

Calibration et validation d'un modèle de dynamique d'occupation du sol postforestière à base d'automate temporisé à l'aide d'un modèle markovien

Application à la transition forêt-agriculture à Madagascar

Venot Ratiarson¹
 Dominique Hervé^{1,2}
 Cyprien R. Rakotoasimbahoaka¹
 Jean-Pierre Müller³

¹ Université de Fianarantsoa
 École nationale d'informatique
 BP 1487 Tanambao
 Fianarantsoa (301)
 Madagascar
 <r_venot@yahoo.fr>
 <dominique.herve@ird.fr>
 <rakoto_cyprien@yahoo.fr>

² IRD
 911, avenue Agropolis
 BP 64501
 34394 Montpellier cedex 5
 France

³ Cirad
 UR GREEN
 73, rue Jean-François Breton
 BP 5035
 34398 Montpellier cedex 5
 France
 <jean-pierre.muller@cirad.fr>

Résumé

La détermination des règles de transition moyennes, vers lesquelles tendent les pratiques de successions culturales des agriculteurs après le défrichement de la forêt, est essentielle pour décider d'une stratégie de conservation. La lisière du couloir forestier est malgache se caractérise par une mosaïque paysagère hétérogène. Parmi les six états d'occupation du sol que peut prendre une parcelle – forêt, culture, jachère, herbe, plantation et rizière – nous justifions le choix des quatre premiers pour modéliser les dynamiques écologiques et les successions culturales. Les transitions entre ces états, gouvernées par des règles recueillies auprès des agriculteurs riverains de la forêt, sont représentées par un modèle d'automate temporisé paramétré par les durées de séjour en culture, jachère, herbe et par le nombre de cycles culturaux depuis le premier défrichement de la forêt. L'objectif est de calibrer et valider l'automate temporisé à l'aide d'un modèle markovien selon la métrique de χ^2 , à partir de deux jeux d'historiques d'occupation du sol de parcelles en lisière, initialement en forêt, indépendantes et non spatialisées. L'automate temporisé est calibré par simulation, sur le premier jeu de données de 34 ans, puis validé sur le second jeu de données de 22 ans depuis le premier défrichement, de manière à minimiser la distance entre deux matrices markoviennes – celle qui résume la dynamique simulée et celle qui agrège la dynamique observée. Selon les tests de χ^2 , les paramètres ajustés du modèle sont acceptables et conformes en moyenne aux pratiques des agriculteurs. Des scénarios de disparition de la forêt sont construits avec le modèle validé.

Mots clés : automate ; Madagascar ; utilisation des terres.

Thèmes : forêts ; méthodes et outils ; ressources naturelles et environnement.

Abstract

Calibration and validation of a post-forest land use dynamic model based on timed automaton using a Markov model. Application to forest-agriculture transition in Madagascar

Determining average transition rules to which farmer cropping succession practices tend after forest clearing is essential to deciding on a strategy for forest conservation. The bordering area of the Malagasy East forest is characterized by a heterogeneous mosaic landscape. Among six land use states for each plot – forest, fallow, crop, herb, plantation and paddy field – we justify the choice of the first four for modelling the dynamics of ecological and cultural practices. The transitions between these states have been governed by a set of land use change rules observed in inquiries conducted with farmers. These transitions are represented by a land-use model based on a timed automaton which is

Pour citer cet article : Ratiarson V, Hervé D, Rakotoasimbahoaka CR, Müller JP, 2011. Calibration et validation d'un modèle de dynamique d'occupation du sol postforestière à base d'automate temporisé à l'aide d'un modèle markovien. Application à la transition forêt-agriculture à Madagascar. *Cah Agric* 20 : 274-9. doi : 10.1684/agr.2011.0498

Tirés à part : D. Hervé

parameterized by the durations of fallow, crop and herb states and the number of cropping cycles since first forest clearing. The objective is to calibrate and validate the timed automaton with the help of a Markov model according to χ^2 metric from two samples of plots initially covered with Forest and considered independent and not spatially localized. The timed automaton is calibrated by simulating on 34 years since forest clearing with the first sample and then validated on 22 years with the second sample to minimize the distance between two Markov matrices which summarize the simulated and observed dynamics. According to the test of χ^2 , the fitted parameters are accepted and on average in accordance with farmers' practices. Some scenarios of deforestation are built with the validated model.

Key words: land use; Madagascar; robots.

Subjects: forestry; natural resources and environment; tools and methods.

La détermination des règles de transition moyennes vers lesquelles tendent les pratiques de successions culturales des agriculteurs après le défrichement de la forêt est essentielle pour décider d'une stratégie de conservation. Le corridor forestier de Fianarantsoa qui relie deux aires protégées, au centre est malgache, constitue un enjeu national pour la politique de conservation des forêts et de la biodiversité. Sa lisière est une mosaïque paysagère hétérogène regroupée, pour la modélisation de l'occupation du sol, en six états entre lesquels existent des transitions : forêt, culture, jachère, herbe, plantation et rizière. La première culture résulte d'un défrichement de la forêt, les suivantes d'un défrichement de jachère ou d'un retournement d'herbe. L'état jachère résulte de l'abandon de culture. L'état rizière provenant de l'aménagement définitif de bas-fonds en forêt, et la catégorie plantation regroupant pour sa durée relativement longue les cultures pérennes (10 ans) et les plantations d'arbres (20 ans), bloquent les possibilités de régénération forestière. Les transitions entre ces états sont gouvernées par des règles de changement d'état observées auprès des agriculteurs riverains de la forêt, à l'échelle de la parcelle, unité paysagère qui évolue annuellement sous l'effet des pratiques des agriculteurs ou des processus écologiques de régénération forestière (Randriamalala *et al.*, 2007). Le problème est alors de trouver les règles moyennes de changement d'état des parcelles de forêt depuis l'année de leur premier défrichement, d'abord dans une phase culturale postforestière, puis dans une phase postculturale de successions végétales.

Le suivi de l'évolution d'un paysage à partir de son état passé a donné lieu à des modèles de changement d'état, qui requièrent de nombreuses données fiables pour le calibrage des paramètres : des modèles agrégés comme les équations différentielles (Dobson *et al.*, 1997) et les modèles markoviens (Baltzer, 2000 ; Lippe *et al.*, 1985 ; Turner, 1987), des modèles explicitant l'espace comme les automates cellulaires (Landzer, 2002) ou les acteurs comme les modèles à base d'agents (Castella *et al.*, 2002) et des modèles d'automate temporisé (Largouet et Cordier, 2000 ; Doyen, 2007).

L'objectif de ce travail est de calibrer et valider un modèle de dynamique d'occupation du sol postforestière à base d'automate temporisé à l'aide d'un modèle markovien. Nous disposons de deux jeux d'historiques culturels annuels d'occupation du sol de parcelles en lisière, initialement en forêt, indépendantes et non spatialisées, localisées dans deux zones paysagères proches, mais différentes, de la lisière ouest du corridor : l'un pour la calibration et l'autre pour la validation.

Méthode

Description de la zone d'application

La zone d'application est localisée au centre est des Hautes Terres malgaches, dans la commune Betsileo d'Androy, située au nord-ouest du corridor forestier de Fianarantsoa, en bordure d'une bande étroite de forêt (5-15 km) reliant les parcs nationaux

de Ranomafana et d'Andringitra. Les parcelles sont échantillonnées entre le nord-est du village d'Ambendrana (21° 22' 46" S ; 47° 18' 34" E ; alt. 1 132 m) et le village d'Amindrabe. Dans la région étudiée, les populations paysannes pratiquent la riziculture irriguée dans les bas-fonds et la culture sur brûlis sur les pentes pour produire maïs, haricot, patate douce et manioc, les zébus servant pour le piétinement, la mise en boue des rizières et l'apport de fertilisant organique.

Obtention des données

Pour comprendre les dynamiques d'usage des terres après le défrichement de la forêt, nous avons reconstitué l'histoire culturelle d'un échantillon de parcelles en bordure Betsileo du corridor forestier, qui se trouvaient initialement en forêt. À l'échelle d'un petit bassin-versant, le défrichement des bas de versants suit en général l'aménagement des talwegs en rizières. Les dates du premier défrichement et du premier aménagement de bas-fonds étant connues, l'historique de chaque parcelle depuis la forêt jusqu'à son état actuel est reconstitué par enquêtes et en comparant les parcelles entre elles. Les autorisations de défrichement de forêt, décrétées à des dates fixes, ont contribué à des défrichements par paquets qui ont pris fin à partir de 2000, année de l'interdiction instituée par les transferts de gestion. La limite de la forêt se trouve dès lors figée et ce sont d'autres couverts végétaux qui sont sollicités pour être mis en culture. Deux petits bassins-versants voisins ont été échantillonnés sur 22 ans (1985-2006) : 60 parcelles du Vallon 1, qui incluaient des rizières et des

plantations, et 25 parcelles du Valon 2, qui incluait des parcelles en herbe. Dans la lisière forestière, hors de ces bassins-versants, l'historique culturel de 104 parcelles est reconstitué sur 34 ans (1973-2006) par recoupement des enquêtes et des observations actuelles sur la végétation.

Dynamique de l'usage du sol pour une parcelle

En lisière de forêt, les transitions entre les états sont gouvernées par des règles, définies par des durées de séjour dans chaque état transitoire, déterministes pour les dynamiques écologiques et non déterministes pour les pratiques des agriculteurs. Nous verrons comment certaines simplifications nous ramènent à des règles déterministes. Ces règles reposent sur l'observation que les successions de couvert végétal s'effectuent dans l'ordre forêt → culture → jachère ou herbe. Par exemple : i) si une parcelle est dans l'état jachère ou herbe, alors

elle sera cultivée au plus tôt après 2 ans ; ii) après avoir suivi au moins deux cycles de culture-jachère, une parcelle passe de l'état culture à l'état herbe dès qu'elle est abandonnée ; iii) si une parcelle reste en jachère pendant 50 ans, alors elle devient forêt.

Modèle d'automate temporisé

Choix de l'automate temporisé

Les automates temporisés peuvent être décrits comme des automates d'états finis auxquels ont été rajoutées des variables d'horloge (Alur et Dill, 1994). Ces horloges évoluent au cours du temps, toutes à la même vitesse. Chaque transition d'un automate temporisé est étiquetée d'une part par l'action qui peut être effectuée, d'autre part par une contrainte d'horloge qui doit être vérifiée pour franchir la transition, et enfin par un ensemble d'horloges qui devront être remises à zéro. La sémantique de la modélisa-

tion par automate temporisé – une suite de couples (action, date) – est bien adaptée pour décrire l'évolution annuelle d'une parcelle avec des contraintes temporelles.

Description du modèle

L'évolution de la parcelle est représentée à l'aide d'un automate temporisé (figure 1) où les nœuds représentent les états d'occupation du sol, et les arcs, les transitions étiquetées par des événements munis de contraintes temporelles. On distingue les événements continus, correspondant aux dynamiques écologiques, et les événements discrets, correspondant aux pratiques agricoles.

L'automate se définit par :

- des variables d'horloge τ_f , τ_c , τ_j , τ_h , τ_p et τ_r pour les états forêt, culture, jachère, herbe, plantation et rizière, initialisées à zéro au début des transitions ;
- un compteur de cycles culturaux (τ_{cycle}) initialisé à zéro lors du premier défrichement. Un cycle cultural est la

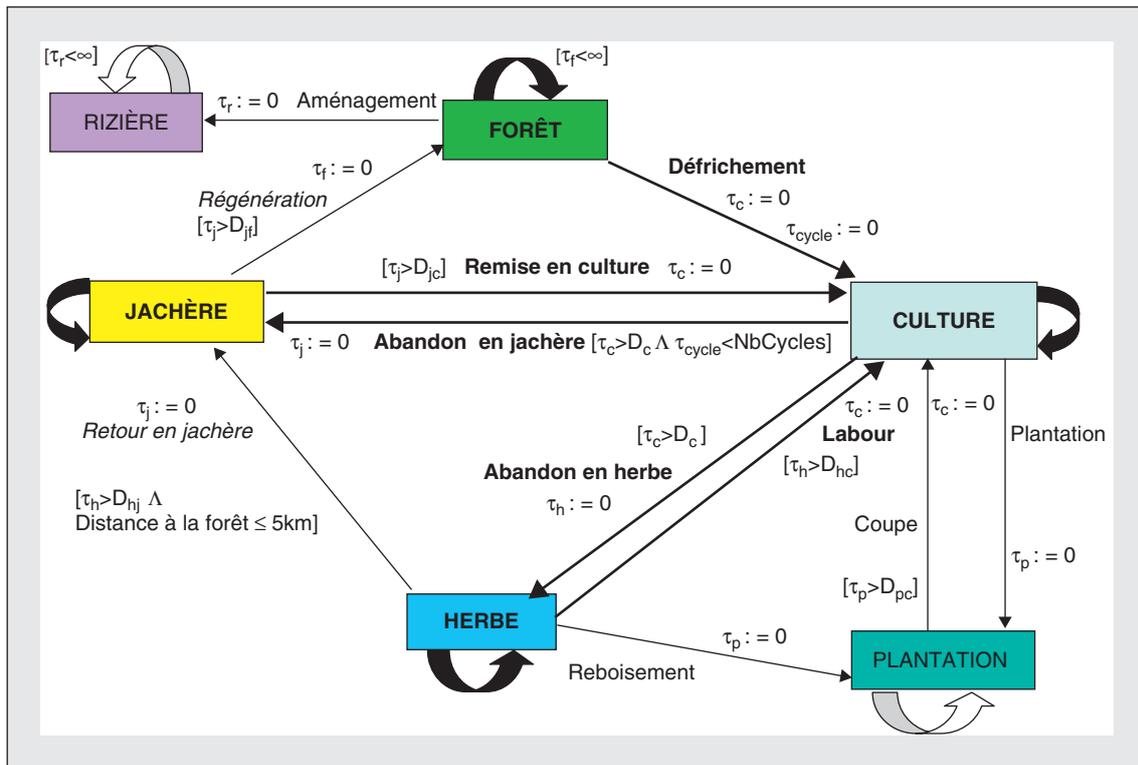


Figure 1. Transitions entre les états d'occupation du sol postforestière.

Figure 1. Land use transitions after first forest clearing.

En gras, les quatre états et les transitions choisis pour le modèle simplifié ; en italiques, les dynamiques écologiques ; en caractères romains, les pratiques des agriculteurs ; entre crochets carrés, les contraintes temporelles.

Tableau 1. Sémantique de l'automate temporisé.

Table 1. Semantics of timed automaton.

État courant	Transitions	Etat final
Forêt	- Défrichage : forêt→culture - Aménagement : forêt→rizière	Culture Rizière
Culture	- Culture [$\tau_c \leq D_c$] : culture→culture - Abandon en Jachère [$\tau_c > D_c \wedge \tau_{\text{cycle}} < \text{NbCycles}$] : culture→jachère - Abandon en herbe [$\tau_c > D_c \wedge \tau_{\text{cycle}} \geq \text{NbCycles}$] : culture→herbe - Plantation : culture→plantation	Culture Jachère Herbe Plantation
Jachère	- En jachère [$\tau_j \leq D_{jc} \vee \tau_j \leq D_{jf}$] : jachère→jachère - Régénération en forêt [$\tau_j > D_{jf}$] : jachère→forêt - Remise en culture par défrichage [$\tau_j > D_{jc}$] : jachère→culture	Jachère Forêt Culture
Herbe	- En herbe [$\tau_h \leq D_{hc} \vee \tau_h \leq D_{hj}$] : herbe→herbe - Remise en culture par labour [$\tau_h > D_{hc}$] : herbe→culture - Conversion en jachère [$\tau_h > D_{hj} \wedge \text{distance à la forêt} \leq 5 \text{ km}$] : herbe→jachère - Reboisement : herbe→plantation	Herbe Culture Jachère Plantation
Plantation	- En plantation [$\tau_p \leq D_{pc}$] : plantation→plantation - Coupe et défrichage [$\tau_p > D_{pc}$] : plantation→culture	Plantation Culture
Rizière	- En rizière [$\tau_r < \infty$] : rizière→rizière	Rizière

Les symboles \wedge et \vee désignent respectivement les connecteurs logiques « ET » et « OU ».

succession d'années de culture suivies d'années de jachère jusqu'à la remise en culture suivante ; le nombre de cycles (NbCycles) conditionne la transition de culture à herbe ;

- des durées de séjour respectivement en culture (D_c) avant d'être abandonnée en jachère ou herbe ; en jachère avant de passer en culture (D_{jc}) ou d'être régénérée en forêt (D_{jf}) ; en herbe avant d'être labourée pour être cultivée (D_{hc}), ou avant de devenir jachère (D_{hj}) ; en plantation (D_{pc}) au bout de laquelle la plantation est défrichée pour une mise en culture ;
- un système de transitions, étiquetées d'événements munis de contraintes de temps, donnant la sémantique de l'automate (tableau 1).

Parmi les transitions existantes, la transition de forêt vers rizière est irréversible et les transitions vers l'état plantation conduisent au maintien dans cet état pendant au moins 20 ans. Les états rizière et plantation, constituant des blocages longs de l'usage du sol, sont considérés comme des états absorbants au sens de Markov. La période couverte par l'échantillon ne laisse pas le temps d'une régénération forestière ni d'une

conversion d'herbe en jachère. Les transitions correspondantes et les états absorbants sont donc éliminés dans le modèle simplifié dont toutes les règles sont à présent déterministes (figure 1). Parmi les quatre états retenus (forêt, culture, jachère, herbe), forêt n'intervient que dans le premier défrichage (forêt→culture).

L'automate évolue en partant de l'état initial en forêt, défriché pour la mise en culture. Pendant D_c années, la parcelle reste dans l'état culture puis est abandonnée en jachère dès que $\tau_c > D_c$ et $\tau_{\text{cycle}} < \text{NbCycles}$. L'automate reste en jachère pendant D_{jc} années et revient à culture lorsque $\tau_j > D_{jc}$. Quand $\tau_{\text{cycle}} \geq \text{NbCycles}$ et $\tau_c > D_c$, l'état culture est abandonné en herbe, état dans lequel l'automate reste pendant D_{hc} années et passe à culture par un labour dès que $\tau_h > D_{hc}$.

Dans ce modèle, deux décisions de l'agriculteur – la mise en culture et l'abandon – liées entre elles, définissent un moteur de changement d'état pour la recherche d'une nouvelle parcelle en remplacement d'une parcelle abandonnée, afin de garantir les besoins alimentaires de la population. Le taux de remplacement β définit le

nombre de parcelles à cultiver pour remplacer une parcelle abandonnée. Le choix de nouvelles parcelles s'effectue selon les précédents culturels dans l'ordre suivant : 1) jachère, 2) herbe, 3) forêt ; en choisissant la forêt en dernier car elle est protégée par des dispositifs de conservation et, dans chaque classe, la parcelle la plus âgée car elle est supposée plus fertile.

Analyse des histoires culturelles

Les 66 parcelles des vallons hors plantations et rizières, jointes aux 104 parcelles de lisière, qui renseignent les transitions entre quatre états d'occupation du sol (forêt, culture, jachère, herbe), constituent l'échantillon complet des 170 parcelles de bordure Betsileo du corridor. Selon ces données : i) la durée de séjour en forêt avant le premier défrichage varie selon l'année de défrichage ; ii) les temps de séjour dans chaque état varient entre 1 et 9 ans (culture), 1 et 12 ans (jachère intercalaire), 1 et 5 ans (herbe) et le nombre de cycles culturels varie de 1 à 5.

Calibration et validation de l'automate temporel

Les paramètres du modèle sont les durées de séjour en culture, en jachère et en herbe ainsi que le nombre de cycles culturaux depuis le premier défrichement. Avec un pas de temps annuel, la simulation du modèle génère en sortie une succession d'états pour chaque parcelle, par l'application des règles de transition, à partir d'une configuration initiale du paysage composée d'un nombre fixe de parcelles en forêt, dont un petit nombre de parcelles cultivées implicitement égal à la taille de la population initiale.

L'échantillon de données a une structure complexe car il est composé d'historiques annuels d'occupation du sol de 170 parcelles dans lesquels les temps de séjour dans chaque état sont variables. Comparer les successions temporelles simulées et observées de plusieurs parcelles est une opération complexe qui nous oblige à examiner deux matrices de transition markoviennes résumant ces successions. Sous l'hypothèse nulle que la matrice de transition simulée est identique à la matrice observée, soit

$$p_{ij}^{sim} = p_{ij}^{obs}$$

pour $i, j = 1..m$, la statistique de test

$$S = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m n_i^{sim} \frac{(p_{ij}^{sim} - p_{ij}^{obs})^2}{p_{ij}^{obs}}$$

suit une loi de χ^2 avec $m(m-1)$ degrés de liberté, où m désigne le nombre des

états possibles (Anderson et GoodMan, 1957). La probabilité moyenne p_{ij} de passer de l'état i à l'état j est estimée empiriquement par le rapport $p_{ij} = n_{ij}/n_i$ où n_{ij} est le nombre de transitions de l'état i vers l'état j et n_i , le nombre d'unités du paysage dans l'état i (Berchtold, 1998).

Nous construisons la matrice de transition en ne prenant pas en compte les séquences longues : i) de forêt initiale, jusqu'au premier défrichement ; ni ii) de jachère finale, après le dernier abandon de culture, car ces séquences n'apportent pas d'informations significatives sur la dynamique de l'occupation du sol. Lorsque la durée de la jachère finale dépend de la dernière année d'observation, et non d'une remise en culture, on ne peut la relier ni à une dynamique écologique, ni à une décision de l'agriculteur. On ne garde donc que les successions d'états situées entre le premier défrichement et le dernier abandon.

La calibration de l'automate consiste à ajuster les paramètres des règles en explorant en parallèle l'espace des quatre paramètres dans leurs plages de valeurs préalablement définies. On simule de manière itérative, pour chaque quadruplet de paramètres, la dynamique d'utilisation du sol sur toutes les parcelles pour une durée donnée tout en gardant $\beta = 1$. Les paramètres ajustés sont ceux qui minimisent la distance entre la matrice simulée retenue et la matrice de Markov observée, selon la métrique de χ^2 .

La validation du modèle consiste à le simuler avec les paramètres préala-

blement ajustés sur un nouveau jeu de données d'une autre durée. Les successions simulées sont ensuite comparées aux observations issues du second jeu de données *via* les matrices de transition.

Résultats

Le modèle est calibré avec le jeu d'histoires culturelles de 104 parcelles de lisière connues sur une durée de 34 ans. Le modèle ainsi calibré est ensuite validé par simulation sur l'autre jeu de données des 66 parcelles du vallon dont l'usage est connu sur une durée de 22 ans. Dans les deux cas, nous procédons à un test de χ^2 avec 12 degrés de liberté, un risque de 5 % et une hypothèse nulle (H_0) : les matrices simulée et observée sont similaires. Les valeurs des paramètres ajustés par la calibration (tableau 2) sont les durées de séjour en culture de 3 ans, en jachère de 2 ans, en herbe de 4 ans et le nombre de cycles culturaux égal à 4.

L'acceptation de l'hypothèse nulle du test de validation (tableau 3) permet de conclure que les paramètres ajustés du modèle sont donc conformes en moyenne aux pratiques culturelles des agriculteurs observées sur le terrain. Avec le modèle validé, nous testons des scénarios de croissance démographique et d'anticipation foncière en faisant varier le taux de remplacement d'une parcelle abandonnée β entre 1 et 3 dans un espace borné de 900 parcelles initialement en forêt

Tableau 2. Calibration par minimisation de la distance entre les matrices de Markov observée et simulée.

Table 2. Calibration by minimizing the distance between observed and simulated Markov matrices.

État initial	État final							
	Matrice observée				Matrice simulée retenue			
	Forêt	Jachère	Culture	Herbe	Forêt	Jachère	Culture	Herbe
Forêt	0	0	1	0	0	0	1	0
Jachère	0	0,69	0,31	0	0	0,67	0,33	0
Culture	0	0,32	0,62	0,06	0	0,27	0,68	0,05
Herbe	0	0	0,16	0,84	0	0	0,18	0,82

Statistique de test χ^2 (3,76) inférieure au seuil critique (21,03), donc H_0 acceptée.

Tableau 3. Comparaison des matrices de Markov observée et simulée pour la validation.

Table 3. Comparison of observed and simulated Markov matrices for validation.

État initial	État final							
	Matrice observée				Matrice simulée			
	Forêt	Jachère	Culture	Herbe	Forêt	Jachère	Culture	Herbe
Forêt	0	0	1	0	0	0	1	0
Jachère	0	0,59	0,41	0	0	0,63	0,37	0
Culture	0	0,26	0,72	0,02	0	0,25	0,70	0,05
Herbe	0	0	0,19	0,81	0	0	0,18	0,82

Statistique de test χ^2 (5,52) inférieure au seuil critique (21,03), donc H_0 acceptée.

dont 9 parcelles cultivées, ce qui correspond aux connaissances des agronomes sur les vallons observés. Nous estimons par simulation dans chaque scénario au bout de combien d'années : i) la forêt va disparaître ; ii) la forêt ne dépasse pas un seuil de préservation de 50 % mesuré en population de parcelles. Le scénario $\beta = 1$ ne prévoit pas la disparition de la forêt. Les scénarios $\beta = 2$ et $\beta = 3$, correspondant à des anticipations de mise en réserve de terres pour les descendants, donnent respectivement 21-15 ans et 12-9 ans. Ces délais relativement courts posent la question du maintien de la forêt dans les prochaines décennies.

Discussion

Les résultats de la calibration et de la validation dépendent des contraintes de construction de la matrice markovienne et du choix de deux jeux dans les données. D'autres démarches posent des problèmes : i) calibrer le modèle sur m parcelles et le valider sur n autres parcelles de l'échantillon oblige à tirer aléatoirement m et n ; ii) calibrer sur m années et valider sur n années suivantes oblige à changer de matrice de transition car les états d'occupation du sol ne sont pas les mêmes entre les deux périodes, empêchant toute comparaison. Nous avons donc choisi de diviser l'échantillon des 170 parcelles selon deux zones géographiques – vallons et lisière – la différence de durée des

successions (22 et 34 ans) n'ayant pas de conséquences sur la structure de la matrice de transition.

Conclusion

Ce travail aborde un problème de détermination des règles moyennes vers lesquelles tendent les pratiques des agriculteurs après le premier défrichement de la forêt en lisière du corridor forestier. Un modèle à base d'automate temporisé a été proposé pour modéliser la dynamique d'occupation du sol régie par des règles déterministes reposant sur des durées. L'originalité de ce travail réside dans : i) l'explicitation de toutes les étapes de simplification dans la construction du modèle ; ii) la possibilité de calibrer l'automate temporisé sur un jeu de données et de le valider sur un autre jeu de données ; iii) la possibilité de valider en s'appuyant sur la comparaison des matrices markoviennes par un test de χ^2 . Des scénarios de disparition de forêt sont testés avec le modèle validé.

Cependant l'unicité des règles et leur stabilité dans le temps sont des contraintes fortes alors que ces règles varient selon les besoins des agriculteurs et l'évolution des techniques agricoles. Un modèle à base d'agents permettrait de simuler des règles variables selon les agriculteurs et la croissance démographique, tout en étant plus difficile à calibrer, étant donné le plus grand nombre de paramètres. ■

Références

- Alur R, Dill D, 1994. À theory of timed automata, *Theoretical Computer Science* 126 : 183-235.
- Anderson L, Goodman L, 1957. Statistical inference about Markov Chains. *Annals of Mathematical Statistics* 28 : 89-109.
- Baltzer H, 2000. Markov chain models for vegetation dynamics. *Ecological Modelling* 126 : 139-54.
- Berchtold A, 1998. *Chaînes de Markov et modèles de transition. Applications aux sciences sociales*. Paris : Hermes.
- Castella JC, Boisseau S, Tran Ngoc T, Dang Dinh Q, 2002. Samba, un système multi-agents pour la compréhension des dynamiques agraires : cas des zones de montagne du bassin du fleuve Rouge (Viêt Nam). In : Orange D, Arfi R, Kuper M, Morand P, Poncet Y, eds. *Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales*. Colloction Colloques et Séminaires. Paris : IRD éditions.
- Dobson AP, Bradshaw AD, Baker AJM, 1997. Hopes for the future : restoration ecology and conservation biology. *Science* 277 : 515-22.
- Doyen L 2007. Robust parametric reachability for timed automata. *Information Processing Letters* 102 : 208-13.
- Landzer AS, Fillar VD, 2002. Probabilistic cellular automata model and application to vegetation dynamics. *Community Ecology* 3 : 159-67.
- Largouët C, Cordier MO, 2000. Modélisation par automate temporisé pour aider à l'identification de l'occupation du sol. *Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle* 2 : 285-94.
- Lippe E, Desmidt JT, Glena Lewin D, 1985. Markov models and succession : a test for heathland in the Netherlands, *Journal of Ecology* 73 : 775-91.
- Randriamalala RJ, Serpantié G, Carrière SM, 2007. Influence des pratiques culturales et du milieu sur la diversité des jachères d'origine forestière (Haute-Terre, Madagascar). *Revue d'Ecologie (terre et Vie)* 62 : 65-84.
- Turner MG, 1987. Spatial simulation of landscape changes in Georgia : a comparison of 3 transition models. *Landscape Ecology* 1 : 29-36.