

Résilience et viabilité, deux concepts clés pour la conservation et le développement

Resilience and sustainability, two key concepts for conservation and development

S. RAZANAKA¹

D. HERVÉ²

S. RAKOTONDRAOMPIANA³

F. RAFAMANTANANTSOA⁴

(1) Centre National de Recherche sur l'Environnement (CNRE), BP 1739, Antananarivo 101, Madagascar

(2) Institut de Recherche pour le Développement (IRD, UMR 220 GRED), BP 64501, 34394 Montpellier, France

(3) Laboratoire de Géophysique de l'Environnement et Télédétection. Institut & Observatoire de Géophysique d'Antananarivo (IOGA), Université d'Antananarivo. Antananarivo (Madagascar)

(4) Ecole Nationale d'Informatique, Université de Fianarantsoa, BP 1484, Fianarantsoa 301, Madagascar

Résumé

Les forêts tropicales et plus particulièrement celle de Madagascar, continuent inexorablement à disparaître au fil des années. Pour cette dernière, la diminution est évaluée à 0,8% de la surface forestière, pour la période 1990-2000, et 4% pour 2000-2005.

Il est indéniable de constater que cette disparition des espaces forestiers reste, la plupart des temps, la base du développement économique local, sinon de la survie des populations riveraines de ces massifs forestiers. Les mesures de protection et de conservation des espaces forestiers définies dans la politique et la stratégie nationale, se heurtent de fait à des problèmes pratiques énormes, la circonspection, voire le refus des acteurs locaux d'intégrer volontairement le système de production proposé.

Deux concepts clés, la résilience d'une côté et la viabilité de l'autre, permettent de mieux comprendre cette contradiction entre les mesures proposées par l'Etat et les réactions des acteurs locaux, et de proposer une nouvelle démarche pour réconcilier l'homme avec la nature. D'une part, la résilience détermine le mécanisme de fonctionnement naturel des écosystèmes, plus précisément la capacité d'un écosystème, d'un habitat, d'une population ou d'une espèce à retrouver son fonctionnement et son développement normal après avoir subi une perturbation importante. D'autre part, la viabilité met en exergue le processus économique et politique de contrôle des trajectoires conjointes des

ressources naturelles et de la satisfaction des besoins de la population locale, entre autre, en respectant l'équité intergénérationnelle (éviter qu'une génération soit moins favorisée que la précédente).

Les résultats obtenus dans le cadre du Projet FPPSM à travers deux des zones d'étude, le corridor forestier Ranomafana-Andringitra et la forêt de Mikea, démontrent la pertinence de la considération simultanée des ces deux concepts dans la stratégie de conservation des espaces forestiers à Madagascar et du développement de la population locale.

Mots-clés : conservation, développement, écosystèmes, équité intergénérationnelle, perturbation, résilience, ressources naturelles, viabilité

Abstract

Tropical forests, particularly those of Madagascar, inexorably continued to disappear over the years. In Madagascar, this reduction is estimated at 0.8% of the forest area for the period 1990-2000, and 4% for the period 2000-2005.

It is undeniable clear that the disappearance of forest remains, for the most part, the basis of local economic development, otherwise the survival of local populations of these forests. The protection and conservation of forests, as defined in national policy and strategy, faces enormous practical problems, circumspection, even refusal of local actors to adopting the proposed production systems.

Two key concepts, resilience on one hand and sustainability on the other, allow to better understand this contradiction between the measures proposed by the state and the reactions of local actors, and propose a new approach to reconcile man with nature. On the one hand, resilience determines the mechanism of natural ecosystem functioning, specifically the ability of an ecosystem, habitat, population or species, to go on functioning and normally develop after undergoing a significant disruption. On the other hand, sustainability highlights the economic and political process of integrating the needs of the local population for natural resources, among others, respecting intergenerational equity (avoid future generation less favored than the previous one).

The results obtained in the FPPSM Project framework through two of the studied areas, Ranomafana-Andringitra rainforest and Mikea dry forest, demonstrate the relevance of the simultaneous consideration of these two concepts in the strategy of conservation of forests and development of the local population in Madagascar.

Keywords: conservation, development, ecosystem, intergenerational equity, disruption of ecosystem, resilience, natural resources, sustainability

Introduction

Rappelons tout d'abord le contexte, l'utilisation de chacun de ces deux concepts ayant trouvé son origine dans des programmes antérieurs au projet FPPSM, mais conduits également dans la région de Fianarantsoa, les programmes GEREM et MEM d'une part, le projet ANR DEDUCTION d'autre part.

L'un des postulats à l'origine du programme GEREM-Fianarantsoa était que la forêt ombrophile d'altitude était plus résiliente (Photo Z3 du Carnet central) que la forêt sèche du sud-ouest (Photo Z4 du Carnet central) dont il a été démontré qu'elle était très peu résiliente et avec une tendance à la savanisation. L'étude de la régénération a focalisé les chercheurs autant sinon plus que la mesure de la déforestation, à travers le rôle des espèces

pionnières ou celui de la banque de graines dans les successions post-culturelles. Le schéma de transition entre six états d'occupation du sol, élaboré au cours du programme MEM qui a suivi le GEREM, expliquait par ailleurs comment une régénération pouvait ou non avoir lieu depuis des états de Non forêt. La référence au concept de résilience était alors portée par des écologues.

Un des objectifs du projet DEDUCTION était de revisiter le concept de développement durable, par analogie avec le concept de résilience, en appliquant la théorie de la viabilité. Le passage de la résilience à la viabilité a été initié par l'étude de la restauration, dont il était possible d'évaluer un coût. L'intention était d'appliquer à Madagascar cette approche théorique, mais dans le domaine de l'agronomie et l'écologie, et sous deux contraintes, le maintien de la biodiversité et le développement durable.

L'idée, dans ce projet DEDUCTION, était de comparer deux modalités d'exploitation des écosystèmes forestiers, une « simple » et une « complexe » : (1) la sylviculture de peuplements homogènes de pins maritimes dans le sud-ouest de la France (INRA Bordeaux) et, pour anticiper les effets d'une augmentation de température et de la fréquence des vents violents, le passage à une sylviculture de peuplements hétérogènes à deux espèces, pin et eucalyptus ; (2) l'exploitation agricole par abattis-brûlis d'une forêt tropicale humide d'altitude à Madagascar (IRD-Université de Fianarantsoa), beaucoup plus complexe qu'un peuplement monospécifique, mais surtout résiliente, c'est-à-dire avec une possibilité de se régénérer, aboutissant à une mosaïque forêt-agriculture dont on pourrait évaluer la stabilité.

Pour intervenir sur les écosystèmes, en réponse aux injonctions environnementales, on peut attendre que le mal soit fait, puis réparer ou tenter de réparer les dégâts, par une ingénierie écologique qui mobilise la biologie de la conservation et l'écologie de la restauration. On peut également tenter de les prévenir. Il s'agit alors de relier la dynamique de l'occupation du sol aux pratiques des agriculteurs, pour savoir comment agir sur des états d'occupation du sol par des incitations touchant les familles d'agriculteurs (Photos Z5 et Z6 du Carnet central). Les sciences sociales se trouvent donc convoquées, nous verrons que ce sera essentiellement à travers l'économie.

L'équipe était constituée de mathématiciens théoriques (CNRS et CREA, Paris), de mathématiciens et d'informaticiens appliqués (LISC, Clermont-Ferrand) et de thématiques, écologues, forestiers et agronomes sur 2 chantiers : les plantations mono-spécifiques de pin maritime (INRA Bordeaux et AMAP Montpellier) et la forêt tropicale humide du corridor forestier de Fianarantsoa (programme MEM, IRD-Univ. Fianarantsoa, Madagascar). Ce dernier chantier associait des écologues de l'Université d'Antananarivo et des mathématiciens et informaticiens appliqués de l'Université de Fianarantsoa.

Cet article propose un bilan d'étape de cette réflexion commune entre écologues, économistes et mathématiciens sur la dialectique conservation – développement.

Définitions et théorie

RESILIENCE

La résilience se définit de deux manières :

- La **résilience au sens de l'ingénierie** est le temps nécessaire au système soumis aux perturbations pour qu'il reprenne son état antérieur une fois les perturbations arrêtées (Holling, 1996). La question est de savoir si le système revient à l'équilibre et si c'est le cas, avec quelle vitesse ? On parlera de constance, de résistance, d'élasticité.
- La **résilience écologique** est la capacité d'un écosystème, habitat, d'une population ou d'une espèce à retrouver son fonctionnement et son développement normal après avoir subi une perturbation profonde ou importante (Holling, 1973 ; Gunderson, 2000). On parlera plus de persistance, de domaine

d'attraction (*domaine of attraction*) et de changements de régime (*regime shifts*), lorsque les conditions environnementales changent trop et que l'écosystème passe soudain à un autre régime qui ne fournit plus les services écosystémiques antérieurs.

Divers facteurs ou paramètres ont été utilisés à l'origine pour évaluer la résilience.

- Une perturbation, tout évènement discret dans le temps et dans l'espace provoquant une réduction de biomasse ou une mortalité des entités fondamentales du système.
- Si l'intensité des perturbations affectant l'écosystème dépasse un certain **seuil**, l'ensemble des facteurs et des processus contrôlant son intégrité et son fonctionnement peuvent être altérés de façon significative, la régénération spontanée de l'écosystème devient difficile voire impossible.
- La répétitivité de la perturbation peut rendre plus difficile la récupération du système, d'autant plus que sa fréquence est élevée.
- Assurer ou rétablir la résilience peut nécessiter un soutien extérieur. Une des voies explorées par les écologues est la « restauration », qui a même donné lieu à une branche de l'écologie, « l'écologie de la restauration ».

La figure 1 exposée par Kahn en 1982 est tout à fait didactique pour des écologues et elle nous introduit au concept de résilience, même si on ne parlerait plus à l'heure actuelle de climax dans les mêmes termes.

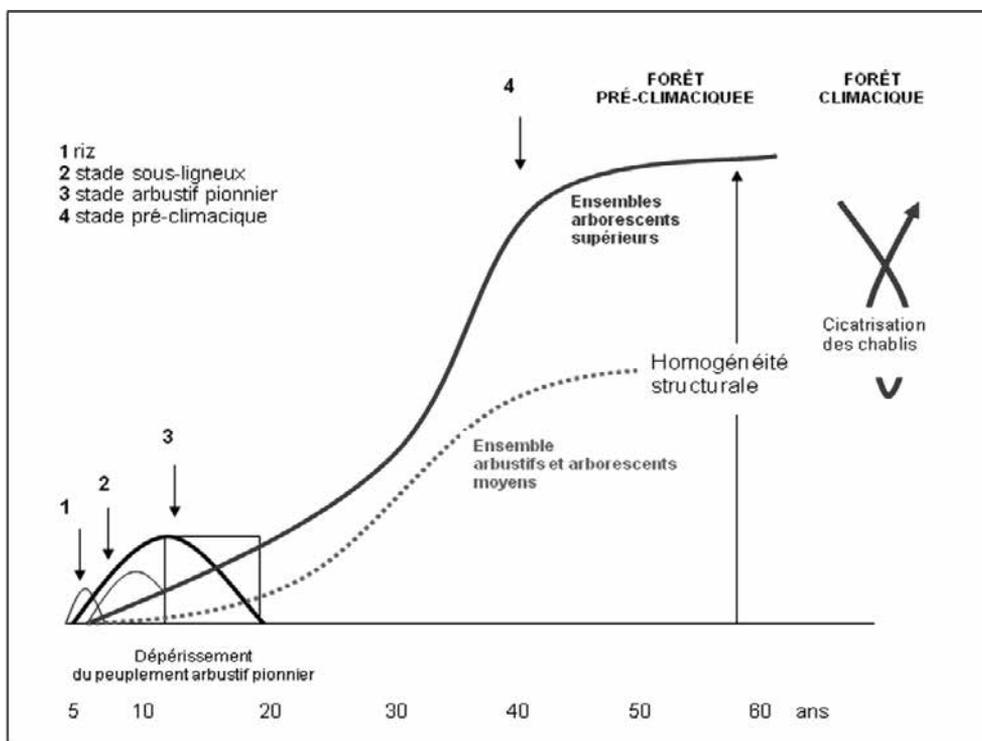


Figure 1 : Reconstitution de la forêt humide (Kahn, 1982)

Hervé et Rivière (2014), en rendant compte du colloque Résilience 2014 à Montpellier, rappellent la définition de la résilience adoptée par le réseau Resilience Alliance : « Resilience is the capacity of a system to absorb disturbance and reorganize while undergoing change so as to still retain essentially the same function, structure, identity and feedbacks » (Walker et al., 2004).

Une approche indirecte de la résilience est proposée par Martin et al. (2011 : p. 35), par la restauration: « ... the original meaning of resilience which is to keep or restore a desired property of the system » (Holling, 1973).

Il reste en effet difficile de quantifier la résilience écologique et d'identifier les mécanismes sous-jacents à la résilience écologique. Par exemple, il est assez difficile de mesurer la perte de biodiversité d'un écosystème par la caractérisation des états « dégradés » de cet écosystème, ainsi que d'isoler les processus en jeu. On est souvent réduit à lister des espèces disparues mais un écosystème n'est pas qu'une somme de populations d'espèces. Par contre les processus actifs de récupération regroupés sous le terme de « restauration » sont des interventions sur l'écosystème, donc connues, que l'on peut mesurer et chiffrer. C'est l'option choisie par Martin (2004) à propos de l'eutrophisation des lacs : traiter la résilience par le biais de la restauration, ce qui permet de calculer le coût économique de la restauration.

Dans l'étude de l'abattis-brûlis, la dynamique des deux états d'occupation du sol, forêt et non forêt, est essentielle. Le passage de forêt à non-forêt est qualifié de « perturbation », le passage de non-forêt à forêt est qualifié de « régénération ». Par son impact sur la fertilité du sol, la durée de la mise en culture influe sur les conditions de cette régénération. Le concept de résilience écologique s'applique aux deux compartiments du système, le sol et la forêt, la reconstitution de la fertilité du sol et la résilience de la forêt. Ce sont, dans chaque cas, des tendances lourdes qui s'expriment :

- la forêt ombrophile, dite forêt humide, est résiliente. En absence de toute action humaine après l'abandon cultural (feu, pâturage, nouvelle mise en culture), la forêt se reconstitue (Photo Z3);
- la fertilité du sol est résiliente ; elle se reconstitue si le sol est laissé en jachère et n'est pas cultivé pendant un certain temps.

Des actions de restauration vont, dans le premier cas, aider à conserver la forêt et stimuler sa régénération, dans le second cas aider à récupérer le fertilité du sol. La conservation des forêts et le maintien ou l'entretien de la fertilité du sol sont les deux facettes d'une gestion durable des agro-éco-systèmes.

Un autre exemple est celui de l'érosion. Le coût des services écosystémiques est évalué par les dégâts d'érosion en aval sur l'ensablement des rizières et le travail nécessaire à leur déblaiement. Le coût d'une prévention par maintien ou extension de la forêt en amont devrait rester inférieur au coût de réparation du désastre. Ce sont des questions qui intéressent également le secteur de l'assurance.

C'est le problème plus général de services rendus en aval d'un bassin versant, mais qui sont conditionnés par l'état de la ressource en amont. Les bénéficiaires payent en aval pour les services rendus mais, qui paye l'entretien ou les travaux d'aménagements en amont ?

VIABILITE

Théorie

Le principe de la viabilité est l'étude de systèmes dynamiques contrôlés soumis à un ensemble de contraintes.

La théorie de la viabilité permet de se référer à un principe d'inertie selon lequel, si un système a fonctionné longtemps sans intervention de régulation, il prend l'habitude de ne rien changer sauf lorsqu'il s'approche d'une zone dangereuse (contrôle par impulsion, réaction rapide à la perception d'un risque). Au lieu de recommander une solution optimisée rarement atteignable, on se donne la possibilité d'alerter lorsque la trajectoire sort du noyau de viabilité. L'objectif de la théorie de la viabilité est de prendre en compte les contraintes pesant sur les variables d'état, de contrôle, de régulation, d'estimer le temps de crise, d'étudier la robustesse des modes de régulation et de commande des systèmes qui s'avèrent valides dans le pire des cas. On peut déterminer et classer les situations dans lesquelles le système est en danger en calculant le temps minimum de crise et comprendre par là même les causes qui génèrent ces situations de manière à les résoudre.

En ce qui concerne la gestion des ressources naturelles, la théorie de la viabilité a été appliquée en halieutique sur des populations de poissons (Mullon *et al.*, 2004), en zootechnie sur des tailles et compositions de troupeaux

de ruminants (Tichit *et al.*, 2004), en écologie sur des peuplements d'arbres (Béné & Doyen, 2008). Bonneuil (2003) a cherché à l'appliquer à des écosystèmes et plus seulement à des populations. Rappaport *et al.* (2006), Aubin & Saint-Pierre (2007), Martinet & Doyen (2007), De Lara & Doyen (2008) ont étendu son application à la gestion des ressources naturelles.

Le concept central est celui de **noyau de viabilité**, ensemble regroupant tous les **états initiaux** à partir desquels il existe au moins **une évolution** restant dans **l'ensemble de contraintes**.

La théorie de la viabilité [Aubin, 1991] considère un système dynamique défini par son état $\vec{x}(t) \in X \subset \mathbb{R}^N$ et suppose que son évolution peut être influencée par un contrôle $\vec{u}(t)$:

$$\begin{cases} \vec{x}'(t) = f(\vec{x}(t), \vec{u}(t)) \\ \vec{u}(t) \in U(\vec{x}(t)) \end{cases} \quad (1.1)$$

L'ensemble des contrôles admissibles peut dépendre de l'état du système, $\vec{u}(t)$ est choisi dans un sous-ensemble $U(\vec{x}(t)) \subset \mathbb{R}^q$ qui dépend de l'état du système au temps t .

De tout point initial, il peut exister plusieurs évolutions possibles suivant les différentes valeurs des contrôles choisies au cours du temps $t \rightarrow u(t)$. [Aubin, 1991] a défini la notion d'état viable :

Définition 1.1 *Un état initial $\vec{x}(0)$ pour lequel il existe au moins une évolution $\vec{x}(t)$, satisfaisant le système 1.1 avec $\vec{x}(0) = \vec{x}_0$, qui reste dans un ensemble de contraintes $K \subset \mathbb{R}^N$ indéfiniment est un état viable et $\vec{x}(t)$ est appelée évolution viable.*

DEVELOPPEMENT DURABLE, RESILIENCE ET VIABILITE

Durand *et al.* (2012) relie la viabilité au développement durable. Le développement durable est une nouvelle conception de l'intérêt public, appliquée à la croissance économique. Mais le développement durable, défini à l'origine comme un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs, souffre aujourd'hui des limites de cette définition.

La théorie de la viabilité permet d'intégrer les principales caractéristiques d'un développement durable :

- l'approche multi-objectifs,
- la prise en compte d'un horizon temporel infini,
- la possibilité de déterminer plusieurs politiques d'actions viables (Bernard & Martin, 2012)
- et le respect de l'équité intergénérationnelle.

L'enjeu est alors de déterminer **des politiques d'actions** permettant de satisfaire **un double objectif** : la conservation des ressources naturelles et la satisfaction des besoins de la population locale. On évite ainsi qu'une génération soit moins favorisée que la précédente, c'est le principe de l'équité intergénérationnelle, qui constitue une caractéristique importante d'un développement durable.

Le critère environnemental est de conserver des ressources naturelles exploitées selon un rythme à définir et à respecter. Le cadre théorique de la viabilité nous paraît particulièrement bien adapté à la problématique de gestion dans le domaine de l'environnement.

- ❑ Premièrement, il permet de se concentrer sur **la définition des contraintes**, et sur la définition des états désirables.
- ❑ Deuxièmement, la théorie de la viabilité **propose des politiques d'actions possibles**, à partir desquelles on peut définir des stratégies flexibles pour la gestion environnementale.

La figure Z1 montre que l'on ne peut pas isoler le domaine écologique du domaine économique et social. Les notions de résilience et de viabilité sont des parties intégrantes du développement durable. Ainsi le viable se définit entre l'écologie et l'économie, le vivable par l'adaptation des socio-éco systèmes et l'équitable comme répartition entre les acteurs, actuelle et future, en respectant une équité intergénérationnelle. Cette transmission aux générations futures introduit la notion de patrimoine.

- La préservation de la valeur des patrimoines hérités des générations antérieures, en adoptant un mode de gestion appropriée, c'est l'idée de gérer un capital acquis « en bon chef de famille » ;
- La durabilité de la gestion des patrimoines ou des ressources naturelles existantes ;
- La capacité à léguer les patrimoines existants aux générations futures sans détériorations ;
- La durabilité oblige à considérer la conservation comme une conséquence et non comme un objectif en soit.

Deffuant & Gilbert (2011) ont expliqué comment ils relient les deux concepts de résilience et viabilité. La définition de base de la viabilité est une généralisation de ce qu'on a appelé ingénierie, la définition de la résilience par l'ingénierie, car le retour à l'équilibre peut alors se calculer. Holling & Gunderson (2002) définissent ce retour à l'équilibre comme: « Rate and speed of return to preexisting conditions after disturbance ». Rougé (2013) dans sa thèse relie résilience et vulnérabilité dans le cadre de la théorie de la viabilité.

Dans le domaine de la conservation, ces deux concepts de résilience et de viabilité sont également liés : on ne peut pas traiter de la conservation des forêts sans aborder en même temps les conditions de vie de la population riveraine de ces forêts. L'idée d'une forêt vide d'hommes est dépassée. C'est pourquoi les deux concepts de résilience et viabilité sont proposés comme deux facettes de la conservation.

Nous proposons de confronter des modèles de viabilité, à l'échelle de la famille élargie, et des modèles de transitions, à l'échelle du paysage. Dans ce bilan, les premiers résultats sont présentés sous la forme d'équations de viabilité et de schémas de transition.

Résultats

EN FORETS HUMIDES

Equation du revenu familial en lisière de forêt humide

Les publications de Dominique Hervé (Hervé *et al.*, 2009 ; Hervé, 2012) et la thèse de Claire Bernard (Bernard, 2009, 2011) ont fourni les matériaux pour la construction de l'équation de viabilité en forêt ombrophile.

Dans les forêts humides de Fianarantsoa, on assume que le moteur de l'accumulation est l'aménagement des bas-fonds en rizières, et c'est ce qui dirige la déforestation par abattis-brûlis, tout en étant la seule défriche encore permise en forêt. La déforestation sera donc évaluée, non seulement par la réduction de la surface forestière, mais aussi, indirectement, par l'aménagement des bas-fonds en rizières, en repérant les situations de saturation des bas-fonds et les surfaces restant encore à aménager. Cependant, la régénération n'apparaît pas dans l'équation car on en reste à un bilan global des surfaces exploitées, donc défrichées et aménagées.

Trois (3) variables dynamiques :

- (1) S surface aménagée, l'aménagement comprenant à la fois la défriche sur versants et la transformation des bas-fonds en rizières : $F_0(1900) - s(t) = F(t)$ forêt restante au temps t depuis un état initial en 1900 ;
- (2) N population ;
- (3) K capital commun.

Quatre (4) variables de contrôle :

- (1) L'effort d'aménagement $\delta(t)$, en culture manuelle (avec la bêche ou angady), est limité par la capacité de travail individuelle des habitants : $\delta(t), \delta(t) < N(t) < \delta_{\max}$
- (2) La proportion des jeunes hommes en âge de travailler qui migrent en dehors du corridor $v(t)$ varie entre 0 et 1 : $0 < v(t) < 1$
- (3) L'accroissement de population $r(t)$ est borné : $r(t), R_{\min} < r(t) < R_{\max}$
- (4) Le transfert monétaire $\tau(t)$, en provenance de l'Etat ou d'une ONG, est compris dans une fourchette : $\tau(t), 0 < \tau < \tau_{\max}$.

$N'(t) = r(t) N(t) - v(t) N(t)$ / L'accroissement de population est l'accroissement naturel diminué des migrants qui sont partis

- $c N(t)$ / La consommation par personne et par an est considérée comme une constante.
- $\beta s(t) d(t)$ / Le coût d'aménagement par hectare d'une surface de bas-fond aménageable en rizière ou d'une surface en forêt défrichée pour la culture.

+ $\mu \min(s(t), \gamma (1-v(t)) N(t))$ / La production dépend de la surface cultivée avec un rendement μ , considéré comme constant, sur la surface aménagée, ou la partie de cette surface que la population restante après migration peut aménager. γ est la surface maximum cultivable par homme et par an.

+ $w v(t) N(t)$ / Les revenus annuels provenant des migrants sont versés dans le capital commun de la famille élargie que dirige le plus ancien.

+ $\tau(t)$ / Transfert monétaire annuel, provenant de l'Etat ou des ONGs, et versé dans le capital commun.

On obtient donc finalement l'équation suivante du revenu familial : (1)

$$K'(t) = -c N(t) - \beta s(t) d(t) + \mu \min(s(t), \gamma (1-v(t)) N(t)) + w v(t) N(t) + \tau(t) \quad (1)$$

Avec les deux contraintes suivantes :

- (1) La surface aménagée maximale représente la différence entre la surface de la forêt originelle F_0 et la surface minimale de la forêt que l'on décide de préserver.
 $S_{\max} = F_0 - F_{\min}$
- (2) Le capital accumulé par une famille se transmet aux descendants comme ce que leur ont transmis leurs ancêtres. L'objectif est de maintenir le capital par tête K/N , c'est-à-dire que chacun ne reçoive pas moins à chaque génération.
 $K \text{ courant} > K_{\min} \text{ et } K/N > 0$

Un commentaire sur cette équation de viabilité. Brooks *et al.* (2009) montrent bien que la migration peut être dans les deux sens ; pas toujours en départs, mais aussi en flux entrants. C'est la question que nous nous sommes posés pour le corridor COFAV, quels sont les flux migratoires entrants, internes (Betsileo – Tanala) et sortants ?

Transitions en forêts humides (Figure H1).

Les transitions en forêt humide se jouent essentiellement entre les trois états : forêt – culture – jachère mais, à termes, les surfaces boisées peuvent constituer une alternative de défrichement et mise en culture. On constate qu'il ne reste déjà plus beaucoup de plantations de pin. Si l'on accepte des sols de moindre fertilité, le labour des surfaces en herbe constitue une autre alternative à la défriche de la forêt. Le rendement espéré est cependant encore moins élevé qu'après un précédent ligneux arboré ou arbustif.

La place du compartiment « Plantation » dans le modèle de transition permet de raisonner l'évolution possible des plantations de canne à sucre si le marché légal d'alcool de canne à sucre se légalisait pour une utilisation comme carburant.

De même, la transition Herbe -> Boisement a été observée dans le passé, au cours des grandes plantations coloniales puis durant l'indépendance. Mais cette transition serait-elle envisageable dans l'avenir proche, à une échelle tout aussi massive ? Parallèlement, ces boisements sont également menacés par l'abattis-brûlis, après les interdictions de défricher la forêt mature.

Quelle surface en herbe peut-on attendre dans le futur selon les recrûs en herbe qui proviennent de cycles culturaux répétés et selon les remises en culture éventuelles, par un labour, de ces recrûs herbacés ? Cette surface en herbe risque de s'étendre ou au contraire restera-telle limitée ?

Si le moteur reste bien la défiche initiale de la forêt et l'aménagement des rizières, on voit bien qu'au-delà de certains seuils, c'est l'ensemble de la dynamique d'occupation du sol qui est à reconsidérer.

EN FORMATIONS SECHES

Equation du revenu familial dans le sud-ouest aride de Madagascar

La thèse d'anthropologie de Réau (2005), la thèse d'économie de Fanakoa (2007) et les publications ultérieures en économie qui font référence à la théorie de la viabilité (Fanakoa, 2010), ont été valorisées pour confectionner cette équation de viabilité appliquée aux formations sèches de l'Androy, au Sud de Madagascar.

On définit 3 variables dynamiques : Population, Forêt, Capital et 5 variables de contrôle.

On assume que le moteur de l'accumulation est l'élevage de zébus.

D'autres raisons d'exploiter la forêt apparaissent : l'agriculture industrielle, le charbon de bois et le pâturage en savane, valides à Mikea (Nord de Toliara), sont différentes plus au Sud, à Androy (Oroqueta, nom local donné aux *Opuntia* spp., à proximité de Fort Dauphin).

Population

$$N_{t+1} - N_t = N_t (\alpha_t - \beta + \gamma_t)$$

Taux de naissance α , taux de mortalité fixe β et taux de migration γ (en positif ou en négatif)

Surface en forêt

$$F_{t+1} - F_t = b(t) + \eta (1 - F(t)/F_{\max}) F(t) - d(t)$$

La surface en forêt F croît avec reforestation (b) et décroît avec déforestation (d). La croissance naturelle de la forêt est une constante multipliée par ce qui reste de forêt depuis 1960.

$$K_{t+1} - K_t = \mu K_t + (R_t - c_t N_t) 1/p_z$$

Le capital est accumulé sous la forme de têtes de zébus. On applique à la population animale un taux constant d'augmentation du nombre de zébus (natalité moins mortalité) et la différence entre le revenu et la consommation par personne, à un prix fixe P .

Avec $u = (a, b, c, da, dw, dz, T)$, on atteint 7 variables de contrôle :

Taux de naissance compris entre 0 et 1% (a)

Reforestation, considérée ici comme une surface reboisée, est comprise entre 0 et 100 ha (b)

Consommation annuelle par personne comprise entre simple et double d'une consommation moyenne (c)

Taux de déforestation (diminution de 2000 à 2005)

Da , surface en abattis-brûlis pour l'agriculture

Dw , surface coupée pour le bois

Dz , surface pâturée ou utilisée pour l'alimentation des zébus

T transfert monétaire

Nous ferons quelques commentaires sur cette équation de viabilité.

Dans le Sud, sec et touché par des sécheresses, les famines sont récurrentes et le taux de migration est une variable d'ajustement importante. Ce volet de la démographie a plus de poids que dans le cas des forêts humides.

Les références de Fanakoa (2007, 2010) signalent des reforestations sur des surfaces limitées dans l'Androy, qui ont justifié leur incorporation dans l'équation de viabilité. Ces programmes existent-ils dans la zone de Toliara ? Elmquist *et al.* (2007) montrent bien comment se mobilisent les communautés locales pour conserver les fragments forestiers restant. André-Domenech *et al.* (2014) ont synthétisé les travaux initiaux de Fanakoa dans le cadre de la théorie de la viabilité.

Les enquêtes agro-économiques réalisées dans la forêt de Mikea en 2012 devraient permettre d'établir une équation de viabilité directement applicable à la forêt sèche de cette zone, conformément à son modèle de transition. L'exemple nous est donné avec les travaux sur l'Androy.

Transitions en formations sèches

Le schéma de transitions qui traite des fourrés xérophiles (Figure 3 de l'article 13) se rapproche le plus des formations semi-arides du sud-ouest et Sud de Madagascar, à la base des équations de viabilité explicitées plus haut. Le cas des fourrés xérophiles pose cependant des questions particulières sur la régénération qui restent à résoudre, par rapport au cas des forêts sèches (Figure O5).

TRAJECTOIRES VIABLES

Des trajectoires éventuellement viables sont à rechercher dans le noyau de viabilité. Les représentations graphiques font appel à trois dimensions d'où des représentations non en courbes mais en enveloppes. Nous commentons à titre d'exemple la figure 4 de l'article de Bernard & Martin (2012) sur la forêt humide de Fianarantsoa (Figure Z2). Cette figure Z2, reprise de Bernard et Martin (2012 : Figure 4) montre les deux enveloppes bleues des noyaux de viabilité du système pour deux valeurs du taux de transfert monétaire, $\tau = 0$ et $\tau = 10^7$. Le graphe est à trois dimensions, puisqu'il met en exergue des combinaisons de Surface S , population P et capital K . Le cadre des contraintes est défini par l'intersection entre le cube $([S_{\min}; S_{\max}] \times [P_{\min}; P_{\max}] \times [K_{\min}; K_{\max}])$, dont les côtés sont colorés en gris et l'aire $\{s, P, K\}$ telle que $sP \leq S_{\max}$.

Les valeurs des paramètres sont $s_{\min} = S_{\max} / P_{\max}$ et $s_{\max} = S_{\max} / P_{\min}$. $S_{\max} = F_o - F_{\min}$; Forêt initiale moins forêt minimum à conserver. Les équations qui définissent le système sont détaillées dans Bernard et Martin (2012).

Discussion : Questions à débattre

RELIER ENTRE EUX LES DIAGNOSTICS SECTORIELS

On se demande quelles sont les articulations entre les typologies des exploitations agricoles, qui mettent en évidence la fragilisation des plus pauvres, les stratégies de transmission du patrimoine de la famille élargie telles qu'elles sont encore pratiquées chez les betsileo (Photo Z5), façonneurs de rizières (la même mise en réserve de terres pour la transmission héréditaire est-elle possible à l'avenir ?), et finalement les transitions observées dans les paysages (saturation des bas-fonds, fragmentation des forêts, extension des savanes). D'autres hypothèses d'articulations doivent être posées pour la forêt sèche (Photo Z6). Dans les deux cas, des réponses ne pourront être apportées à ces questions qu'en reliant entre eux des diagnostics sectoriels.

TRANSFERT MONETAIRE

Le passage de l'échelle macro aux ménages ou à la famille élargie est justement la question posée par la redistribution d'un montant gagné sur les marchés pour le stockage de carbone, un processus éminemment global, vers les ménages qui localement gèrent et peuvent contrôler d'éventuels dégâts sur la forêt. Dans cet espace entre le global et le local prennent place des intermédiaires, assez puissants pour amortir les coûts de transactions, comme sont les grandes ONG internationales de la conservation.

Plusieurs questions se posent, celle du montant global du transfert pour pouvoir infléchir les trajectoires observées, celle du rôle de l'Etat dans l'organisation de ce transfert et, finalement, la question de l'affectation et la distribution de ces sommes aux destinataires, les communautés villageoises qui vivent dans ou de la forêt.

Pour parvenir à un meilleur contrôle de ces flux monétaires escomptés, n'y aurait-il pas un niveau intermédiaire de captation et de distribution de la taxe carbone pour une déforestation évitée ?

Un contrôle étatique d'abord, ce qui suppose un Etat fort et reconnu, sinon le risque est grand que les politiques environnementales soient dictées ailleurs et ce risque existe déjà en ce qui concerne les transactions carbone.

Un contrôle assurant que les destinataires recevront finalement les compensations escomptées pour le respect des interdits et la surveillance des fragments forestiers restants.

ROLE DES COLLECTIVITES LOCALES

Le rôle des collectivités locales est à redéfinir dans les propositions de développement humain et de conservation des ressources naturelles : pourquoi les collectivités locales plutôt que les ministères ou le pouvoir central ?

1. Sur plan scientifique :
 - Quels types d'analyses et de recherches pourraient-ils permettre aux collectivités locales de lutter contre la vulnérabilité, directement ou par leur collaboration avec l'administration de niveau supérieur et les institutions internationales ?
 - Comment établir ou renforcer la recherche pluridisciplinaire pour aborder les questions se rapportant à la résilience et la viabilité ?
 - Quelle échelle est-elle la plus appropriée pour mieux aborder ces questions ?
2. Sur le plan opérationnel
 - Quelles sont les limitations du rôle que les collectivités locales peuvent jouer en matière d'adaptation et d'atténuation face au mode de gestion des ressources naturelles ?
 - Comment les gouvernements centraux, leurs ministères de tutelle, les agences de développement nationales et internationales et les professionnels ont-ils réussi à aider les collectivités locales à jouer un rôle décisif dans la lutte pour le renforcement des communautés locales et l'utilisation durable des ressources naturelles ?
 - De quel type de soutien (ressources, formation, conseils, équipements, infrastructures, systèmes de sécurité sociale) les collectivités locales ont-elles besoin de la part d'autres institutions gouvernementales et non gouvernementales pour mieux lutter contre la pauvreté, la vulnérabilité, ou favoriser l'adaptation et accroître le bien-être de base des habitants ?

Conclusion

Relier résilience et viabilité, dans la théorie c'est fait. Dans la pratique, nous n'avons présenté qu'une première étape avec les résultats de base. Il reste à relier les équations de viabilité des ménages (Photos Z5 et Z6) et les transitions entre états d'occupation du sol (Photos Z3 et Z4), sachant que ces transitions sont les moteurs des paysages en grande partie construits par les pratiques de ces mêmes ménages. Ce sont des questions complexes auxquelles doivent répondre des équipes constituées à partir de plusieurs disciplines.

L'ouvrage de Rakoto Ramiarantsoa *et al.* (2012) explore plusieurs pistes de réflexion pour des politiques environnementales. Cette réflexion convoque un ensemble de disciplines distinctes, interpellées par les questions environnementales et débouche sur des aides à la définition de politiques environnementales. C'est dans le même esprit que peuvent être mobilisés les outils issus de la théorie de la viabilité, en organisant des passerelles entre mathématiciens et spécialistes de l'environnement.

Finalement, pour mettre en pratique ces propositions et ces simulations, notre proposition est celle d'un développement décentralisé orienté par les collectivités locales.

Références bibliographiques

Andrés-Domenech P., Saint-Pierre P., Fanako P.S., Zaccour G., 2014 : « Sustainability of the dry forest in Androy. A viability analysis ». *Ecological Economics*, 104C : p. 33-49.

Aubin J.-P., 1991. *Viability Theory*. Birkhäuser.

Aubin J.-P., Bayen A., Saint-Pierre P., 2011. *Viability Theory. New Directions*. Springer, Dordrecht.

Aubin J.-P., Saint-Pierre P., 2007 : « An introduction to viability theory and management of renewable resources », dans Kropp J., J. Scheffran (eds.), *Advanced Methods for Decision Making and Risk Management in Sustainability Science*. Nova Science Publ. Inc., p. 43-80.

Béné C., Doyen L., 2008 : « Contribution values of biodiversity to ecosystem performances: a viability perspective ». *Ecological Economics*, 68 (1-2) : p. 14-23.

Bené C., Evans L., Mills D., Ovie S., Rajl S., Tafida A., Kodio A., Sinaba F., Morand P., Lemoalle J., Andrew N., 2011 : « Testing resilience thinking in a poverty context : Experience from the Niger river basin ». *Global Environmental Change*, 21 : p. 1173-1184.

Bernard C., 2009 : « Mathematical modelling of sustainable development: an application to the case of the rain-forest of Madagascar », dans BIOMAT, 9th *International Symposium on Mathematical and Computational Biology*, 1-6 August, Brasilia, Brasil, Mondaini RP: p. 152-166.

Bernard C., 2011 : *La théorie de la viabilité au service de la modélisation mathématique du développement durable. Application au cas de la forêt humide de Madagascar*. Thèse doctorale en mathématiques appliquées. Ecole doctorale sciences fondamentales, laboratoire d'ingénierie des systèmes complexes LISC-Cemagref, Univ. Blaise-Pascal, Clermont II, 153 p.

Bernard C., Martin S., 2012 : « Comparing the sustainability of different action policy possibilities. Applications to the issue of both household survival and forest preservation in the corridor of Fianarantsoa ». *Mathematical Biosciences*, 245(2) : p. 322-30.

- Bonneuil N., 2003 : « Making Ecosystem Models Viable ». *Bulletin of Mathematical Biology*, 65 : p. 1081-1094.
- Brooks C.P., Holmes C., Kramer K., Barnett B., Keitt T.H., 2009 : « The Role of Demography and Markets in Determining Deforestation Rates Near Ranomafana National Park, Madagascar ». *PLoS ONE*, 4(6) : p. e5783.
- Deffuant G., Gilbert N. (eds.), 2011 : *Viability and Resilience of Complex Systems : concepts, Methods and Case Studies from Ecology and Society*. SpringerLink (Online service), XII, 224 p.
- DeLara M., Doyen L., 2008 : *Sustainable management of natural resources, mathematical models and methods*. Berlin, Springer-Verlag, 266 p.
- Durand M.H., Martin S., Saint-Pierre P, 2012 : « Viabilité et développement durable ». *Natures Sciences Sociétés*, 20 : p. 271-285.
- Elmqvist T., Pyykönen M., Tengö M., Rakotondrasoa F., Rabakonandrianina E., Radimilahy C., 2007 : « Patterns of Loss and Regeneration of Tropical Dry Forest in Madagascar: The Social Institutional Context ». *PLoS ONE*, 2(5) : p. e402.
- Fanakoa P.S., 2007 : *Dynamique des pratiques paysannes face à la déforestation dans l'extrême sud de Madagascar*. Thèse doctorale en économie, C3ED/UVSQ Université Saint-Quentin en Yvelines, France, 370 p.
- Fanakoa P.S., 2010 : *Understanding environmental issues using system dynamics methods. Pressure on natural resources in Southern Madagascar*. Les Cahiers du GERAD, G-2010-45, 08/2010 (ISSN: 0711-2440), 15 p.
- Gunderson L.H., 2000 : « Ecological resilience – in theory and application ». *Annual Review of Ecology and Systematics*, 31 : p. 425-439.
- Hervé D., 2012 : « La modélisation environnementale, un outil du politique ? », dans Rakoto Ramiarantsoa H., Blanc-Pamard C., Pinton F. (eds.), *Géopolitique et environnement. Les leçons de l'expérience malgache*. Marseille, IRD Editions (Objectifs Suds), p. 155-185.
- Hervé D., Rakotozafy R., Ratiarson V., Rakotoasimbahoaka C., Raherinina A., Ramaroson J.-H., Ganomanana T., Randriamahaleo S., 2009 : *Changer de paradigme pour conserver durablement les forêts à Madagascar. Contributions de la modélisation*. Projet DEDUCTION, Colloque Cerisy « Changer pour durer », 19-26/09/2009, Cerisy, France.
- Hervé D., Rivière M., 2014 : « Résilience, adaptation, changement: l'interdisciplinarité questionnée ». *Natures Sciences Sociétés*, 22 (3), p. 247-253.
- Holling C.S., 1973 : « Resilience and stability of ecological systems ». *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 4 : p. 1-23.
- Holling C.S., 1996 : « Engineering resilience versus ecological resilience », dans Schulze P. (ed.), *Engineering within ecological constraints*. Washington, D.C., USA, National Academy, p. 31-44
- Holling C.S., Gunderson L.H. (eds.), 2002 : *Resilience and adaptive cycles. In: Panarchy: understanding transformations in human and natural system*, Island Press, Washington.
- Kahn F., 1982 : *La reconstitution de la forêt tropicale après culture traditionnelle (sud-ouest de la Côte d'Ivoire)*. Paris, Mémoire Orstom n°97, 150 p.
- Martin S., 2004 : « The cost of restoration as a way of defining resilience: a viability approach applied to a model of lake eutrophication ». *Ecology and Society*, 9(2) : p. 8. [en ligne] - Disponible sur internet <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art8/>

Martinet V., Doyen L., 2007 : « Sustainability of an economy with an exhaustible resource : A viable control approach ». *Resource and energy economics*, 29(1): p. 17-39.

Martin S., Deffuant G., Calabrese J.M., 2011: «Defining resilience mathematically: from attractors to viability». In G. Deffuant and N. Gilbert (eds.), *Viability and resilience of complex systems, understanding complex systems*, Springer-Verlag Berlin Heideberg, pp.15-36.

Mullon C., Curry P., Shannon L., 2004 : « Viability model of trophic interactions in marine ecosystems ». *Natural Resource Model*, 17: p. 27-58.

Rakoto Ramiarantsoa H., Blanc-Pamard C., Pinton F. (eds.), 2012 : *Géopolitique et environnement. Les leçons de l'expérience malgache*. Marseille, IRD Editions (Objectifs Suds).

Rappaport A., Terreaux, J.-P., Doyen L., 2006 : « Viability analysis for the sustainable management of renewable resource ». *Journal of Mathematics and Computer Modeling*, 43 : p. 466-483.

Réau B., 2005: *Dégradation de l'environnement forestier et réactions paysannes. Les migrants tandroy sur la côte ouest de Madagascar*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux III, 371 p.

Rougé C., 2013: *Résilience et vulnérabilité dans le cadre de la théorie de la viabilité et des systèmes dynamiques stochastiques contrôlés*. Thèse informatique, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand 2, 153 p.

Tichit M., Hubert B., Doyen L., Genin D., 2004 : « A viability model to access the sustainability of mixed herd under climatic uncertainty ». *Animal Research* 53: p. 405-417.

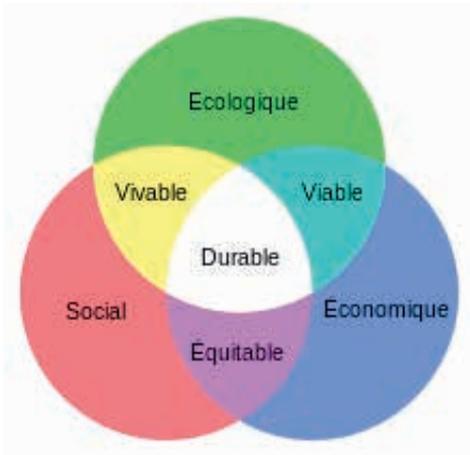


Figure Z1 : Schéma du développement durable

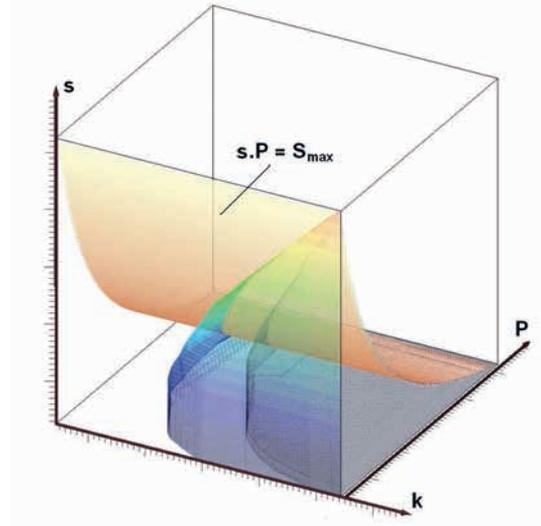


Figure Z2 : Deux noyaux de viabilité (bleu) pour des combinaisons de surface s, population P, capital K (d'après Bernard et Martin, 2012)



Photo Z3 : Recrû forestier évitant le feu (forêt humide)



Photo Z4 : Régénération d'un amas forestier en savane sèche



Photo Z5 : Famille Betsileo vivant au cœur de la forêt humide



Photo Z6 : Famille vivant en forêt sèche



Transitions agraires

au sud de Madagascar



Résilience et viabilité

deux facettes de la conservation

Editeurs scientifiques

**Dominique Hervé, Samuel Razanaka, Solofo Rakotondraompiana,
Fontaine Rafamantanantsoa, Stéphanie Carrière**



Institut de recherche
pour le développement



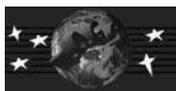
Transitions agraires au sud de Madagascar. Résilience et viabilité, deux facettes de la conservation

Editeurs scientifiques

**Dominique Hervé, Samuel Razanaka, Solofo Rakotondraompiana,
Fontaine Rafamantanantsoa, Stéphanie Carrière**

**Actes du séminaire de synthèse du projet FPPSM :
«Forêts, Parcs, Pauvreté au Sud de Madagascar»
Antananarivo, 10-11 juin 2013**

Antananarivo 2015



Mise au point des manuscrits et mise aux normes de la collection PARRUR

Noly Razanajaonarijery

Traduction des titres, résumés et mots clés en anglais

Domoina Rakotomalala

Conception de la couverture

François Adoré Razafilahy, MYE

Auteurs des photos de couverture

En recto de couverture, photo de Stéphanie Carrière

En dos de couverture, photo de Dominique Hervé

Référence de l'ouvrage pour citation

Hervé D., Razanaka S., Rakotondraompiana S., Rafamantanantsoa F., Carrière S. (eds.), 2015. Transitions agraires au sud de Madagascar. Résilience et viabilité, deux facettes de la conservation. Actes du séminaire de synthèse du projet FPPSM «Forêts, Parcs, Pauvreté au sud de Madagascar», 10-11/06/2013, Antananarivo, IRD-SCAC/PARRUR, Ed. MYE, 366 p.