

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

- 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

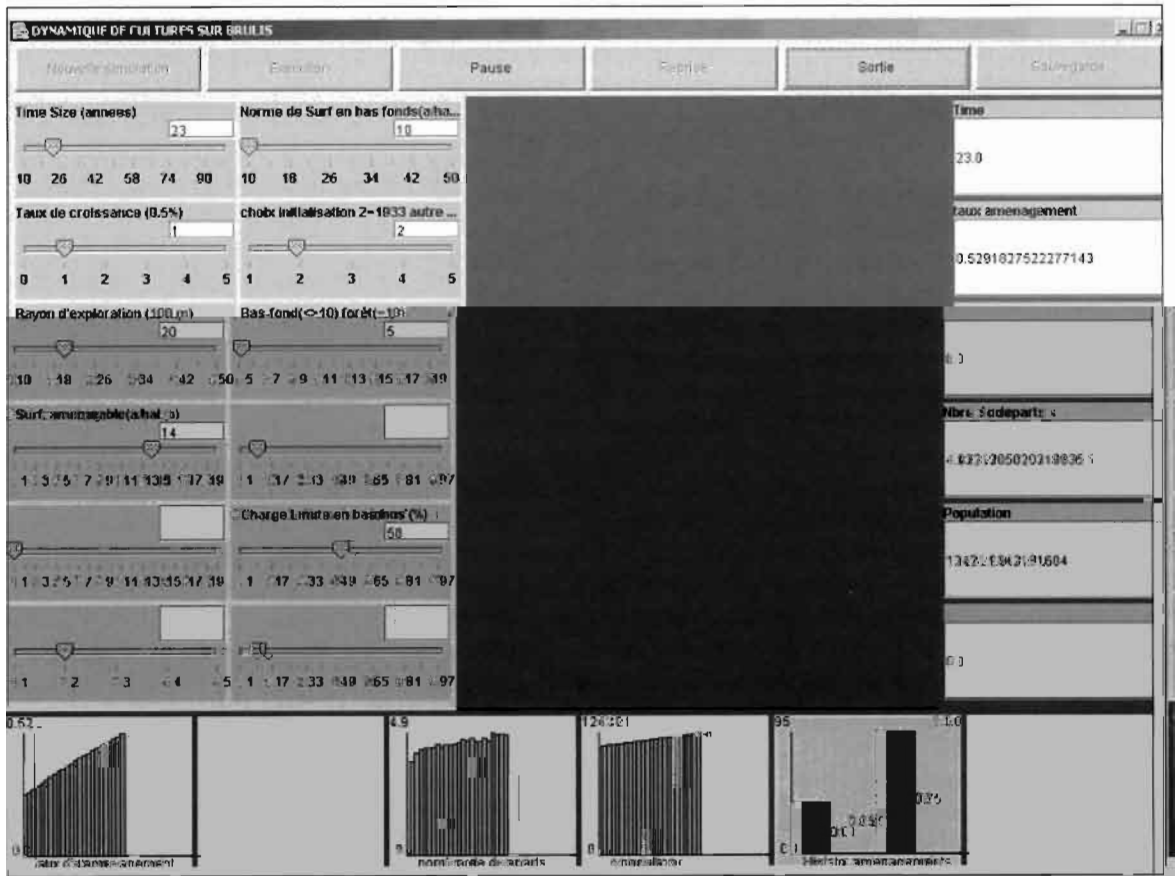


Figure 18. Résultat de la simulation sur une commune ; prédiction en 1956 à partir d'un état initial en 1933

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.