



---

## 1. Introduction

Le corridor forestier de Fianarantsoa (Centre Est de Madagascar) présente un enjeu national pour la politique de conservation des forêts et de la biodiversité. Des tentatives de caractériser la déforestation du corridor se sont heurtées à une série de difficultés : différences de légendes entre des cartes disponibles à différentes dates [7], possibilités très limitées spatialement d'évaluer un recul de la forêt dans une mosaïque forêt agriculture [1]. Nous cherchons à caractériser la déforestation par ses causes : population résidente et aménagement des bas-fonds en rizières conduisant au défrichement des versants. La progression de défrichement vers l'est serait liée à l'occupation des bas-fonds et l'aménagement de bas-fonds en rizières [1]. L'évolution démographique serait un moteur de la construction du paysage même si celui-ci résulte également du contexte socio-économique et culturel [2]. En vue d'une modélisation de l'extension des défrichements dans le corridor, nous relierons par hypothèse la dynamique de défrichement à la dynamique de conversion des bas-fonds en rizière. Une question se pose alors : au bout de combien de temps la saturation de bas-fonds sera-t-elle effective ? Raison a constaté, en étudiant les peuplements anciens de la région merina, une absence totale de coïncidence entre les forts peuplements et les forts pourcentages d'aménagement des bas-fonds [3]. Serpantié et al. analysent que du côté betsileo les bas-fonds forestiers les plus saturés en 1930 correspondent à des exploitations minières en forêt alors qu'en 2004 ils s'expliquent par la plus forte pression démographique à partir de l'arrière pays non forestier [8].

Nous construisons un modèle informatique d'automate cellulaire à l'échelle d'une commune, la plus petite unité de recensement. Ce modèle simule, sur un pas de temps annuel, le pourcentage de saturation des bas-fonds en rizières.

---

## 2. Méthodologie

### 2.1. Traitement des données par commune

Les recensements de 1933, 1956, 1975, 1993 et la projection en 2004 ont permis de calculer la population de 21 communes [5] [7].

On entendra par bas-fonds, les vallons au sens de Raunet, reconnaissables sur des photos aériennes au 1/50 000 et des cartes au 1/100 000 [6]. Les surfaces en bas-fond aménagées en rizières ont été évaluées à trois dates (1933, 1956, 2004) sur les anciennes cartes FTM OP53 au 1/100 000 de 1933 et 1956, les photos aériennes, et l'image satellite SPOT 5 10m 5/03/04, validée sur le terrain en 2005 et traitée sous MAPINFO [5].

Le *taux de rizières* est le rapport entre la surface des bas-fonds aménagés en rizière et la surface totale des bas-fonds. Il est égal à 1 lorsque le bas-fond est saturé. Dans les situations les plus éloignées du corridor, le taux de rizières était le plus élevé en 1933 (40 à 60%). En savane ce taux n'était que de 10 à 40%. En forêt, la population était très faible au début du siècle et l'émigration absente, d'où un taux d'aménagement inférieur à 10% [4].

## 2.2. Protocole de calibration et de validation

Dans la zone d'étude du corridor forestier de Fianarantsoa, 21 communes ont été repérées par le programme GEREM<sup>1</sup> dont 15 se trouvent à l'ouest (pays betsileo) et 6 à l'est (pays tanala). Nous choisissons des communes incluses intégralement dans la zone d'étude, hors aire protégée, dont les bas-fonds ne sont pas encore saturés en 2004 et qui disposent de données sur la population et les surfaces aménagée et aménageable à trois dates, 1933, 1956, 2004, d'où deux périodes de simulation : 1933-1956 et 1956-2004.

Parmi ces communes, nous choisissons Androy qui est la moins peuplée, pour ajuster les valeurs des paramètres simulés aux paramètres réels. Nous initialisons les paramètres (tableau 1) avec les valeurs de 1933 dans Androy pour prédire les résultats de 1956, puis en 1956 pour prédire ceux de 2004. Nous estimons les valeurs de chaque paramètre conditionnellement aux autres paramètres. Les paramètres qui induisent des écarts sur les résultats de chaque simulation seront classés paramètres modifiables et les autres seront fixés. On diminue ainsi le nombre des simulations à effectuer pour l'étude du comportement du système.

Dans la commune d'Androy, à chaque simulation nous obtenons une série de couples de valeurs de résultats simulés (taux de rizières et densité de population) qui seront ensuite comparées aux valeurs réelles. Le couple de valeurs donnant le plus petit écart correspondra à la meilleure combinaison de chaque période. La saturation des bas-fonds de certaines communes commence déjà avant 2004, qui est l'année finale de notre période de référence (1956-2004). Par conséquent, nous choisissons les valeurs calibrées de cette période pour valider le modèle et l'utiliser en prédiction à partir de 2004.

Ces valeurs des paramètres sont ensuite testées successivement et indépendamment avec les données des autres communes choisies (Alakamisy Fandradava, Mahasoabe). Le modèle est validé si les valeurs des sorties (taux de rizières et densité de population simulés), sont très proches des résultats observés.

---

<sup>1</sup> GEREM (Gestion des espaces ruraux et environnement à Madagascar) sous convention Institut de Recherche pour le Développement - Centre National de Recherche en Environnement.

### 2.3. Choix des paramètres

Dans le modèle d'automate cellulaire, une commune est représentée à l'aide de cellules de même dimension. Au début d'une simulation, nous activons une cellule. Quand elle est saturée, nous en choisissons une autre parmi les cellules voisines. Ces opérations s'arrêtent lorsqu'il n'y plus de cellule libre dans la commune considérée.

Tableau 1. Echelles, variables et paramètres du modèle informatique

Rizière = bas-fond aménagé.
<b>Espace</b>
Echelle : commune, unité de mesure : 1 km <sup>2</sup> .
Etendue d'une cellule : 2km x 2km=4 km <sup>2</sup> , la taille du plus petit terroir observable. On considère une seule unité de bas-fond par cellule.
<b>Temps</b>
Pas de temps : 1 année, période de simulation : 1933-1956 (23 ans), 1956-2004 (46 ans)
<b>Variables par cellule</b>
$p_{\text{final}}$ : population à la fin d'une simulation (hab.),
$r_{\text{final}}$ : surface en rizière à la fin d'une simulation (are).
<b>Paramètres par cellule</b>
$p_{\text{init}}$ : population initiale (hab.), $r_{\text{init}}$ : surface initiale en rizière (are),
$s$ : surface de bas-fond aménageable en rizière par an (are),
$a$ : taux annuel de croissance démographique (%),
$\alpha$ : surface en rizière par hab. nécessaire en un an pour assurer la couverture alimentaire d'un habitant (are/hab.),
$\beta$ : surface de bas-fond qu'un habitant peut aménager en rizière en un an (are/hab.),
$d_{\text{max}}$ : distance maximum de recherche de nouveaux bas-fonds mesurée par le centre de gravité des cellules (km),
$ch_{\text{max}}$ : charge limite en bas-fond. Le dépassement de ce % limite d'aménagement déclenche la recherche d'un autre bas-fond.

### 2.4. Outils de construction du modèle

Le modèle a été écrit à l'aide du programme JAVA, sous *eclipse SDK-4.1 – win32*. Les données de la commune étudiée sont réparties dans les cellules qui la constituent à l'aide de MAPINFO. Ces données ont été structurées dans un système de gestion de base de données ACCESS, lues sous JAVA à l'aide d'un ODBC. La table ACCESS obtenue à partir d'une feuille EXCEL résulte d'une copie de table MAPINFO ayant par cellule : numéro de cellule, superficie de commune, densité de population, population, superficie de rizière (1933, 1956, 2004), bas-fond aménageable (2004), surface totale aménageable.

---

### 3. Résultats

#### 3.1. Algorithmes

Nous proposons un modèle simplifié sur la dynamique de l'aménagement des bas-fonds en rizières par une population. Compte tenu des définitions de variables (tableau 1) nous écrivons les équations suivantes :

La population  $p$  croît constamment selon un taux annuel d'accroissement  $a$ .

$$p_{\text{final}} = a * p_{\text{init}} \quad (1)$$

Chaque individu consomme annuellement une certaine quantité de riz supposée la même pour tous, produite sur une surface  $\alpha$  (are) de rizière à rendement constant  $\rho$  (kg/are). La consommation globale  $B$  (are) de riz à chaque pas de temps peut s'exprimer en surface :

$$B = \alpha * p_{\text{init}} \quad (2)$$

La production globale  $X$  (kg) du riz est le produit de la surface par le rendement :

$$X = \rho * r_{\text{init}} \quad (3)$$

La surface restante de bas-fond aménageable  $re$  (are) se calcule ainsi :

$$re = s - r_{\text{final}} \quad (4)$$

L'excédent de la population en bas-fonds par cellule  $ep$  est défini par :

$$ep = p_{\text{final}} - (r_{\text{final}}/\alpha) \quad (5)$$

La surface  $u$  est la surface (are) que l'on va décider d'aménager en un an par cellule :

$$u = \text{minimum} (\beta * ep, re), u \geq 0 \quad (6)$$

La variation de la surface aménagée en rizières  $\Delta r$  (are) en une année est :

$$r_{\text{final}} = u + r_{\text{init}}, \quad (7)$$

La population maximum  $p_{\text{max}}$  (hab.) qu'un bas-fond peut nourrir est :

$$p_{\text{max}} = r_{\text{final}}/\alpha. \quad (8)$$

si  $ch_{\text{max}} \leq (p_{\text{final}}/p_{\text{max}})$  alors la population recherche une nouvelle cellule. (9)

$$tr = r_{\text{final}}/s \quad (10)$$

où  $tr$  : taux de rizières par cellule.

#### 3.2. Exploration des paramètres

Nous explorons les valeurs des paramètres du tableau 1 grâce aux données disponibles.

- Le paramètre *distance maximum de recherche de nouveaux bas-fonds mesurée par la distance entre le centre de gravité des cellules* est fixé car il n'a pas d'effet ni sur le *taux de rizières* ni sur la *population*. Le paramètre *surface en rizière nécessaire par habitant pour assurer sa couverture alimentaire* n'a pas d'effet sur le *taux de rizières* car il est lié à la couverture des besoins alimentaires. Le paramètre *charge limite initiale en bas-fond* n'a pas d'effet non plus. Il indique le pourcentage d'aménagement limite pour décider de chercher un autre bas-fond.

- La variation du paramètre *surface de bas-fond qu'un habitant peut aménager en rizière en un an* modifie l'évolution du *taux de rizières*. Les paramètres variables sont donc : *taux annuel de croissance démographique* et *surface de bas-fond qu'un habitant peut aménager en rizière en un an*.

### 3.3. Calage des paramètres

Pour ajuster les valeurs des paramètres (*surface de bas-fond qu'un habitant peut aménager en rizière en un an*, *taux annuel de croissance démographique*), nous faisons varier l'un puis l'autre, les autres paramètres étant fixés (*distance maximum de recherche de nouveaux bas-fonds mesurée par la distance entre le centre de gravité des cellules*, *surface en rizière nécessaire par habitant pour assurer sa couverture alimentaire et charge limite en bas-fond*) (tableau 2).

Tableau 2 : Ajustement des paramètres en 2004 (commune d'Androy)

Taux annuel de croissance démographique	Valeurs simulées				Valeurs réelles	Libellé des résultats par commune
	Surface de bas-fond qu'un hab. peut aménager en un an					
	8 ares	9 ares	10 ares	11 ares		
1,5 %	72,33	74,08	75,73	77,27	77,08	taux rizière
	66,51	66,51	66,51	66,51	81,61	densité de population
2 %	74,42	76,28	78,01	79,61	77,08	taux rizière
	84,21	84,21	84,21	84,21	81,61	densité de population
2,5 %	76,7	78,65	80,43	82,07	77,08	taux rizière
	106,48	106,48	106,48	106,48	81,61	densité de population
3 %	79,13	81,14	82,96	84,6	77,08	taux rizière
	134,5	134,5	134,5	134,5	81,61	densité de population

Pour choisir la meilleure combinaison il suffit de trouver le couple de valeurs qui donne la plus faible distance. Ce résultat a été obtenu en additionnant le carré de chaque membre du couple de valeurs calculé par la formule :  $(\text{simulé} - \text{réel})/\text{réel}$ . La meilleure calibration est atteinte pour : *taux annuel de croissance démographique (2%)*, *surface de bas-fond qu'un habitant peut aménager en rizière en un an (9 ares)*.

### 3.4. Interface graphique

Une interface graphique d'Androy montre les résultats du modèle, le taux de rizières et la population après un certain nombre d'années. L'intensité du gris varie de sombre (non saturé) à clair (saturé).

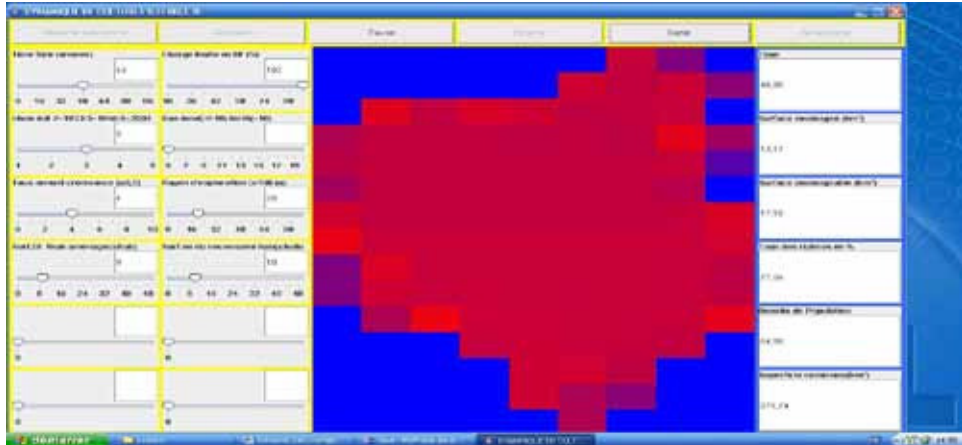


Figure 1 : Simulation en 2004 de l'aménagement des bas-fonds (Androy).

### 3.5. Année de saturation effective de bas-fonds

La densité de population, l'année de saturation des bas-fonds, est donnée en figure 2 : (1) Alakamisy Fandradava (2008), (2) Mahasoabe (2028), (3) Androy (2078). Il existe une relation entre la densité de population initiale et l'année de saturation des bas-fonds.

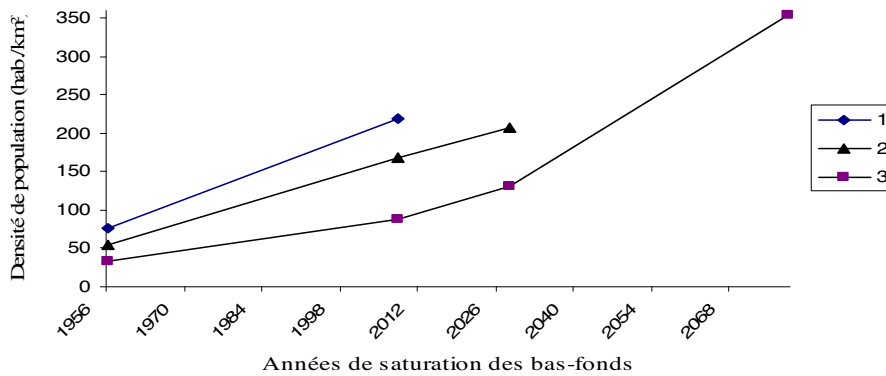


Figure 2 : Année de saturation des bas-fonds en fonction de la densité de population en 1956.

## 4. Discussion et conclusion

Le surplus de population d'une cellule saturée est ajouté à la population initiale de la nouvelle cellule choisie, ce qui rend plus réaliste l'accroissement démographique retenu.

Sur les 21 communes recensées, 1 se trouve dans une aire protégée, 5 sont déjà saturées en 2004, 29% ont moins de 25 hab./km<sup>2</sup> en 1956, 19% entre 25 et 50, 37, 33% entre 50 et 75, 19% ont plus de 75 hab./km<sup>2</sup>. Les 3 communes choisies sont donc bien réparties dans l'échantillon. Les valeurs des paramètres calibrés de la commune d'Androy (2% : *taux annuel de croissance démographique*, 9 ares : *surface de bas-fonds qu'un habitant peut aménager en un an*) ont été validées dans les 2 autres communes choisies. L'hypothèse bas-fond a donc été validée dans ces communes, aboutissant à des dates de saturation très étalées (2008, 2028, 2078), qui sont dans le même ordre que la densité de population de 1956 prise comme référence. L'ordre de grandeur des dates de saturation indique la nécessité de différencier les communes et de définir de nouvelles règles d'interdiction de défriche après la saturation des bas-fonds.

Le modèle permet de suivre la dynamique de l'aménagement des bas-fonds à partir d'hypothèses exprimées dans les règles de transition et de prédire l'évolution du système.

## Bibliographie

- [1] Blanc-Pamard C., Ralaivita M., 2004. *Ambendrana, un territoire d'entre deux. Conversion et conservation de la forêt (Corridor betsileo, Madagascar)*. Rapport GEREM-IRD-CNRE-CNRS-EHESS-CEAF-UR100, 86 p.
- [2] 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, CIRAD.
- [3] Raison J. P., 1984. *Les hautes terres de Madagascar et leurs confins occidentaux*. Paris, Karthala, 2 tomes.
- [4] Rakotoasimbahoaka C., Serpantié G., Hervé D., 2007. *Un automate cellulaire pour modéliser l'aménagement des bas-fonds en fonction du peuplement*. Transitions agraires, dynamiques écologiques et conservation. Actes du Séminaire GEREM Antananarivo, 9-10 novembre 2006, pp. 69-77, IRD-CITE.
- [5] Ramanandraibe L. H., Ratovo A. M., 2004. *Cartographie de l'évolution des limites forestières et des bas-fonds aménagés au cours du XXème siècle. Cas de la région du corridor forestier de Fianarantsoa*. Stage Maîtrise, Programme GEREM - Fianarantsoa, CNRE/ IRD, Département de géographie, Université d'Antananarivo, 55 p.
- [6] Raunet M., 1993. *Structure et fonctionnement d'un bas-fond rizicultivé sur les hautes terres de Madagascar*. Bas-fonds et riziculture. Actes du séminaire d'Antananarivo, 9-14 décembre 1991, CIRAD, pp. 99-125.
- [7] Serpantié G., Toillier A., Carrière S., Razanaka S., 2007. *Déforestation à Fianarantsoa au 20<sup>ème</sup> siècle : un corridor en sursis*. Transitions agraires, dynamiques écologiques et conservation. Actes du Séminaire GEREM Antananarivo 9-10 novembre 2006, pp. 47-56, IRD-CITE.
- [8] Serpantié G., Toillier A., 2007. *Dynamiques rurales betsileo à l'origine de la déforestation actuelle*. Transitions agraires, dynamiques écologiques et conservation. Actes du Séminaire GEREM Antananarivo 9-10 novembre 2006, pp. 57-68, IRD-CITE.