

Chapitre 6

Un automate cellulaire pour modéliser l'aménagement des bas-fonds en fonction du peuplement

Rakotoasimbahoaka C.R., Serpantié G., Toillier A., Treuil J.P., Ramamonjisoa A.B.O. & Hervé D.

Résumé : Le couloir RA représente un enjeu national pour la politique de conservation des forêts naturelles et de la biodiversité à Madagascar. L'objectif de ce travail est de relier dans le nord du corridor de Fianarantsoa, l'accroissement du peuplement avec la dynamique de l'aménagement des bas-fonds. Les défrichements constituent une cause importante de déforestation. La progression récente des défrichements serait liée à l'occupation des bas-fonds selon Blanc-Pamard & Ralaivita (2004), confirmé par une analyse cartographique des dynamiques (Serpantié *et al.*, chap. 5). Locatelli (2000) observe que l'évolution démographique est un moteur de la construction du paysage et celle-ci est orientée par le contexte. Il a étudié la relation entre le peuplement et le paysage au niveau des terroirs et des parcelles, tandis que nous étudions les relations entre l'accroissement de la population et la dynamique d'aménagements des bas-fonds à l'échelle de portions identiques d'espace, les cellules, à une échelle régionale, celle du corridor forestier de Fianarantsoa. En vue d'une modélisation de l'extension des défrichements dans le corridor, nous partons de l'hypothèse suivante : la dynamique de défrichement est liée à une dynamique spatiale de conversion des bas-fonds en rizière. Un premier traitement des données par commune de population (1933, 1956, 1993, 2004) et de surface aménagée en bas-fonds rizicoles (1933, 1956, 2004), permet de préciser les processus de base de cette hypothèse bas-fond. Une tendance se dégage vers la saturation " relative " des bas-fonds. Pour approcher la date à laquelle ces bas-fonds seront saturés, nous construisons un modèle d'automate cellulaire à l'échelle du corridor, en utilisant des données par cellule. C'est un modèle prédictif, visant depuis 1933, à prédire 1956 et ainsi de suite. On tente ainsi d'approcher le moment où la totalité des bas-fonds aménageables serait aménagée.

Mots clé : modélisation, déforestation, peuplements, aménagements, bas-fonds, rizières

Introduction

Le couloir RA (Centre Est de Madagascar) représente un enjeu national pour la politique de conservation des forêts et de la biodiversité (Hervé & Treuil, 2005). Les tentatives de caractériser la déforestation du corridor forestier de Fianarantsoa se sont heurtées à une série de difficultés : des différences de légendes entre des cartes disponibles à différentes dates (chap. 4), les possibilités très limitées spatialement d'évaluer un recul de la forêt dans une mosaïque forêt-agriculture (Blanc-Pamard & Ralaivita, 2004). Nous cherchons pour notre part à caractériser la déforestation indirectement par ses déterminants : population résidente et défrichements.

Les défrichements constituent une cause importante de déforestation. Les Bestileo à l'Ouest du corridor étant avant tous des riziculteurs, la progression des défrichements serait liée à l'occupation des bas-fonds et l'aménagement en rizières (Blanc-Pamard & Ralaivita, 2004), ce qui est confirmé par une analyse d'images SPOT (Serpantié *et al.*, 2006). Locatelli (2000) observe que l'évolution démographique est un moteur de la construction du paysage mais que le paysage résulte également du contexte socio-économique et culturel. Nous étudions ces relations à l'échelle de portions identiques d'espace, les cellules, dans des communes d'une fenêtre de 2852 km au nord du corridor forestier de Fianarantsoa et au sud du Parc de Ranomafana (zone FTM OP53).

En vue d'une modélisation de l'extension des défrichements dans le corridor, nous faisons trois hypothèses : (1) ces défrichements sont liés à l'exploitation des rizières par l'éclaircissement des

versants, (2) la recherche de bas-fonds à aménager oriente la répartition du peuplement, (3) il existe un lien entre l'accroissement démographique et la dynamique d'aménagement des bas-fonds en rizières. Et une question se pose alors : au bout de combien de temps la saturation des bas-fonds serait-elle effective ? En effet, une fois les bas-fonds saturés, le moteur de la déforestation serait à rechercher dans d'autres causes et sa dynamique devrait être réévaluée.

Nous abordons cette question sur un plan bibliographique puis analysons des données communales. Ces résultats orientent la construction d'un modèle d'automate cellulaire à l'échelle d'une commune. Nous cherchons enfin, en utilisant ce modèle prédictif sur un pas de temps annuel, à approcher le moment de saturation des bas-fonds dans une commune.

Analyse bibliographique sur l'aménagement des bas-fonds

Nous adoptons la définition du bas-fond donnée par Raunet (1993) : " En région inter tropicale, un bas-fond est un vallon, une petite vallée à fond plat ou une gouttière peu encaissée de 20 m à 500 m de large sans cours d'eau important ou pérenne ". Sur les hauts plateaux malgaches, Chabaud (1993) interprète que la disparition de la forêt et l'appauvrissement rapide des sols ont contraint la population à aménager les bas-fonds dont l'occupation est aujourd'hui totale. Il semble que dans la moitié du 19^{ème} siècle, un équilibre ait existé entre les rizières de bas-fonds et les cultures pluviales de pente. Raison (1984) a constaté, en étudiant les peuplements anciens de ces régions, une absence totale de coïncidence entre les forts peuplements et les forts pourcentages d'aménagement des bas-fonds. Compte tenu de la pression démographique, les bas-fonds ont été aménagés et remodelés par une population résidente ou migrante pour permettre l'extension maximale des rizières et une culture de riz plus ou moins intensive. La répartition des parcelles traduit souvent la structure sociologique du groupe, dont les membres importants ont leurs terres en amont. Cependant l'aménagement des bas-fonds les plus étendus n'a pu se faire que par l'intervention de l'Etat. Ravohitrarivo (1993) montre le rôle capital des bas-fonds pour la production du riz sur les hautes terres malgaches ; les rizières de bas-fonds ont une importance économique non négligeable, représentant 70% des rizières des hauts plateaux et 47% de la superficie totale des rizières à Madagascar. Teyssier *et al.* (1993) illustrent la diversité d'aménagement des bas-fonds, depuis la forêt galerie, le reliquat forestier le moins dégradé, jusqu'aux bas-fonds rizicoles dans les bassins versants de l'ouest de l'Alaotra. Les bas-fonds de première mise en valeur correspondent aux conquêtes les plus récentes des paysans sur la forêt. Ces bas-fonds, une fois aménagés, sont consacrés à la riziculture irriguée. La recherche d'un plus grand espace pour l'implantation de villages de migrants et les besoins en terres neuves des pionniers génèrent une déforestation accélérée.

Serpantié *et al.* (2005) ont trouvé que, du côté betsileo, les bas-fonds forestiers les plus saturés sont ceux qui ont subi la plus forte pression démographique à partir de l'arrière pays non forestier. Il existe des noyaux de peuplement dans la région du corridor à l'origine des villages actuels, qui ont des causes historiques différentes d'une recherche de bas-fonds : villages anciens de forgerons, exploitation d'or et de graphite à l'Est d'Iambara dans la commune d'Androy, chantiers d'exploitation du bois et de construction de la ligne de chemin de fer à partir de 1930. Cette population s'est ensuite stabilisée en aménageant des bas-fonds en rizières, à proximité de leurs lieux de résidence. Serpantié *et al.* (chap 5) montrent les rapports entre l'évolution de la population des communes riveraines, la dynamique régionale d'aménagement des bas-fonds en rizières, et l'évolution du couvert boisé. Ils observent que la progression de la déforestation, en lisière et au centre du corridor, a un rapport étroit avec l'aménagement des bas-fonds de la bande ouest du corridor par les gens des lisières. Cet aménagement en forêt répondrait en général à la saturation des bas-fonds en savane, suivie d'une intensification jusqu'au seuil de 10 ares/habitant, et parfois à des inégalités d'accès à la terre (Cas d'Androy). Les gens des lisières constituent dès lors un nouveau peuplement forestier essentiellement pour la recherche de terre.

Traitement des données

Obtention des données de surface et de population

On entendra par bas-fonds, les vallons au sens de Raunet (1993), reconnaissables sur des photos aériennes au 1/50 000 et des cartes au 1/100 000. Notons que le riz dans la région n'est pas seulement cultivé en bas-fonds mais aussi le long de thalwegs plus étroits, et dans une moindre mesure en terrasses en zone montagneuse. Néanmoins à l'échelle régionale, les surfaces correspondantes sur OP53 sont faibles en comparaison des bas-fonds et ces aménagements ne sont pas cartographiés. 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 les images satellites (SPOT 5/03/04 : 10 m) validées sur le terrain en 2005, et traitées à l'aide de MAPINFO (Ramanandraibe & Ratovo, 2004 ; Serpantié *et al.*, 2006).

Les données de population provenant des recensements ont permis de calculer, à partir des cartes des unités administratives de référence pour chaque date, et en ramenant les données à des unités spatiales identiques correspondant aux communes 1962, les densités de population par commune ainsi qu'un indicateur de pression de population sur les surfaces de bas-fonds (habitants/ha de bas-fond). Pour les communes dont le territoire se répartit entre forêt et savane, la densité de population de savane est corrigée en fonction d'hypothèses sur la population forestière beaucoup moins nombreuse et une représentation de la répartition de la population déduite de la localisation des hameaux sur les cartes au 1/100 000 de 1933 et 1956 (Rafanomezatiana & Ratsimbazafy, 2004 ; Serpantié *et al.*, 2006). Les données de population en forêt n'apparaissent pas fiables car la population, qui est très faible (< 10 hab/km²), est répartie selon des noyaux de peuplement non tous repérés.

Traitement des données par commune

Dans la zone d'étude, 21 communes sont recensées de part et d'autre du corridor ; nous classons les 18 communes dont les limites entrent quasi entièrement dans la fenêtre considérée (OP53), selon les critères suivants (Figure 16) :

- pays (betsileo à l'Ouest, tanala à l'Est) ; distance à la ville de Fianarantsoa, capitale provinciale (réduite pour le " périurbain ", le reste étant qualifié de " rural "),
- éloignement du corridor (loin du corridor : " non riverain ", proche du corridor c'est-à-dire dont le territoire déborde sur le corridor : " riverain "),
- position par rapport à la forêt : savane (" savane betsileo ", " savoka tanala "), forêt (" forêt betsileo ", " forêt tanala ").

L'évolution du taux de rizières entre 1933, 1956 et 2004 est représentée Figure 17. Le taux des rizières est défini comme le rapport entre la surface aménagée en rizière et la surface totale des bas-fonds. Il est égal à 1 lorsque le bas-fond est " saturé ". Pour chaque date et par commune est indiqué le niveau de pression de population sur les bas-fonds, ou de rareté relative des bas-fonds (habitants/ha de bas-fonds).



Figure 16. Limite des communes dans la zone d'étude. Les points indiquent les principaux villages, la ligne indique la falaise séparant les pays tanala à l'Est et betsileo à l'Ouest.

Le taux d'aménagement est le plus élevé là où la pression sur les bas-fonds est la plus forte. De même, lorsque la pression sur les bas-fonds est la plus faible, ceux-ci sont moins aménagés. C'est dans les situations les plus éloignées du vouloir RA (périurbain, ou rural en zone ouest) que le taux de rizières est le plus élevé en 1933 (40 à 60%). En savane près du corridor, ce taux n'était que de 10 à 40%, et de 0 à 10% en forêt. En forêt, la population était très faible au début du siècle et l'émigration absente, d'où un taux d'aménagement quasi nul (Figure 17d, Figure 17f). Par contre dans les forêts mitoyennes de savanes aux rizières saturées, on a parfois atteint très rapidement la saturation des bas-fonds. Cette saturation intervient généralement à partir de 8 habitants par ha de bas-fond. Cependant à Androy, même lorsque ce seuil est atteint, la savane n'est pas saturée (Figure 17c) -des bas-fonds sont retenus, non aménagés, par leurs propriétaires- et des paysans de savane occupent des bas-fonds de forêt. A Ranomafana, de grands bas-fonds restent difficiles à aménager en bordure du Parc si bien que la saturation n'est pas atteinte en 2004 (Figure 17f).

On constate des évolutions parallèles côté betsileo et côté tanala en reconnaissant trois tendances du taux de rizières : une croissance presque régulière dans les communes rurales riveraines à asymptotique dans les communes non riveraines, et proche d'une courbe logistique en forêt. Le taux de rizières ne croît en forêt que depuis 1956 du fait de l'arrivée des migrants puisque la densité de la population reste localement très faible.

Une tendance se dessine vers la " saturation " relative des bas-fonds dans les communes non riveraines ou riveraines alors que la densité de la population augmente régulièrement. Au cours du 20^{ème} siècle, la population augmentant avec un taux de croissance de 1 à 3%, on est passé d'un aménagement des bas-fonds d'accès facile à l'aménagement des bas-fonds relictuels qui nécessitent de plus fortes pressions de population. En pays tanala, d'autres cartes montrent des bas-fonds déjà fortement aménagés en 1940 malgré de faibles densités de populations. Des erreurs cartographiques ont été constatés sur la carte P53 a propos d'autres thèmes (Serpantié *et al.*, chap. 4). La surface en rizières est manifestement surévaluée (selon les observations menées à Kelilalina, Ranomafana, Tolongoina) et la

population sans doute sous-estimée (zones enclavées, migrants betsileo installés à Ranomafana). Ces résultats demanderaient à être confirmés en disposant de plus de trois points afin de vérifier la forme des courbes (exponentielle, asymptotique, logistique) et de les prolonger au-delà de 2004. On peut aussi tenter de remédier à ce déficit de données par la simulation.

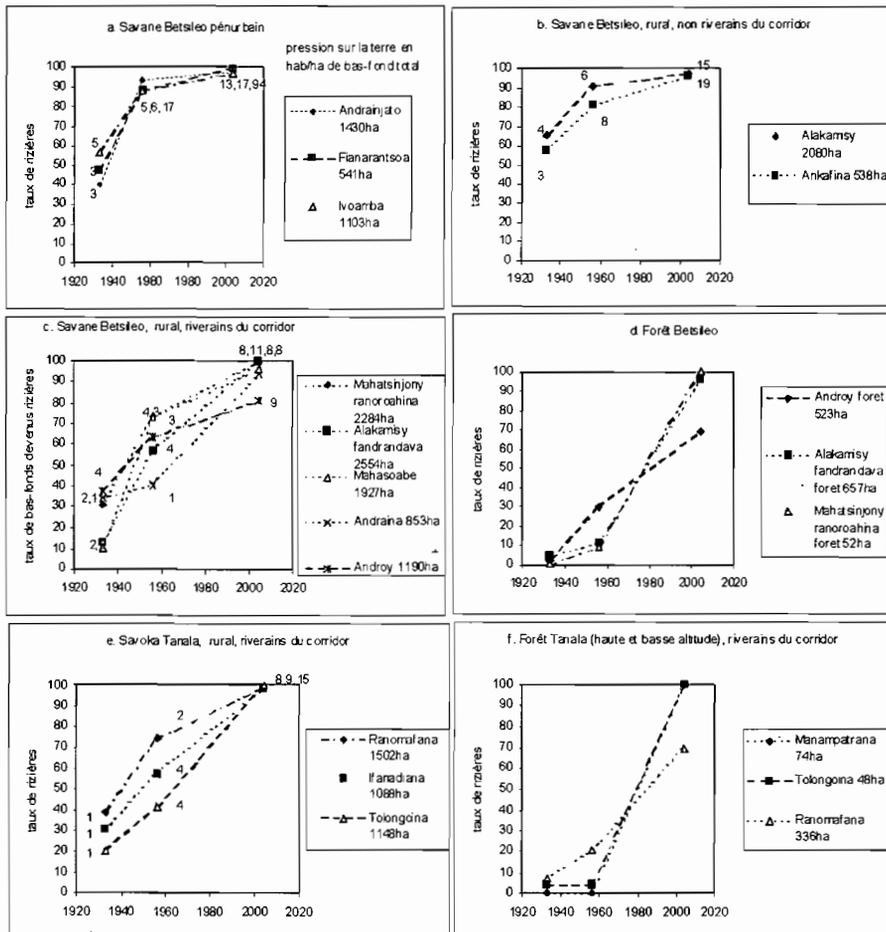


Figure 17. Dynamique d'aménagement des bas-fonds en rizières par type de commune

Description du modèle d'automate cellulaire

Choix d'un modèle d'automate cellulaire

Pour prévoir au bout de combien de temps la saturation des bas-fonds serait effective et où elle le sera en premier, nous cherchons à construire un mécanisme permettant de représenter les dynamiques localisées que nous venons de décrire. Un modèle d'automate cellulaire est choisi pour représenter chaque commune à l'aide de cellules de même surface. Les données par commune sont transformées en données dans chaque cellule, en utilisant la fonction Gridmaker de MAPINFO. Des simplifications sont adoptées pour modéliser la dynamique de cet automate :

- La population s'alimente toute l'année à base de riz irrigué, l'ensemble de la production étant autoconsommée. On néglige dans un premier temps le riz de tavy et d'autres ressources alimentaires cultivées sur pente comme le maïs et le manioc ;

- Chaque cellule a les mêmes composants : la population résidente, la surface de bas-fonds aménagée en rizière et la surface de bas-fonds aménageable. Si dans une cellule, il n'existe pas de bas-fond, la cellule est considérée comme étant aménagée à moins de 1% ;
- Pour représenter le mécanisme d'occupation des bas-fonds, nous considérons que chaque fois qu'il y a une population " excédentaire " dans un bas-fond (supérieure à une capacité de charge limite), cette population accède à un autre bas-fond choisi aléatoirement sur une liste des bas-fonds " possibles " dans la même commune.

Caractéristiques de l'automate cellulaire

Une cellule est une portion de l'espace sur laquelle vont être suivies les variables qui caractérisent les états du système ; plusieurs paramètres sont vérifiés en fonction des valeurs de ces variables (Encadré 1). Chaque cellule est un automate qui change de valeur en fonction des variables suivantes : population, nombre de départs et surface de bas-fonds aménagée en rizières. On choisit la surface d'une cellule dans ce corridor à 4 km² (2km x 2km), comme celle du plus petit terroir villageois observable. L'état de chaque cellule est différent suivant le pourcentage des bas-fonds convertis en rizières : état1 initial (<1%), état2 (1-25%), état3 (25-50%), état4 (50-75%), état5 (75-100%), état final 6 (100%). Nous distinguons trois types de bas-fond : " non aménagé " (étatX, X=1) ; " saturé " est une cellule dont l'aménagement des bas-fonds a atteint le potentiel (étatX, X=6) ; " occupé " est une cellule dont l'état varie entre 2 et 5 (étatX, 2≤X≤5).

Encadré 1

Espace et temps

- Fenêtre au Nord du corridor : 285 200 ha ;
- Cellule de 4 km² (2 km x 2 km), dans laquelle on ne considère qu'un seul bas-fond ;
- Résolutions : unité linéaire 100 m, unité de surface 1 ha, unité de temps 1 année, évolution sur des dizaines d'années.

Variables par cellule

Population P, nombre de départs N et surface de bas-fond aménagé en rizières R.

Paramètres

Paramètres démographiques :

- Taux annuel de croissance démographique (pourcentage) ;
- Rayon du voisinage (par unité de 1000 m).

Paramètres de subsistance :

- Norme de surface en rizière par habitant pour assurer la couverture alimentaire (ares/hab.) ;
- Surface aménageable en bas-fond, par an, selon le travail mobilisé (ares) ;
- Taux de charge limite en bas-fond (pourcentage).

Dynamique

Les variables suivies à chaque pas de temps sont :

R_i (t) : la surface de bas-fond aménagée en rizière de la cellule i au temps t,

P_i (t) : la population de la cellule i au temps t,

N_i (t) : le nombre de départs de la population de la cellule i vers la cellule i+1 au temps t.

- Le déplacement d'une population d'une cellule vers une autre cellule ne peut se faire qu'à partir d'une cellule qui a été totalement aménagée (état 6 antérieur) vers une cellule dont le bas-fond n'est pas encore saturé ;
- La population arrive dans une nouvelle cellule, s'ajoute à la population résidente, et l'ensemble croît selon un certain pourcentage. Cette population réalise des aménagements jusqu'à ce que

l'état de la cellule soit proche de la saturation du bas-fond. Puis cette saturation étant atteinte, l'excédent de population se déplace vers une autre cellule ;

- Pour changer son état, la cellule inspecte l'évolution de sa surface de bas-fond aménagée et, suivant son état, elle inspecte l'état des cellules voisines dans un rayon donné. Si sa distance à une cellule voisine " candidate " est inférieure ou égale à ce rayon, alors on ajoute la cellule candidate à la liste des cellules voisines. Avec un rayon de 2000 m de longueur, on obtient à chaque fois 4 cellules voisines (voisinage de Von Neumann) ; avec un rayon de 3000 m, on obtient 8 cellules voisines (voisinage de Moore) ;
- Si cette liste des cellules voisines contient plus d'une cellule, on choisira la cellule candidate par tirage aléatoire à défaut d'un autre critère.

Implémentation informatique

Simulation

Le modèle d'automate cellulaire suit les processus d'aménagement et de diffusion du peuplement. Les valeurs de ses paramètres les plus sensibles seront calibrées en l'utilisant comme modèle prédictif : à partir des valeurs initiales de la population et du taux de rizières de chaque cellule en 1933, seront prédits les états des rizières, le nombre de départs et la population en 1956 puis en 2004.

Ce modèle a été écrit avec un langage de programmation orienté objet appelé JAVA sous un éditeur " eclipse - SDK - 3.2 - win32 " ; les résultats de l'exécution du modèle sont affichés sur l'interface de simulation (Figure 18, cas de la commune d'Androy) :

- en haut, des boutons de service permettent de lancer une nouvelle simulation, exécuter, arrêter temporairement, reprendre la simulation ou en sortir ;
- à gauche, se trouvent les différents paramètres ; à droite, sont placés les indicateurs ;
- en bas de la fenêtre sont affichés des graphiques (histogrammes et bilans cumulés par variable des années de simulation) ; au centre sont simulées les différentes cellules.

Au début de la simulation présentée sur la Figure 18, on initialise les paramètres par défaut : nombre de pas de simulation = 23 ; taux annuel de croissance démographique = 0,5% ; rayon d'exploration = 2000 m ; norme de surface en rizière = 10 ares/hab. ; surface aménageable en bas-fonds par an = 14 ares ; charge limite en bas-fond = 50%.

Exploration des paramètres

On teste d'abord quels paramètres induisent par leur variation des effets sur les sorties, taux d'aménagement et population. Ceux qui induisent une variation très faible sont fixés : rayon d'exploration, charge limite en bas-fond, norme de surface en rizière par habitant. Les autres paramètres (taux annuel de croissance démographique, surface aménageable en bas-fond et par an) sont modifiés jusqu'à obtenir des résultats simulés proches des données réelles (Tableau VIII). Trois simulations sont réalisées, la première simulation consiste à prévoir 1956 à partir de 1933, la seconde à prévoir 2004 à partir de 1933, la troisième à prévoir 2004 à partir de 1956.

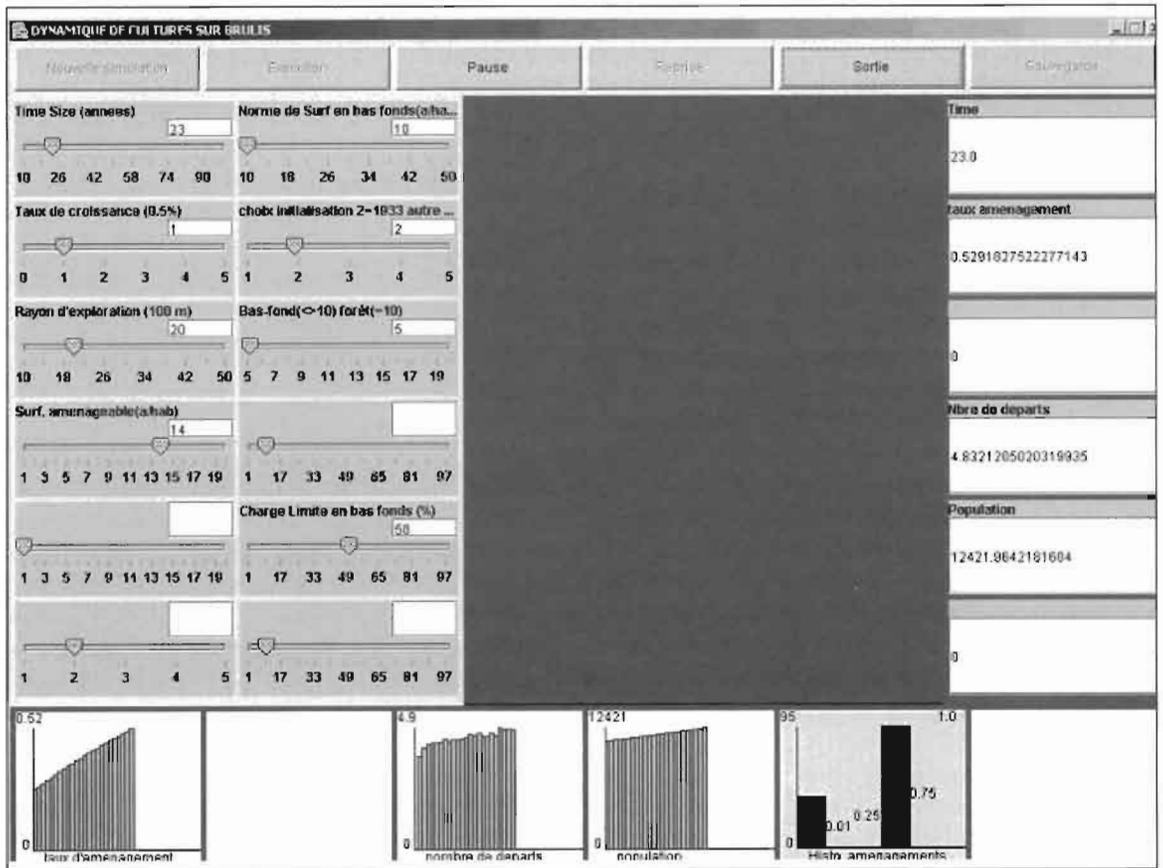


Figure 18. Résultat de la simulation sur une commune ; prédiction en 1956 à partir d'un état initial en 1933

Tableau VIII. Calibration des paramètres en ajustant données réelles et simulées.

Résultats	1933	1956	2004
Calibration n 1 (33-56) : Taux de croissance 0,5%, Surface aménageable 14 ares/hab.			
Taux de rizières (%) réelsimulé		26,5	53,152,9
Population réelsimulé		11080-	907312421
Calibration n 2 (33-2004) : Taux de croissance 1%, Surface aménageable 9 ares/hab.			
Taux de rizières (%) réelsimulé		26,5	53,145,7
Population réelsimulé		11080-	907313917
Calibration n 3 (56-2004) : Taux de croissance 2%, Surface aménageable 9 ares/hab.			
Taux de rizières (%) réelsimulé		26,5-	53,1
Population réelsimulé		11080-	9073

En trouvant des taux de rizières simulés très proches des valeurs réelles, tant en 1956 qu'en 2004, on ajuste les valeurs des paramètres : taux de croissance démographique et surface de bas-fond aménageable par an. Une surface aménageable de 14 ares/hab. donne un meilleur ajustement du taux de rizières en 1956 ; un taux de croissance démographique de 1% donne un meilleur ajustement de la population en 2004, mais un taux de 2% donne un ajustement du taux de rizière équivalent à celui

de la seconde calibration. On utilise le modèle calibré n°1 qui donne le meilleur ajustement du taux de rizière pour générer un taux de rizière annuel à partir de 2004. Il ne restait que 23% des bas-fonds aménageables en 2004 dans la commune d'Androy ; la totalité des bas fonds aménageables serait aménagée en 2025.

Discussion et conclusion

Deux paramètres restent à évaluer à l'issue de cette analyse : les limites du seuil de saturation trouvé et le domaine de validité de l'hypothèse bas-fond.

Les données qui ont été utilisées pour le traitement statistique puis dans la simulation sont des données obtenues sur les bas-fonds de plus de 1 km² pour une taille de H cellule de référence égale à 4 km². Les talwegs (bas-fonds de moins de 1 km², ou inférieurs à 20 m de large), n'ont pas été cartographiés. Donc, après saturation des bas-fonds tels qu'ils ont été définis ici, il restera des talwegs que les paysans s'empresseront d'aménager, même si leur accès, encaissement et petite taille rendent ce travail plus difficile. Il reste par ailleurs de grands bas-fonds non aménagés au nord du corridor qui ne pourraient l'être qu'avec un appui financier. La date de saturation trouvée n'est donc pas absolue, elle est relative et n'indique qu'une saturation prochaine.

Le domaine de validité de l'hypothèse bas-fond est-il limité à certaines zones du couloir et à certaines périodes ? L'hypothèse bas-fond s'applique-t-elle de la même manière en pays tanala qu'en pays betsileo ? Dans la région nord du couloir, dans le pays betsileo, la dynamique d'occupation de bas-fonds progresse d'Ouest en Est, d'abord en savane, puis en forêt. Les bas-fonds en forêt sont les derniers à être aménagés, toujours dans l'intention de défricher les versants. En pays tanala, l'abattis-brûlis est en soi une raison de déforestation, même indépendamment de l'aménagement des bas-fonds. Il faudrait vérifier si l'on peut calibrer le même modèle pour une commune tanala.

La calibration de ce modèle sur une commune a permis de générer un taux annuel d'aménagement des bas-fonds en rizières tout en testant des algorithmes sur l'aménagement des bas-fonds. Ce n'est qu'une première étape puisqu'il faut encore confirmer la valeur des paramètres à calibrer dans d'autres communes et préciser celle des paramètres fixés par défaut. Le même automate cellulaire peut être appliqué à l'ensemble des communes d'un domaine de validité à préciser (ensemble ou portion du couloir). Il est conçu pour absorber dans l'avenir des données sur la défriche du couvert forestier, afin de relier la dynamique de défrichement et la dynamique spatiale de conversion des bas-fonds en rizière avec la densité de la population. Le but final de cette recherche est d'aider au pilotage régional du couloir RA.