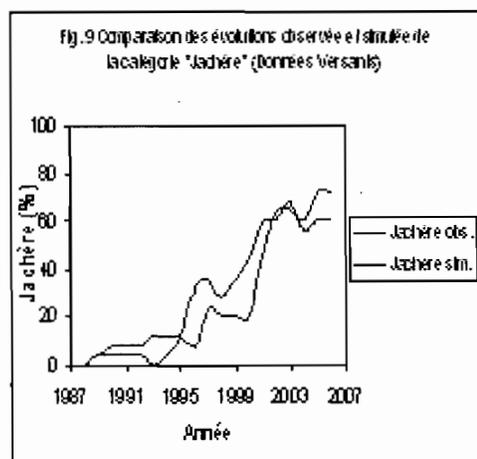


Figure 27. Comparaison des évolutions réelle et simulée de la catégorie (a) jachère ; (b) prairie pour les données Versants

## Conclusion

Ce travail, réalisé à partir de deux bases de données d'historiques culturelles de parcelles du village d'Ambendrana (sites du Vallon et des Versants), présente une alternative pour simuler l'historique de l'usage de parcelles en forêt depuis leur première défriche en tenant compte des dates de défrichement et d'aménagement à l'aide de deux modèles markoviens (chaîne de Markov pure et homogène par période). Le résultat de la simulation par chaîne de Markov pure est différent de la situation observée à la date finale. La faiblesse de la chaîne de Markov provient de l'hypothèse que la matrice de transition est homogène dans le temps et ne prend pas en compte l'aspect spatial ni l'influence de facteurs externes sur les processus de changements d'états. L'application du modèle de Markov homogène seulement par période a permis d'obtenir des résultats simulés beaucoup plus proches du paysage observé. L'analyse des résultats de la simulation permet de constater qu'aussi bien dans le Vallon que dans les Versants, le pourcentage de surface de la forêt diminue alors que celui de la culture augmente durant une période bien définie. Durant 20 ans, les surfaces en jachère et recru forestier tendent à remplacer les surfaces initialement en forêt et l'état prairie fait tout juste son apparition. Ces deux occupations du sol ont des évolutions subissant des fluctuations. Le modèle de Markov homogène seulement par période pourra donc servir à calibrer les règles de transition utilisées par un modèle à base de règles ou un système multi-agent permettant de simuler l'effet de changements de règles.