

	Compte-rendu de fin de projet	

Projet ANR-06-PADD-007

Dédution

Programme ADD édition 2006

A	IDENTIFICATION	2
B	RESUME CONSOLIDE PUBLIC	2
B.1	Instructions pour les résumés consolidés publics	2
B.2	Résumé consolidé public en français	3
B.3	Résumé consolidé public en anglais	5
C	MEMOIRE SCIENTIFIQUE	7
C.1	Résumé du mémoire	7
C.2	Enjeux et problématique, état de l'art	8
C.3	Approche scientifique et technique	11
C.4	Résultats obtenus	15
C.5	Exploitation des résultats	28
C.6	Discussion	28
C.7	Conclusions	31
C.8	Références	31

Ce document est à remplir par le coordinateur en collaboration avec les partenaires du projet. L'ensemble des partenaires doit avoir une copie de la version transmise à l'ANR.

Ce modèle doit être utilisé uniquement pour le compte-rendu de fin de projet.

A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	Déduction
Titre du projet	La viabilité : une contribution à l'ingénierie du développement durable
Coordinateur du projet (société/organisme)	Cemagref
Période du projet (date de début – date de fin)	Janvier 2007 – avril 2010
Site web du projet, le cas échéant	http://mann.clermont.cemagref.fr/ Déduction

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Mlle, Sophie, Martin
Téléphone	06 20 66 31 32
Adresse électronique	Sophie.martin@cemagref.fr
Date de rédaction	20 juin 2010

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	- LISC (Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Complexes) / Cemagref – Sophie Martin - CREA (Centre de Recherche en Epistémologie Appliquée) / Ecole Polytechnique / CNRS – Jean-Pierre Aubin - UR 199 / IRD – Dominique Hervé - UR 1263 / INRA – Céline Meredieu - UMR 931 / INRA – François de Coligny
---	---

B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

Ce résumé est destiné à être diffusé auprès d'un large public pour promouvoir les résultats du projet, il ne fera donc pas mention de résultats confidentiels et utilisera un vocabulaire adapté mais n'excluant pas les termes techniques. Il en sera fourni une version française et une version en anglais. Il est nécessaire de respecter les instructions ci-dessous.

B.1 INSTRUCTIONS POUR LES RESUMES CONSOLIDES PUBLICS

Les résumés publics en français et en anglais doivent être structurés de la façon suivante.

Titre d'accroche du projet (environ 80 caractères espaces compris)

Titre d'accroche, si possible percutant et concis, qui résume et explicite votre projet selon une logique grand public : il n'est pas nécessaire de présenter exhaustivement le projet mais il faut plutôt s'appuyer sur son aspect le plus marquant.

Les deux premiers paragraphes sont précédés d'un titre spécifique au projet rédigé par vos soins.

Titre 1 : situe l'objectif général du projet et sa problématique (150 caractères max espaces compris)

Paragraphe 1 : (environ 1200 caractères espaces compris)

Le paragraphe 1 précise les enjeux et objectifs du projet : indiquez le contexte, l'objectif général, les problèmes traités, les solutions recherchées, les perspectives et les retombées au niveau technique ou/et sociétal

Titre 2 : précise les méthodes ou technologies utilisées (150 caractères max espaces compris)

Paragraphe 2 : (environ 1200 caractères espaces compris)

Le paragraphe 2 indique comment les résultats attendus sont obtenus grâce à certaines méthodes ou/et technologies. Les technologies utilisées ou/et les méthodes permettant de surmonter les verrous sont explicitées (il faut éviter le jargon scientifique, les acronymes ou les abréviations).

Résultats majeurs du projet (environ 600 caractères espaces compris)

Faits marquants diffusables en direction du grand public, expliciter les applications ou/et les usages rendus possibles, quelles sont les pistes de recherche ou/et de développement originales, éventuellement non prévues au départ.

Préciser aussi toute autre retombée : partenariats internationaux, nouveaux débouchés, nouveaux contrats, start-up, synergies de recherche, pôles de compétitivités, etc.

Production scientifique et brevets depuis le début du projet (environ 500 caractères espaces compris)

Ne pas mettre une simple liste mais faire quelques commentaires. Vous pouvez aussi indiquer les actions de normalisation

Illustration

Une illustration avec un schéma, graphique ou photo et une brève légende. L'illustration doit être clairement lisible à une taille d'environ 6cm de large et 5cm de hauteur. Prévoir une résolution suffisante pour l'impression. Envoyer seulement des illustrations dont vous détenez les droits.

Informations factuelles

Rédiger une phrase précisant le type de projet (recherche industrielle, recherche fondamentale, développement expérimental, exploratoire, innovation, etc.), le coordonnateur, les partenaires, la date de démarrage effectif, la durée du projet, l'aide ANR et le coût global du projet, par exemple « Le projet XXX est un projet de recherche fondamentale coordonné par xxx. Il associe aussi xxx, ainsi que des laboratoires xxx et xxx). Le projet a commencé en juin 2006 et a duré 36 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de xxx € pour un coût global de l'ordre de xxx € »

B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

Suivre impérativement les instructions ci-dessus.

La viabilité : une contribution à l'ingénierie du développement durable

Proposer des méthodes pour distinguer des choix des politiques de gestion qui puissent être qualifiés de durables

L'enjeu de la distinction entre les actions qui respectent les conditions du développement durable et les autres est considérable tant ce label est utilisé pour promouvoir des activités économiques, sociales ou politiques.

Les outils des théories mathématiques du contrôle ont montré leur efficacité en automatique, l'objectif de ce projet est d'expérimenter l'utilisation de certains d'entre eux en ingénierie du développement durable.

Les travaux menés dans ce projet consistent donc, dans le cadre de l'agriculture au sens large, à formuler des problèmes de gestion durable typiques, et à développer des outils mathématiques nouveaux pour formaliser ces problèmes de gestion durable et pour construire des algorithmes pour les résoudre.

Est ainsi rassemblée au service du projet une association d'équipes interdisciplinaire composée de laboratoires fondamentaux (CREA) et appliqués (LISC), qui développent des méthodes et outils issus de la théorie de la viabilité et de partenaires (INRA, IRD) ayant l'expérience de l'étude de systèmes de l'agriculture au sens large soumis à des enjeux de gestion durable.

Les concepts de la théorie mathématique de la viabilité adaptés pour formaliser des problèmes de gestion durable et les résoudre

Le concept de développement durable contient les notions de changement et de durée. Prendre en compte la notion de changement implique de considérer les dynamiques des systèmes étudiés ; prendre en compte celle de durée implique de définir les propriétés du système qui doivent être conservées jusqu'à un horizon temporel à préciser.

Résoudre un problème de gestion durable correspond ainsi à déterminer les politiques d'actions qui permettent de contrôler la dynamique du système de façon à conserver les propriétés souhaitées. Dans la terminologie de la théorie mathématique de la viabilité, cela revient à calculer un noyau de viabilité d'une dynamique par rapport à un ensemble de contraintes qui représente les propriétés que l'on souhaite voir durer. L'intérêt est de pouvoir ensuite déduire de toute situation contenue dans ce noyau des politiques d'actions qui permettent effectivement de conserver les propriétés souhaitées.

La méthode suivie dans ce projet est donc de modéliser les dynamiques des systèmes considérés, d'explicitier l'espace des contraintes correspondant aux propriétés voulues durables et d'adapter les algorithmes de calculs existants pour obtenir les noyaux de viabilité.

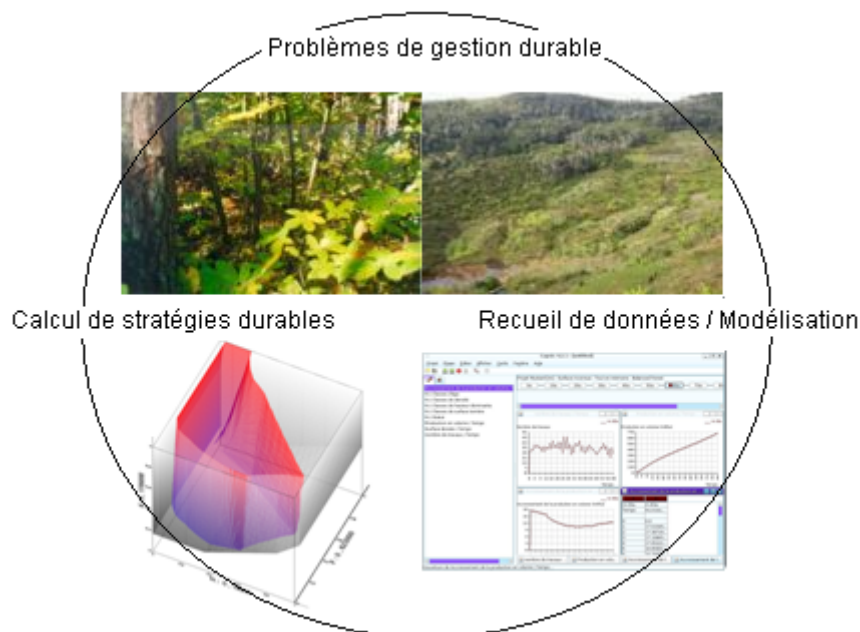
Les résultats obtenus

Deux approches complémentaires sont suivies : d'une part, résoudre des problèmes de gestion durable posés dans deux études de cas, la prescription d'actions sylvicoles en forêts tempérées, et l'arbitrage entre conservation de la forêt et l'activité agricole dans la forêt tropicale de Madagascar. D'autre part, analyser le concept de développement durable dans un cadre théorique et général, en particulier la prise en compte de l'équité intergénérationnelle. Ces problèmes de gestion durable ont été modélisés sous forme de systèmes dynamiques soumis à des contraintes et des algorithmes ont été implémentés pour les résoudre.

Production scientifique

Durant le projet Dédution, 5 articles ont été produits et acceptés, 12 sont soumis ; 10 conférences ont été données. Un module a été implémenté dans la plateforme Capsis concernant l'étude de cas des forêts tempérées. Un prototype de logiciel de calcul de bassins de capture et de noyaux de viabilité a été développé pour les problèmes de dimension dépassant 3.

Illustration



Informations factuelles

Le projet Déduction est un projet de recherche exploratoire coordonné par Sophie Martin (LISC). Il associe cinq laboratoires : le LISC du Cemagref, le CREA du CNRS/Ecole Polytechnique, l'UR 199 de l'IRD, l'UR 1263 et l'UMR 931 de l'INRA. Le projet a commencé en janvier 2007 et a duré 36 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 400 000 € pour un coût global de l'ordre de 1 000 000 €.

B.3 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

Suivre impérativement les instructions ci-dessus.

Viability theory: a contribution to sustainable development engineering

Putting forward methods to distinguish policy action that meet sustainability requirements

The issue of distinguishing actions that satisfy sustainability conditions is essential since this label is very often used to promote economic, social or political activities.

The mathematical tools of control theory have proved their efficiency in automatic control, the aim of this project is to test the use of some of them in sustainable development engineering.

Then, the works carried out in this project consist in formulating typical sustainable management problems in the agricultural field, and in developing new mathematical tools to express them and to build algorithms to solve them.

The project hence gathers an interdisciplinary association made of applied mathematics (CREA) and modeling (LISC) teams that develop methods and tools from viability theory, and partners (INRA, IRD) with an experience in the study of agricultural systems submitted to sustainable development issues.

The concepts of the viability mathematical theory adapted to sustainable management problem expressing and resolution

The concept of sustainable development includes notions of change and duration. Taking into account the notion of change implies considering the dynamics of the systems under

study; taking into account the notion of duration implies defining the system properties that have to be maintained until a temporal horizon to be précised.

Solving a sustainable management problem corresponds to determining policy actions that allow controlling the system dynamics in order to maintain the desirable properties. In the terminology of viability theory, that means computing the viability kernel of the dynamics and the constraint set that represent the properties we aim at maintaining. The interest relies on the ability of deducing for each situation inside the viability kernel the policy actions that actually allow maintaining the desirable properties.

The approach followed in this project is then to establish models of the dynamics of the systems under study, to formulate the constraint set corresponding to the desirable properties and to adapt existing algorithms to compute the viability kernels.

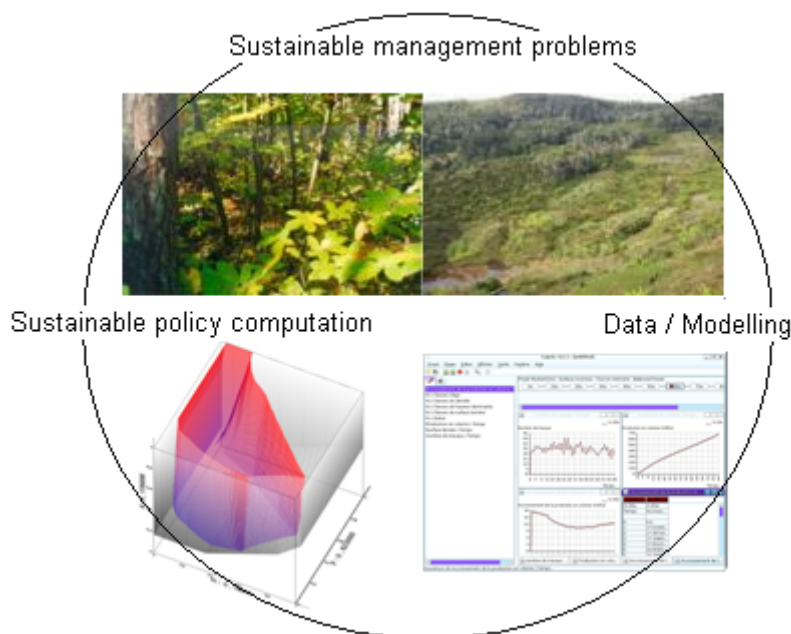
Results

Two complementary approaches have been followed: on the one hand, solving sustainable management problems in two case studies, forestry action prescriptions in temperate forest, and trade-off between forest conservation and agricultural activities in the tropical forest of Madagascar; On the other hand, analyzing the concept of sustainable development in a theoretical and general framework, especially the expression of intergenerational equity. Models have been established for these sustainable management problems in the form of dynamical systems submitted to constraints and algorithms designed and implemented to solve them.

Scientific production

During the project, 5 articles have been produced and published, 12 are submitted and 10 communications in conferences have been made. A component of the simulation platform Capsis dedicated to the temperate forest case study has been implemented. A software prototype of capture basin and viability kernel computation has been developed for problems with dimension greater than 3.

Illustration



Factual information

This project is an exploratory research project coordinated by Sophie Martin (LISC). It associates five scientific laboratories: LISC from Cemagref, CREA from CNRS/Ecole Polytechnique, UR 199 from IRD, UR 1263 and UMR 931 from INRA. The project began January 2007 and has lasted 36 months. It has benefited of an ANR subsidy of 400 000 € for a global amount of 1 000 000 €.

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

Maximum 15 pages. On donne ci-dessous des indications sur le contenu possible du mémoire. Ce mémoire peut être accompagné de rapports annexes plus détaillés.

Le mémoire scientifique couvre la totalité de la durée du projet. Il doit présenter une synthèse auto-suffisante rappelant les objectifs, le travail réalisé et les résultats obtenus mis en perspective avec les attentes initiales et l'état de l'art. C'est un document d'un format semblable à celui des articles scientifiques ou des monographies. Il doit refléter le caractère collectif de l'effort fait par les partenaires au cours du projet. Le coordinateur prépare ce rapport sur la base des contributions de tous les partenaires. Une version préliminaire en est soumise à l'ANR pour la revue de fin de projet.

Un mémoire scientifique signalé comme confidentiel ne sera pas diffusé. Justifier brièvement la raison de la confidentialité demandée. Les mémoires non confidentiels seront susceptibles d'être diffusés par l'ANR, notamment via les archives ouvertes <http://hal.archives-ouvertes.fr>.

Mémoire scientifique confidentiel : ~~oui~~ / non

C.1 RESUME DU MEMOIRE

Ce résumé peut être repris du résumé consolidé public.

La viabilité : une contribution à l'ingénierie du développement durable

Proposer des méthodes pour distinguer des choix des politiques de gestion qui puissent être qualifiés de durables

L'enjeu de la distinction entre les actions qui respectent les conditions du développement durable et les autres est considérable tant ce label est utilisé pour promouvoir des activités économiques, sociales ou politiques.

Les outils des théories mathématiques du contrôle ont montré leur efficacité en automatique, l'objectif de ce projet est d'expérimenter l'utilisation de certains d'entre eux en ingénierie du développement durable.

Les travaux menés dans ce projet consistent donc, dans le cadre de l'agriculture au sens large, à formuler des problèmes de gestion durable typiques, et à développer des outils mathématiques nouveaux pour formaliser ces problèmes de gestion durable et pour construire des algorithmes pour les résoudre.

Est ainsi rassemblée au service du projet une association d'équipes interdisciplinaire composée de laboratoires fondamentaux (CREA) et appliqués (LISC), qui développent des méthodes et outils issus de la théorie de la viabilité et de partenaires (INRA, IRD) ayant l'expérience de l'étude de systèmes de l'agriculture au sens large soumis à des enjeux de gestion durable.

Les concepts de la théorie mathématique de la viabilité adaptés pour formaliser des problèmes de gestion durable et les résoudre

Le concept de développement durable contient les notions de changement et de durée. Prendre en compte la notion de changement implique de considérer les dynamiques des systèmes étudiés ; prendre en compte celle de durée implique de définir les propriétés du système qui doivent être conservées jusqu'à un horizon temporel à préciser.

Résoudre un problème de gestion durable correspond ainsi à déterminer les politiques d'actions qui permettent de contrôler la dynamique du système de façon à conserver les propriétés souhaitées. Dans la terminologie de la théorie mathématique de la viabilité, cela revient à calculer un noyau de viabilité d'une dynamique par rapport à un ensemble de contraintes qui représente les propriétés que l'on souhaite voir durer. L'intérêt est de pouvoir ensuite déduire de toute situation contenue dans ce noyau des politiques d'actions qui permettent effectivement de conserver les propriétés souhaitées.

La méthode suivie dans ce projet est donc de modéliser les dynamiques des systèmes considérés, d'explicitier l'espace des contraintes correspondant aux propriétés voulues durables et d'adapter les algorithmes de calculs existants pour obtenir les noyaux de viabilité.

Les résultats obtenus

Deux approches complémentaires sont suivies : d'une part, résoudre des problèmes de gestion durable posés dans deux études de cas, la prescription d'actions sylvicoles en forêts tempérées, et l'arbitrage entre conservation de la forêt et l'activité agricole dans la forêt tropicale de Madagascar. D'autre part, analyser le concept de développement durable dans un cadre théorique et général, en particulier la prise en compte de l'équité intergénérationnelle. Ces problèmes de gestion durable ont été modélisés sous forme de systèmes dynamiques soumis à des contraintes et des algorithmes ont été implémentés pour les résoudre.

Production scientifique

Durant le projet Déduction, 5 articles ont été produits et acceptés, 12 sont soumis ; 10 conférences ont été données. Un module a été implémenté dans la plateforme Capsis concernant l'étude de cas des forêts tempérées. Un prototype de logiciel de calcul de bassins de capture et de noyaux de viabilité a été développé pour les problèmes de dimension dépassant 3.

C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

Présenter les enjeux initiaux du projet, la problématique formulée par le projet, et l'état de l'art sur lequel il s'appuie. Présenter leurs éventuelles évolutions pendant la durée du projet (les apports propres au projet sont présentés en C.4).

L'origine de l'expression « développement durable » est la prise de conscience dans les années 60 de la vulnérabilité de la biosphère. Cette expression désigne les efforts entrepris ou à fournir pour parvenir à concilier activités humaines (en particulier croissance économique) et préservation des écosystèmes (Carson 1962, Meadows et al. 1972). Les tentatives de définition du développement durable sont nombreuses, cependant sa signification reste vague (Mebratu 1998, Vivien 2005 et Aubertin et Vivien 2006). Son utilisation fréquente comme label, attribué souvent sans véritable justification pour promouvoir des activités économiques ou des actions politiques qualifiées de « durables », pose le problème de la

distinction entre les actions qui respectent les conditions du développement durable et les autres (Robinson 2004).

L'ingénierie écologique (Cozic 2004) propose des indicateurs, quantités mesurables ou calculables qui donnent des indications sur l'état du système, mais pas sur les actions ou politiques d'actions à entreprendre. Or le pilotage des systèmes est une activité d'ingénierie, mais les contraintes que doivent satisfaire ces indicateurs, individuellement ou combinés, ne sont pas définies. Le problème du développement durable en ingénierie écologique est généralement un problème « mal posé ».

Les théories mathématiques du contrôle ont prouvé leur efficacité dans le domaine de l'ingénierie classique. Martin (2004) a montré comment l'une de ces théories, la théorie de la viabilité, permet de calculer la résilience dans les modèles de systèmes écologiques et sociaux. Cette possibilité de modèle faisant le pont entre systèmes écologiques et sociétés est essentielle, comme l'ont montré Hervé et Laloë 2009. Or, les notions de résilience et de développement durable sont très liées (Gunderson et Holling 2002, Kates et al. 2001).

L'objet de la théorie de la viabilité (Aubin 1991) est d'expliquer mathématiquement et numériquement les évolutions gouvernées par des « systèmes évolutionnaires », qui apparaissent en économie, en écologie, en biologie, etc., aussi bien qu'en automatique. De tels systèmes ne sont pas déterministes, mais régissent sous incertitude des évolutions soumises à des contraintes de viabilité (ou d'optimalité intertemporelle) et guident ces évolutions vers des cibles afin de les atteindre en temps fini. Il s'agit essentiellement de faire émerger les rétroactions sous-jacentes qui permettent de réguler le système et de trouver des mécanismes de sélection pour les mettre en œuvre. Deux concepts clés de cette théorie sont le noyau de viabilité (l'ensemble des situations à partir desquelles il existe une fonction de contrôle qui permet de maintenir le système dans l'ensemble des contraintes) et le bassin de capture ((l'ensemble des situations à partir desquelles il existe une fonction de contrôle qui permet de maintenir le système dans l'ensemble des contraintes jusqu'à atteindre une cible).

La théorie de la viabilité est maintenant souvent utilisée dans les études sur l'environnement, en particulier dans les problèmes de gestion de ressources naturelles (Mullon et al. (2004), Martinet et Doyen (2007), Doyen et al., (2007), Béné et Doyen (2008) et Chapel et al. (2008)).

Ainsi, l'objectif de ce projet est de tester l'hypothèse selon laquelle le formalisme de la théorie de la viabilité associé à l'évaluation de propriétés comme la résilience constitue un outil efficace pour l'ingénierie du développement durable dans le cadre de l'agriculture au sens large.

Nous avons pris le parti d'une diversité d'approche : Bottom-Up et Top-Down. Pour l'approche bottom-up, nous avons choisi deux études de cas. Elles portent d'une part sur les forêts tempérées dans le cadre de la prescription d'actions sylvicoles, et d'autre part sur le corridor forestier de Fianarantsoa (Madagascar) dans le cadre de l'arbitrage entre conservation de la forêt et modalités d'intensification de l'agriculture. L'approche Top-Down a porté sur les analyses du développement durable menées dans un cadre théorique et général pour compléter ces deux applications très particulières (forêt tempérée et forêt tropicale). Si les modèles diffèrent en raison des problématiques très différentes de ces trois aspects du développement durable, les développements mathématiques, algorithmiques et informatiques nécessaires pour le calcul des ensembles et fonctions d'ensembles dans le cadre viabiliste sont communs à ces toutes ces approches. Les résultats exploratoires sur la validité des méthodes viabilistes pour aborder ces trois aspects des recherches sur le développement durable (ressource exploitée, ressource sauvage et cadre conceptuel) sont

destinés à être exploités dans le cadre de futurs appels d'offre sur des problématiques ciblées que ce projet sert à identifier.

Cas des forêts tempérées

Les changements climatiques qui affectent la planète entraînent des modifications importantes des conditions de développement des écosystèmes (Bakkenes et al., 2002). Lorsque, par exemple, on envisage une augmentation de la température de plusieurs degrés, on peut s'attendre à ce que les communautés sylvicoles actuellement adaptées à une région donnée ne puissent survivre, et soient progressivement remplacées par des communautés vivant actuellement dans des zones plus chaudes. C'est ce qu'on représente parfois très schématiquement en imaginant un décalage latitudinal des zones de répartition des différentes espèces vers le nord, ou bien, dans les régions de montagne, un décalage de l'étagement altitudinal vers le haut (Vitasse et al., 2009). Encore faut-il, bien sûr, que les espèces puissent effectivement migrer, ce qui pour les végétaux ne peut se faire que progressivement, par la diffusion des graines de générations en générations. Ce ne sera possible que si leur dynamique est assez rapide par rapport à celle du changement climatique, ou si des actions anthropiques facilitent cette migration.

En forêt tempérée, les choses ne se feront certainement pas toutes seules, d'une part parce que la dynamique des peuplements forestiers est très lente (une génération est de l'ordre d'une centaine d'année en moyenne), et d'autre part parce que ces forêts sont gérées, et que le choix des espèces qui se développent dans un peuplement donné est majoritairement une décision anthropique. C'est donc le gestionnaire forestier qui va devoir anticiper l'impact des changements climatiques sur les peuplements, et adapter en conséquence ses choix de régénération ou de plantation de peuplements forestiers (Seppälä et al., 2009).

Ainsi dans une zone donnée, une espèce d'arbre actuellement bien adaptée risque de devenir de moins en moins adaptée, de voir sa croissance diminuer et sa mortalité augmenter. Il faudra à terme la remplacer par une autre espèce, qui aujourd'hui ne présente pas forcément d'intérêt dans cette zone, mais qui sera plus adaptée dans un contexte climatique futur. Le problème, c'est qu'on ne peut pas envisager de changer d'un coup tous les peuplements d'un massif forestier d'une espèce donnée en une autre espèce. La dynamique forestière est lente, la vie d'un peuplement est de l'ordre du siècle, et la régénération ou la plantation d'un peuplement sont des actions difficiles et coûteuses. Il faut donc planifier un tel changement assez longtemps à l'avance pour le faire progressivement et utiliser au mieux les processus naturels.

Cas des forêts tropicales humides : le corridor forestier de Fianarantsoa

Le cordon forestier Est représente, le long des hauts plateaux, ce qui reste à Madagascar de la forêt tropicale humide, où des aires protégées sont reliées par des « corridors » parsemés de dispositifs de conservation par zonage, contractualisés et gérés par des groupements villageois. Les injonctions du développement durable poussent à concilier cette conservation de la forêt et des modalités d'intensification de l'agriculture (riziculture de bas-fonds et abattis-brûlis sur pente) permettant d'améliorer les conditions de vie des populations riveraines. Au Centre Est de Madagascar, le corridor forestier de Fianarantsoa est menacé de fragmentation. Le paysage tend progressivement vers une mosaïque forêt-agriculture, avec des déforestations différentes dans leurs dynamiques sur les versants ouest et est, de part et

d'autre d'un cordon, en altitude, qui restera en forêt. Les défriches sur forêt peuvent encore s'étendre sur les bas de pentes à partir des bas-fonds aménagés en rizières pour des cultures alimentaires, jusqu'à ce que leur interdiction conduise à des reports vers d'autres couverts végétaux, jachères ou peuplements de pins. La prochaine saturation des bas-fonds aménageables et l'observation de fragmentations forestières pouvant conduire à des situations stables nous interrogent sur l'étape de la transition forêt-agriculture dans laquelle se trouve le corridor de Fianarantsoa, et plus largement la forêt humide est malgache.

Trois questions se posent :

- Quelle est la résilience de ces forêts humides d'altitude après mise en culture par abattis-brûlis et comment évolueront leurs surfaces ?
- Quelle est la stabilité et la durabilité d'une mosaïque paysagère forêt-agriculture qui garantisse à la fois un maintien de la biodiversité et une production vivrière suffisante pour les populations riveraines ?
- Quelle est la viabilité des systèmes d'exploitation paysans qui vivent de la forêt, dans différentes configurations de « mise en défens » (depuis l'exclusion jusqu'à des usages réglementés des ressources forestières) ?

Les paiements pour services environnementaux constituent une piste d'action pour rendre efficaces et durables des actions de conservation de ces forêts humides par les usagers de ces forêts eux-mêmes (Karsenty et Pirard 2008).

C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

L'objectif du projet Dédution est de proposer des outils pour distinguer des développements durables de ceux qui ne le seraient pas en combinant deux approches : la première pouvant être qualifiée de « théorique », quelles sont les conditions d'un développement durable sans référence à un système particulier ; la seconde pouvant être qualifiée de « pragmatique » s'appuyant sur les connaissances des équipes partenaires thématiques définissant et cherchant à résoudre des problèmes de gestion durable propres aux systèmes étudiés et constituant deux études de cas.

C3-1 : Une recherche exploratoire

Le projet est une recherche exploratoire portant sur les concepts de développement durable et conduisant à la fois

- au développement de nouveaux outils mathématiques,
- à des développements algorithmiques et informatiques pour les mettre en œuvre,
- et appliquée à des situations et problématiques concrètes de développement durable : un problème de gestion forestière et un problème de déforestation.

Le projet regroupe ainsi des équipes de mathématiciens, informaticiens et de thématiciens.

C3-2 : Identification des problèmes de développement durable

- Approche théorique : Développement durable et équité intergénérationnelle :

Face aux nombreuses définitions, approches, revendications et utilisations du développement durable, il a semblé important dans ce projet de modélisation exploratoire de mener une réflexion sur le concept de développement durable en amont des deux cas d'application choisis, à la fois différents et singuliers. Le développement durable est un thème, souvent un objectif, transverse à presque toutes les disciplines de sciences sociales,

sciences physiques, sciences biologiques ou de sciences de l'ingénieur. Nous avons repris les analyses économiques du développement durable considérant que cette discipline offrait l'approche conceptuelle la plus générale et transversale. A la différence des cas d'application sur la forêt où les problèmes ont dû être préalablement analysés pour concevoir des modèles avant de les traduire en termes de viabilité, les modèles théoriques de développement durable sont déjà disponibles en économie. Le modèle canonique de base qui sert de support à ces recherches est celui de Ramsey (1928) destiné à étudier le mode de répartition entre générations de l'épargne et de la consommation pour atteindre un équilibre stable de croissance optimale. Ce modèle a été repris en 1974 par Solow et par Heal et Dasgupta pour inclure l'existence de ressources finies dans ce modèle de croissance optimale. Dans ce cadre, le développement durable est

- Présenté comme un problème d'équité entre générations, en accord avec la définition du rapport Brundtland
- En horizon infini, on ne peut concevoir d'arrêter l'intérêt pour les générations futures à une date donnée même extrêmement lointaine
- Sous contrainte de ressources finies, épuisables ou renouvelables si on conçoit leur épuisement (préoccupations de conservation).

Le problème qui se pose est celui du choix d'un critère d'équité entre générations de façon à ce qu'aucune d'entre elles ne soit « injustement discriminée » du fait de sa position dans l'échelle des temps et prenant en compte le fait que, se succédant à l'infini, elles sont dans une liaison univoque. Le résultat de ces modèles d'optimisation inter-temporelle dépend du critère choisi. Le plus courant, et le plus critiqué, de ces critères est celui de la maximisation d'une somme infinie d'utilités escomptées. Ce problème ne relève pas des seuls débats théoriques car ce critère est utilisé dans la plupart des études qui engagent le long terme en particulier celles qui cherchent à évaluer l'impact du changement climatique posant la question du choix d'un taux d'actualisation de long terme.

L'autre problème de ces modèles qualitatifs est la difficulté d'endogénéiser les nombreux paramètres de régulation de la dynamique d'évolution (progrès technique, évolution démographique par exemple) impliquant des hypothèses restrictives. Ainsi, la population est généralement considérée comme constante, sorte de pire des cas pour évaluer les possibilités d'existence d'une trajectoire de développement durable en présence de ressources finies, ou alors avec une loi d'évolution fixée a priori indépendamment de l'évolution des variables d'état.

Deux études utilisant les outils de la viabilité ont abordé ce sujet en reprenant le modèle de Dasgupta-Heal et Solow. Le premier travail est celui de Martinet et Doyen (2007) qui considèrent le développement durable comme le respect en tout temps de contraintes de viabilité. Cela leur permet de généraliser les résultats acquis par les recherches précédentes mais il n'est pas tenu compte dans leur étude de la croissance de la population et, s'ils indiquent que la justice intergénérationnelle consiste en la possibilité de transmettre un montant minimum de « droits » (renforcement des contraintes), en termes de consommation et de ressource préservée, aucune méthode d'arbitrage entre ces droits antagoniques est proposée (un ensemble de Pareto). La seconde étude est celle de Bonneuil et Boucekine (2009) qui situent leur travail dans le cadre du modèle de Ramsey à un seul bien (les ressources épuisables ne sont pas distinguées dans ce modèle), reprenant le critère de maximisation de la somme des utilités escomptées. Ils montrent les liens entre optimalité, viabilité et durabilité, les outils de la viabilité pouvant également être utilisés pour rechercher les solutions optimales d'un problème de contrôle (l'épigraphe de la fonction

valeur est le noyau de viabilité d'un problème de contrôle étendu). La résolution de ce modèle dans le cadre viabiliste permet de rendre plus « opérationnelle » la distinction entre durabilité et optimalité faite par Arrow et al. (2004) proposant de considérer le développement durable comme la non décroissance de la fonction de bien être intertemporelle (somme infinie des utilités escomptées) et non forcément sa maximisation. Leurs calculs sont effectués en variables par tête mais avec un taux de croissance démographique fixe.

Savoir comment définir/formaliser/évaluer l'équité intergénérationnelle est un problème plus difficile que celui de l'équité intra-générationnelle toujours objet de recherches pour l'appréhender et le mesurer. Nous avons repris le travail de Martinet et Doyen sur le modèle à deux biens de Dasgupta-Heal et Solow (une ressource manufacturée et une ressource épuisable) considérant la durabilité comme le respect en tout temps de contraintes de viabilité pour y introduire un nouveau critère d'équité intergénérationnelle.

- Approche pragmatique : Cas de la gestion sylvicole en forêts tempérées

Dans ce projet, nous avons proposé d'explorer comment un tel changement d'espèces forestières peut être mis en place progressivement pour s'adapter aux modifications des performances des essences forestières dans le cadre du changement climatique. La question de développement durable que nous avons proposé peut se formuler ainsi :

Quelle gestion sylvicole durable mettre en place pour anticiper l'effet du changement climatique en termes de changement progressif d'espèces dans un massif forestier ?

Pour explorer cette question, il nous a semblé impossible aujourd'hui de se placer dans un cas réel qui correspondrait à des peuplements précis. En effet, nous n'avons pas encore de vision assez précise des changements climatiques à venir pour prédire le comportement des essences forestières, et déterminer quelles sont les essences qui seront le plus adaptées à une région donnée dans 100 ans. En outre, nous n'avons pas non plus assez de données pour ajuster et valider des modèles de croissance et de mortalité dans le cadre du changement climatique.

Nous avons donc choisi, dans ce projet, d'étudier un cas théorique très simple : le remplacement progressif d'une essence A (dont la productivité baisse et la mortalité augmente au cours du temps suite au changement climatique) par une essence B (dont la productivité augmente). La question retenue nous a amenés très naturellement à travailler à l'échelle d'un massif forestier, échelle à laquelle est raisonnée la gestion à long terme, et en particulier les choix de remplacement des essences lors des épisodes de régénération. Nous avons alors considéré qu'un massif est un assemblage de parcelles, chaque parcelle représentant un peuplement. Nous avons choisi de travailler sur des peuplements purs et réguliers de l'espèce A ou de l'espèce B.

- Approche pragmatique : Cas de la déforestation en forêt tropicale humide considéré comme un problème d'adéquation entre population et ressource

La forêt malgache est très riche en biodiversité, en grande partie endémique. La forêt tropicale humide qui caractérise le rebord de la falaise à l'est des Hauts Plateaux, n'est plus de la forêt primaire qui n'aurait jamais été atteinte par l'action de l'homme (Carrière et al., 2007). La biodiversité des forêts est alimentée par les zones cultivées adjacentes et réciproquement. Les zones d'agriculture de subsistance où se pratiquent abattis-brûlis puis

jachères sont des zones de grande biodiversité qui présentent un intérêt écologique (Randriamalala et al., 2007). Les jachères ou recrûs ont aussi un intérêt économique pour les paysans (réserve foncière d'ajustement, reconstitution de la fertilité des sols, zone de pâturage, source d'une grande variété de produits de collecte). Il n'y a pas a priori d'incompatibilité entre la protection de la biodiversité et le maintien d'une agriculture de subsistance dans le corridor, les deux objectifs devraient pouvoir se combiner avec un bénéfice réciproque.

Cependant, les rizières s'étendent dans les bas-fonds aménagés et les cultures de manioc sur les pentes défrichées sur la forêt : en l'absence de titres de propriété, la terre appartient à celui qui la défriche et qui la cultive.

Basés sur le constat que l'espace occupé par la forêt diminue, des dispositifs de conservation de la forêt ont été mis en place sous forme de mises en défens spatiales de portions de forêts, soit centralisées en aires protégées, soit décentralisées en transferts de gestion des Eaux et Forêts aux villageois (Hervé et al., 2008). L'intention est de relier entre elles ces zones protégées et, dans le second cas, d'y intégrer des recrûs forestiers post-cultureux. En effet, ces écosystèmes forestiers sont résilients : en absence de feu, de défriche, de labour ou de pâturage, une parcelle abandonnée redevient forêt.

Le corridor forestier de Fianarantsoa est ainsi confronté à un problème de conservation : l'abattis-brûlis s'oppose au couvert forestier, et la généralisation d'une agriculture pérenne à jachères, aux possibilités de régénération forestière.

La question de développement durable que nous proposons peut se formuler ainsi :

Quelles sont les conditions de co-existence entre agriculture de subsistance et conservation de terres forestières, traditionnel lieu d'expansion ?

L'espace forestier, potentiel réservoir de terres de culture, est un espace fini, dont il faudra définir la surface minimum à préserver pour maintenir sa fonction de conservation de la biodiversité. Dans cet espace fini, quelles sont les conditions d'une co-existence entre agriculture de subsistance et conservation des terres forestières ? Quelles pratiques agricoles, dans quels paysages agro-forestiers, garantiront un développement durable ?

Pour explorer cette question, nous proposons un premier modèle simplifié qui se concentre sur la dynamique d'aménagement de bas-fonds de vallées en rizières par une population du corridor forestier de Fianarantsoa (Rakotoasimbahoaka et al., 2007, 2010). Nous faisons l'hypothèse que la défriche des pentes est une conséquence de cet aménagement. Nous supposons ensuite que la décision d'aménager de nouvelles rizières est liée au maintien de la viabilité de cette population, c'est à dire au maintien d'un certain niveau de production de riz par habitant, alors que la population augmente régulièrement. Nous supposons également que l'aménagement d'une nouvelle surface requiert un investissement, donc un certain capital. Nous concevons ce modèle a priori au niveau d'un village ou d'une famille étendue sans distinguer ses membres. Ces ressources humaines pourraient s'investir sur d'autres activités sources de revenus si celles-ci existaient. Par ailleurs un nouveau paradigme foncier sera à définir une fois que tous les bas-fonds seront aménagés en rizières. Pour l'instant, nous considérons un seul bas-fond, mais à l'avenir, il est possible d'introduire une graduation de l'effort d'aménagement de bas-fonds de plus en plus éloignés des habitations. De même, nous négligeons dans un premier temps les cultures sur les pentes. La résolution de ce problème de viabilité donnera un point de vue sur la logique des décisions des agriculteurs et leur adaptation aux interdictions d'exploiter la forêt.

- Approche pragmatique : Cas de la déforestation en forêt tropicale, problème de paiements environnementaux :

Sur la base de modèles économique existants (Bernard 2008 et Domenech et al. 2010), l'un relatif au maintien de la biodiversité dans la forêt tropicale humide du corridor forestier de la région de Fianarantsoa et l'autre à la gestion de la forêt tropicale sèche du Pays Androy dans le sud de Madagascar (dont la préservation est fragilisée par la pression démographique et par le système économique où la richesse se mesure en nombre de tête de zébu nécessitant la mise en pâturage d'espaces forestiers considérables), il est apparu clairement que la viabilité de ces systèmes, où interfèrent démographie, économie et environnement, était impossible. Cependant, il est possible de mesurer la durée de vie de tels systèmes, de déterminer les politiques qui permettront de repousser le plus possible la date butoir après laquelle l'une ou l'autre des contraintes physique ou normative sera nécessairement violée (seuil de pauvreté, seuil de déforestation, seuil de pollution). Il est également possible, et cela l'a été pour la première fois dans un contexte dynamique et global, de chiffrer par exemple le coût marginal du maintien de la biodiversité ou de la valeur "carbone" d'un hectare de forêt dans le contexte actuel. Cela a permis de mesurer l'impact économique des différents facteurs influant sur la pérennité des systèmes et d'évaluer les paiements environnementaux minimaux permettant d'assurer cette pérennité ainsi que les stratégies optimales associées.

C.4 RESULTATS OBTENUS

Positionner les résultats par rapports aux livrables du projet et aux publications, brevets etc. Revisiter l'état de l'art et les enjeux à la fin du projet.

C4-1 : Concernant les problèmes de développement durable identifiés :

C.4-1-1. Le développement durable, un problème d'équité intergénérationnelle :

Avoir un objectif d'équité intergénérationnelle dans un modèle de viabilité consiste à introduire un « contrôle » permettant de réguler le comportement de chaque génération de façon à ce qu'aucune d'entre elles ne soit sacrifiée par les choix présents ou précédents. Il ne s'agit plus ici de comparer des scores, en termes de fonction de bien être social, obtenus à travers des prévisions de trajectoires issues d'une situation initiale (supposant la connaissance du futur), mais de déterminer l'ensemble des situations initiales à partir desquelles il existe au moins une trajectoire respectant les contraintes de viabilité y compris celle décrivant une forme d'équité. Nous avons considéré que le pourcentage de variation de la consommation par tête entre générations successives pouvait constituer une mesure ce critère d'équité intergénérationnelle. L'évolution de la population est une composante importante des problèmes de développement durable (voir par exemple les cas d'application sur la forêt malgache) et il est apparu nécessaire d'établir les résultats en termes de variables par habitant. L'introduction de *fluctuations endogènes* du niveau de population est une autre innovation apportée par le modèle qui a été réalisé. Celui-ci comporte trois régulateurs pouvant être modifiés à chaque génération pour s'adapter aux contraintes de viabilité en fonction de l'évolution des variables d'état : le taux de croissance démographique, le taux d'extraction des ressources et le pourcentage de variation du niveau de consommation par tête, et quatre variables d'état (le niveau par habitant du capital produit, de la consommation et de la ressource ainsi que la population). Pour cette forme d'équité visant à minimiser les « écarts de niveau de vie » entre générations successives, nous n'avons imposé de contraintes que sur le pourcentage de réduction de la consommation par habitant, autorisant ainsi l'amélioration

du niveau de vie à travers les générations dès lors que l'ensemble des contraintes de viabilité sont respectées. Nous montrons comment déterminer, sur l'ensemble de toutes les trajectoires viables et (plus ou moins) équitables, celle présentant la plus grande des équités, selon une méthode, différente, d'optimisation inter-temporelle (avec un critère de type « Sup Inf » et non de type « intégrale »).

Ce travail a donné lieu à un article accepté pour publication (Durand et al, 2010) présentant ce concept d'équité et des exemples de calculs de trajectoires (Figure C4), et un autre en cours de finalisation où le calcul des ensembles est « calé » sur des données réelles pour présenter une typologie des pays durables et non durables dans l'esprit de l'étude réalisée par Arrow et ses co-auteurs, le « degré » d'équité que ces pays peuvent espérer et les « marges de manœuvre » dans la combinaison des choix en termes de consommation, extraction de ressources ou de démographie que ces pays peuvent avoir ou pas.

C.4-1-2. Cas de la gestion sylvicole en forêts tempérées, un problème de gestion coupe/substitution d'espèces dans le cas d'un changement climatique

Dans une première étape du projet (Goreaud et al. 2007), nous avons défini le problème de gestion durable retenu pour le cas d'application aux forêts tempérées : une question générique très simple, le remplacement progressif d'une essence A (dont la productivité baisse et la mortalité augmente au cours du temps suite aux changements climatiques) par une essence B (dont la productivité augmente). Pour cette première étape, une formulation détaillée du modèle a été écrite de façon à ce que tous les grands processus biologiques et économiques soient décrits de la façon la plus générique possible. Dans un second temps, nous avons proposé un modèle agrégé simple à l'échelle des parcelles permettant d'étudier cette question, en simulant l'évolution des parcelles d'un massif forestier (Goreaud et al., 2007). Nous avons utilisé les paramètres de modèles existants et des données de la bibliographie, pour définir une gamme de valeurs réalistes des paramètres que nous avons affecté à nos peuplements théoriques A et B. Pour l'espèce A, une espèce résineuse utilisée actuellement pour la production de bois, nous nous sommes inspirés du Pin Maritime, qui correspond au modèle PP3. Pour l'espèce B, une espèce de régions plus arides, nous avons choisi l'Eucalyptus.

Nous avons modélisé l'évolution du massif en couplant ces différents modèles utilisés pour chaque parcelle, et nous avons implémenté le tout dans un module spécifique « Mustard » sous la plateforme de simulation Capsis.

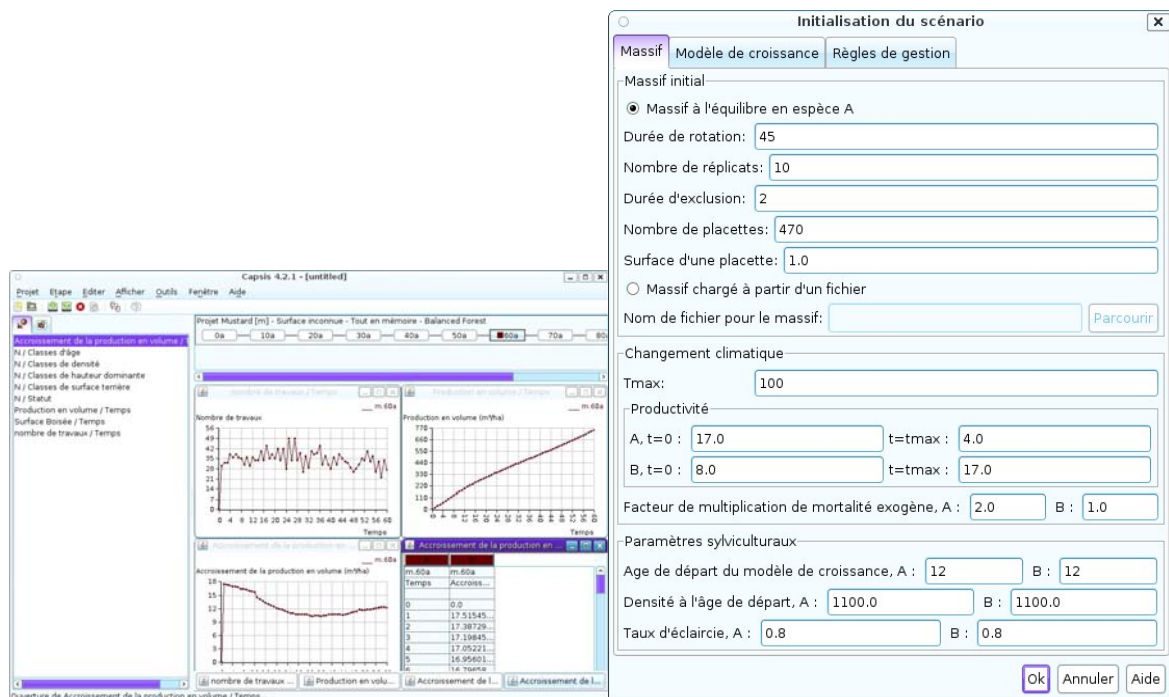


Figure C0 : Copies d'écran du module "Mustard" de la plateforme Capsis

Dans un premier temps, pour traiter le problème de gestion durable de cette étude de cas, nous avons utilisé un modèle à temps discret simplifié avec deux espèces d'arbres et trois classes d'âge (Figure C5).

Dans un second temps, Aubin et al. (2007) ont présenté une version en temps et âges continus de ces équations (cf C.4.2.1). L'ensemble des contraintes, le bassin de capture, et deux exemples de trajectoires viables obtenus avec cette version sont représentés figures C6, C7 et C8.

C.4-1-3. Cas de la déforestation en forêt tropicale humide, un problème d'adéquation entre population et ressource :

Les étapes de modélisation engagées avant le démarrage de Déduction se sont poursuivies à Madagascar dans trois directions : (1) le traitement des transitions post-forestières par différentes approches, chaînes de Markov (HDR Rivo Rakotozafy 2010, thèse Angelo Rahenirina 2012, thèse de Venot Ratiarson 2010), automates temporisés et modèles à base d'agents (thèse Venot Ratiarson 2010), (2) l'estimation indirecte de la déforestation par l'aménagement des bas-fonds dont la saturation est modélisée à l'échelle des communes sur le corridor forestier de Fianarantsoa (thèse Cyprien Rakotoasimbahoaka 2011, travaux de télédétection de Avisoa Randrianarison et Aimé Richard Hajalalaina, travaux sur les données de population et de surface de bas-fonds par des étudiants en géographie), (3) la régulation institutionnelle de la conservation (DEA puis thèses de Thierry Ganomanana et Jean-Hyacinthe Ramaroson, HDR Solo Randriamahaleo 2010).

Des explorations markoviennes des transitions post-forestières à 4 états d'occupation du sol (Forêt, Culture, Jachère, Herbe), on espère (1) obtenir des explications de l'émergence de l'état Herbe et des évolutions possibles de cet état vers une bifurcation définitive en herbe ou vers une régénération forestière retardée, (2) connaître le fonctionnement des états agronomiques intermédiaires (cycles Culture-Jachère), (3) déterminer les seuils

d'intensification des cultures (taux limite du rapport des temps de séjour en culture sur les temps de séjour en culture +jachère) selon la baisse de fertilité prévisible. L'étude des états intermédiaires est destinée à repérer les voies d'augmentation de la production agricole en évitant de défricher de nouvelles parcelles forestières. En d'autres termes, mieux gérer cette phase intermédiaire et assurer sa pérennité permettraient, d'une part de conserver des parcelles destinées à la régénération forestière, et d'autre part de réguler la part du labour des couverts herbacés dans les nouvelles parcelles cultivées. Ces conflits d'usage sont à mettre en relation avec les besoins fourragers de l'élevage de zébus.

Malgré le peu de données disponibles (série de 30 ans), une analyse markovienne des successions végétales a été possible, qui est une étape dans la compréhension de la dynamique de la transition forêt – agriculture. Mais le test d'obtention d'un état stationnaire ne fournit pas des voies d'action et d'infléchissement éventuel des dynamiques observées. Ce résultat indique qu'une étude de viabilité peut être plus pertinente.

Parmi ces trois chantiers de modélisation, le deuxième a été choisi comme base d'étude pour construire un modèle de viabilité d'une population riveraine de la forêt à préserver.

Dans le cas malgache de la forêt tropicale humide, et ses transitions agricoles ou pastorales, il s'est avéré très difficile d'arriver à une représentation simple de la réalité complexe exprimée par les différentes recherches menées sur le terrain en écologie, en agronomie et en socioéconomie. L'établissement d'un consensus sur les variables clefs (contraintes et contrôles) ont également été objet de nombreux débats interdisciplinaires. L'écriture de ce modèle par Claire Bernard, dans le cadre de sa thèse, a donc fait l'objet de nombreux échanges à Madagascar puis par courrier électronique, avec une série de versions provisoires et d'éclaircissements en cours de route. Parmi les nombreuses questions pour identifier le problème, il y a :

- capital individuel versus capital commun ;
- main d'œuvre disponible, dynamique et composition familiale ;
- stratégies d'accumulation du capital et d'assurance contre le risque
- prise en compte d'amélioration des pratiques culturelles
- prise en compte dans l'effort d'aménagement à la fois de l'aménagement des bas-fonds en rizières et des défriches sur pentes ;
 - non différence entre surface aménageable et surface cultivable, faible différence possible entre surface aménagée et surface cultivée, du fait que l'important effort d'aménagement doit être rapidement amorti ;
 - si l'accès à la forêt est limité, du fait de la conservation, les surfaces en non forêt se trouveront également limitées, en rizières jusqu'à la saturation des bas-fonds, puis en cultures sur pentes jusqu'à la limite de la forêt conservée ;
- relation entre population et forêt mitigée par la décision d'aménager, elle-même dépendante du capital mobilisable, puisqu'il s'agit d'un investissement en travail ;
- questions posées par la transmission du capital commun aux générations futures.

Les données disponibles pour ces variables agronomiques ou économiques, recueillies par des agronomes, géographes et écologues, n'étaient souvent pas à la même échelle. En collaboration avec Pablo Domenech, nous avons mené une recherche approfondie de références sur la dynamique de la population et sur la couverture forestière à Madagascar. Des compléments de terrain ont été réalisés fin 2009 et tout début 2010, pour combler certaines lacunes.

La construction de ce modèle a donc suscité de nombreuses réflexions sur les données et les modèles qui ont été valorisées avec la participation de D. Hervé aux séminaires : Changer pour durer (Cerisy, nov 2009) et Géopolitique et Environnement à Madagascar (Orléans, 3-4/12/09 et Antananarivo, fin octobre 2010).

Le modèle finalement identifié par Claire Bernard a pu prendre en compte, de façon stylisée, toutes ces contraintes et stratégies agronomiques, les contraintes économiques et une évolution démographique endogène de la population locale. Le problème de « développement durable » dans le corridor de Fianarantsoa consiste à concilier durablement les besoins économiques de la population locale et la conservation forestière par mise en défens. Les surfaces de terre disponibles étant bornées, le niveau de vie des populations est régulé d'une part par des transferts monétaires (migrations de travail ou/et paiements environnementaux), d'autre part par l'évolution démographique (fertilité, migrations). Ces diverses stratégies peuvent être comparées ainsi que le niveau et l'effet des paiements environnementaux et des salaires perçus à l'extérieur sur la démographie des familles et les surfaces cultivées/défrichées (Figure C2).

C.4-1-4. Cas de la déforestation en forêt tropicale sèche, problème de paiements environnementaux :

A la suite de travaux initiés en 2006 sur la forêt mondiale et réalisés en collaboration avec des chercheurs du GERAD (HEC et Ecole Polytechnique de Montréal), des résultats, devant être publiés en 2010 (Domenech et al. 2010), ont été obtenus dans le cadre du projet Déduction concernant la fonctionnalité de la forêt mondiale comme puits de carbone (Figure C1).

Différentes extensions des méthodes issues de la Théorie de la Viabilité ont ainsi été développées dans le cadre du projet Déduction et les algorithmes ont été implémentés pour analyser la viabilité de différents modèles dynamiques relatifs à divers aspects de la gestion de la forêt. Ces méthodes ont ainsi été également appliquées à un modèle de gestion de la forêt sèche du Pays Androy dans le sud de Madagascar.

Ce modèle décrit, dans une échelle de temps discret ajusté aux connaissances et données socio-économiques obtenues auprès des instituts nationaux et internationaux, l'évolution de la population Tandroy, le stock de la forêt de la région Androy et le capital de cette population intégrant : les taux de natalité (contrôle), de mortalité b (constant) et de migration (variable endogénéisée dépendant du différentiel entre les revenus per capita régional et national), les déforestations spécifiques à l'activité agricole locale (3 types) et les revenus associés à chaque activité ainsi que le montant de transfert monétaire indéterminé a priori.

En introduisant des contraintes de consommation per capita, de production, de préservation a minima de la richesse et des surfaces forestières nécessaires pour assurer l'économie locale, on peut valider numériquement que l'actuelle situation dans ses trois composantes démographique, environnementale et économique n'est pas viable au sens où il n'est pas possible, avec les leviers (contrôles) usuels, de maintenir l'état du système dans l'ensemble des contraintes prescrites sans ajuster le paramètre représentant le transfert monétaire de manière significative représentant le coût environnemental indispensable et minimal pour assurer un développement durable de la région Androy (Figure C3).

Au delà de ce résultat qualitatif, cette méthode permet de déterminer les stratégies optimales assurant le maintien de la survie de cette population en termes de développement démographique (effort pour réduire la natalité, diversification des activités économiques

pour maîtriser les flux économiques) et surtout le coût financier marginal et dynamique de chaque contrainte. Ce travail est loin d'être achevé. Il devrait permettre de fournir des réponses à des questions de durabilité telles que celle du financement dans le temps de la restauration des conditions environnementales indispensables pour la survie de ces entités régionales particulièrement fragiles.

C4-2 : Concernant les développements mathématiques

C.4.2.1 Gestion structurée en âge des forêts

La question de la gestion « structurée » en âge des forêts au fil du temps (gestion dynamique) ne faisait pas partie explicitement du projet Dédution. Cependant, la première réunion en 2007 mettant en présence les chercheurs du consortium l'a soulevée. Il a été décidé d'aller au-delà de ce qui était prévu et d'investiguer comment réunir les compétences des spécialistes des forêts, des mathématiciens et des informaticiens pour répondre à cette question.

Le point de départ de cette étude fut l'objet de l'article de Goreaud et al. (2007) décrivant un modèle mathématique en temps et âge discrets de l'évolution de plantations sur des parcelles homogènes en âge de plusieurs espèces d'arbre, intégrant de très nombreux aspects.

Si les modèles en temps et âge discrets se prêtent bien aux techniques de simulation, les versions en temps et âge continus permettent d'utiliser les techniques d'analyse mathématique, d'équations aux dérivées partielles structurée en âge rentrant dans le cadre des équations de type McKendrick, Lotka, Volterra, et de techniques relevant de l'analyse convexe et de la théorie de la viabilité.

Aubin et al. (2007) ont présenté une version en temps et âges continus de ces équations pour les rendre aptes à un traitement mathématique et informatique. Cette version a cependant été élaguée pour ne retenir que

1. les variables de temps et d'âge, et le nombre d'arbres (ou la surface terrière qu'ils occupent) de deux espèces différentes sur une parcelle donnée ;
2. la prise en compte des contraintes de viabilité portant sur la surface terrière en fonction du temps et de l'âge, cette question de viabilité faisant l'objet essentiel du projet Dédution, mais étendue ici au cas des inclusions aux dérivées partielles.

Cette version se restreint alors à la recherche

3. d'une politique de plantation à chaque date ;
4. d'une politique de coupe des arbres pour les arbres de chaque tranche d'âge.

Cela a conduit à un système d'équations aux dérivées partielles dont le nombre est égal aux espèces considérées, deux en l'occurrence.

La théorie de la viabilité a permis de formaliser mathématiquement ce problème, d'en fournir la solution et d'en dériver ses propriétés. Celle-ci s'exprime en termes de bassin de capture de cible, dont on connaît de nombreuses propriétés et pour lesquels des algorithmes dits de viabilité permettent de calculer la solution répondant aux questions posées.

Cependant, les logiciels mettant en œuvre ces algorithmes manipulent des ensembles. Le logiciel de viabilité se décompose en un noyau de calcul de la rétroaction et un module de gestion utilisant cette rétroaction pour permettre de calculer les plantations et la politique de coupes. Le noyau de calcul de la rétroaction relève des « méthodes de grille » gourmands en taille mémoire et en temps de calcul. Mais il est calculé en amont, et une fois pour toutes. L'utilisateur a accès au module de gestion, qui, lui, est en temps réel.

Les algorithmes de viabilité disponibles n'étaient pas conçus pour calculer noyaux de viabilité et bassins de capture au-delà la dimension 3, alors qu'avec deux espèces d'arbres, la dimension requise s'élevait à six variables d'état et deux variables de commande (les coupes). La question se posait de reprendre les logiciels de viabilité valables pour toute dimension d'une part, et d'utiliser des nouvelles techniques (calcul parallèle, cartes graphiques, affectation de la mémoire utilisée entre la mémoire vive et les capacités de stockage consommant des temps de transfert, algorithmes épigraphiques explicites et implicites) pour surmonter la « malédiction de la dimensionnalité ».

Pour réaliser ce développement informatique, le CREA a converti son poste de post-doc, pour recruter un ingénieur pour 15 mois et une assistante pour six mois.

Entre temps, d'autres questions s'étaient posées pour enrichir les modèles de « variables économiques » permettant de calculer des coûts de plantation et des coûts de coupe des arbres (variables de contrôle). Cette intégration a conduit à un nouveau type d'équations aux dérivées partielles que l'on peut appeler équations d'Hamilton-Jacobi-McKendrick « combinant » ces deux types d'équations aux dérivées partielles. Leur étude mathématique a été conduite avec succès au second semestre de 2009 en parallèle étroit avec la conception et la progression du logiciel, et à temps pour

1. calculer la solution de l'équation d'Hamilton-Jacobi-McKendrick soumise à des contraintes de viabilité
2. démontrer qu'elle est égale à la fonction valeur d'un problème de contrôle optimal dont la fonction de coût est la somme du coût de plantation et de la somme cumulée le long des âges des coupes.
3. résoudre ce problème de contrôle optimal en fournissant la politique de plantation et la politique de coupes gouvernant l'évolution du nombre d'arbres (ou de la surface terrière) pour chaque âge.

Sur un autre plan, en se focalisant sur la question soulevée par le choix de plusieurs espèces d'arbres, Jean-Pierre Aubin, Luxi Chen et Marie-Hélène Durand ont mis au point une méthode de décentralisation des contraintes. On suppose connue à la date de plantation la borne inférieure à chaque date des taux de croissances des diverses espèces. On impose un objectif de récolte globale des diverses espèces d'arbres ainsi que, pour chaque espèce, des contraintes particulières (niveau minimal pour assurer la viabilité de chaque espèce). La question est de calculer à la date initiale le niveau garanti de plantation de chaque espèce à partir desquels, quels que soient les taux de croissances (supérieurs à leur borne inférieure), l'objectif de récolte globale sera atteint et les contraintes de viabilité locales respectées. La solution passe par la loi d'allocation de chaque espèce à la croissance globale et l'allocation de la contrainte globale (méthode de décentralisation par les contraintes conçue à cet effet). Ces études ont conduit à un article accepté et quatre articles soumis à publication.

C.4.2.2 Robustesse et validation

Ces méthodes mathématiques de construction de stratégies durables développées pour les applications du projet Dédution posent un problème de validation, dans le sens où ces modèles sont qualitatifs et où leurs solutions n'ont pas été confrontées à des données réelles au cours du projet.

Nous avons donc élaboré des éléments d'évaluation, basés sur la cohérence interne des solutions obtenues : d'une part, par une évaluation de la robustesse différentielle. Les stratégies obtenues ne doivent pas être trop sensibles aux incertitudes de modélisation (cela peut être vérifié par un plan d'expérience, qui permet de calculer une approximation des variations du noyau de viabilité). D'autre part, il est possible d'effectuer une évaluation des caractéristiques intrinsèques des solutions proposées : ces dernières appartiennent à un ensemble dont les propriétés peuvent être étudiées, et la position relative des solutions par rapport à la frontière de cet ensemble peut aussi être étudiée (c'est la robustesse géométrique).

La robustesse géométrique s'intéresse aux caractéristiques du noyau proposé comme solution, et à la position des trajectoires recommandées à l'intérieur du noyau. Pour mettre en œuvre la robustesse géométrique, qui permet d'évaluer les qualités intrinsèques du noyau utilisé pour proposer des stratégies durables, il est nécessaire de pouvoir calculer la projection d'un point du noyau sur la frontière du noyau. En effet, cela permet de déterminer la robustesse aux perturbations (la taille maximale d'une perturbation qui conserve la viabilité), ainsi que les directions de contrôle favorables ou risquées (qui éloignent ou rapprochent le plus de la frontière).

En l'absence d'information particulière sur la forme de la frontière du noyau (ce qui est le cas s'il est obtenu à partir d'un calcul sur une grille, ou à partir d'une fonction implicite comme les SVM), le calcul de la distance doit se faire par exploration de l'espace. Un algorithme optimal, issu de la morphologie mathématique et de l'analyse d'image (Meijster et al, 2000) a été adapté pour permettre le calcul de la projection sur une grille régulière.

A partir de la distance à la frontière, il est possible de prendre en compte le risque associé aux incertitudes sur l'état du système.

C4-3 : Concernant les développements informatiques

Les problèmes mathématiques posés et étudiés au cours du projet ont nécessité de nouveaux développements algorithmiques et informatiques. En effet, certains des problèmes étudiés s'appuient sur des dynamiques de dimension supérieure à 3. C'est le cas notamment des modèles de gestion des forêts malgaches (cf C.4.1.3), des modèles à temps discret de gestion des forêts tempérées (4.1.2) et du modèle théorique de développement durable concernant l'équité intergénérationnelle (4.1.1). Certains de ces modèles, pour lesquels la réduction préalable de dimension a été possible, ont pu être traités grâce à la bibliothèque d'algorithmes de viabilité développée par P. Saint Pierre de LASTRE (4.1.1, 4.1.3). Pour d'autres, de nouveaux développements ont été entrepris au CREA en collaboration avec LASTRE (4.1.2).

Les algorithmes de viabilité sont des algorithmes ensemblistes. Ils nécessitent la manipulation d'ensembles dont il est impossible de donner une description analytique (contraintes exprimées par des égalités ou inéquations algébriques, formes géométriques

particulières, etc.). La seule façon de décrire numériquement un ensemble construit par un algorithme de viabilité est d'énumérer ses points. Cela pose un premier problème : l'occupation en mémoire de la représentation, quelle qu'elle soit, de l'ensemble calculé. Les problèmes de dimension supérieure à trois deviennent rapidement impossibles à traiter en utilisant uniquement les ressources de mémoire vive. L'un des premiers axes de recherches a donc été l'utilisation d'un moyen de stockage sur le disque dur des données des algorithmes.

La deuxième difficulté importante qui se pose quand on aborde des algorithmes de viabilité de grande dimension est le temps de calcul. En effet, pour calculer un noyau de viabilité ou un bassin de capture l'algorithme procède de façon itérative. Soit K_n la n -ème approximation de l'ensemble calculé. Une itération de l'algorithme consiste à parcourir l'ensemble K_n et à examiner les propriétés de tous les successeurs selon la dynamique donnée de ses points. Selon les critères définis par l'algorithme les points seront rejetés ou maintenus dans l'ensemble. Le temps consacré à ce parcours dépend exponentiellement des dimensions des espaces d'états et de commandes. En plus, le nombre d'itérations nécessaires avant que l'algorithme converge (aucune modification après un parcours complet) dépend des propriétés intrinsèques de la dynamique. Le temps de calcul nécessaire peut ainsi différer beaucoup d'une dynamique à l'autre. En dimension 3, avec la bibliothèque d'algorithmes de LASTRE il faut parfois plusieurs heures de calcul pour une discrétisation à 1024 points par axe (2^{30} points de grille).

C. 4.3.1 Parallélisation des codes.

Pour résoudre le problème de temps de calcul le CREA en collaboration avec LASTRE a réalisé des études de faisabilité de parallélisation des algorithmes de viabilité. L'analyse approfondie des algorithmes a permis de déterminer les tâches qui sont parallélisables. En particulier, il a été établi que

- L'analyse de chaque point de l'ensemble est indépendante des autres points et par conséquent plusieurs points peuvent être analysés simultanément,
- L'analyse d'un point nécessite l'exploration de tous ces successeurs potentiels selon la dynamique du système ; les différents successeurs s'obtiennent en parcourant l'ensemble de tous les contrôles possibles ; il est possible de calculer plusieurs successeurs en même temps. Ces deux observations ont permis d'exploiter deux techniques différentes de calcul parallèle :

- Une implémentation multiprocesseur (multithreading)
- L'utilisation de processeurs graphiques (GPU)

Le CREA a développé un code qui permet d'allier les deux types de parallélisation :

- Lors du parcours d'un ensemble, plusieurs points peuvent être analysés simultanément par des processus légers (threads). Le nombre de ces processus lancés simultanément par le programme principal est un paramètre qui permet d'adapter le code au nombre de processeurs disponibles dans l'architecture sur laquelle le programme sera exécuté.

- Le calcul de l'ensemble de successeurs d'un point, préalable à son analyse, est fait sur le processeur graphique (environnement CUDA de NVIDIA).

Ces développements ont permis d'effectuer des calculs pour les modèles de dimensions allant jusqu'à 6 avec des gains importants de temps de calcul.

C.4.3.2 Problème d'occupation de mémoire.

La solution retenue pour sauvegarder les données des ensembles traités est une base de données adaptée aux applications embarquées, Berkeley DB. Elle présente plusieurs avantages :

- La base de données partage le même espace d'adresses que l'application ; cela permet de diminuer les temps d'accès aux données ;
- La base possède une API pour le langage C++ et ne nécessite pas de langage supplémentaire de requêtes
- Elle permet de créer des enregistrements allant jusqu'à plusieurs terra octets

La solution de gestion des données dans une base Berkeley DB a été implémentée pour deux modèles de gestion des forêts tempérées : le modèle à temps discret (dimension 6) et le modèle à temps continu (dimension 4 et plus).

C.4.3.3 Les calculs réalisés.

Les développements algorithmiques réalisés par LASTRE ont été mis en œuvre pour analyser les problématiques de développement durable sous-jacentes aux différents modèles de gestion de la forêt :

- mesure du coût économique minimal de restauration de la forêt mondiale dans sa fonction de capture du CO₂ et détermination des stratégies de gestion de la forêt (figure C1),
- mesure du coût marginal par hectare de maintien de la forêt dans sa fonction de biodiversité pour la forêt tropicale humide et détermination des stratégies de gestion (figure C2),
- gestion durable de la forêt tropicale sèche dans le contexte malgache du pays Androy, intégrant les trois composantes démographique, économique et environnementale (figure C3),
- et, dans le cadre d'une réflexion sur le développement durable et l'équité intergénérationnelle, conception et calcul d'une fonction indicatrice d'équité (figure C4),

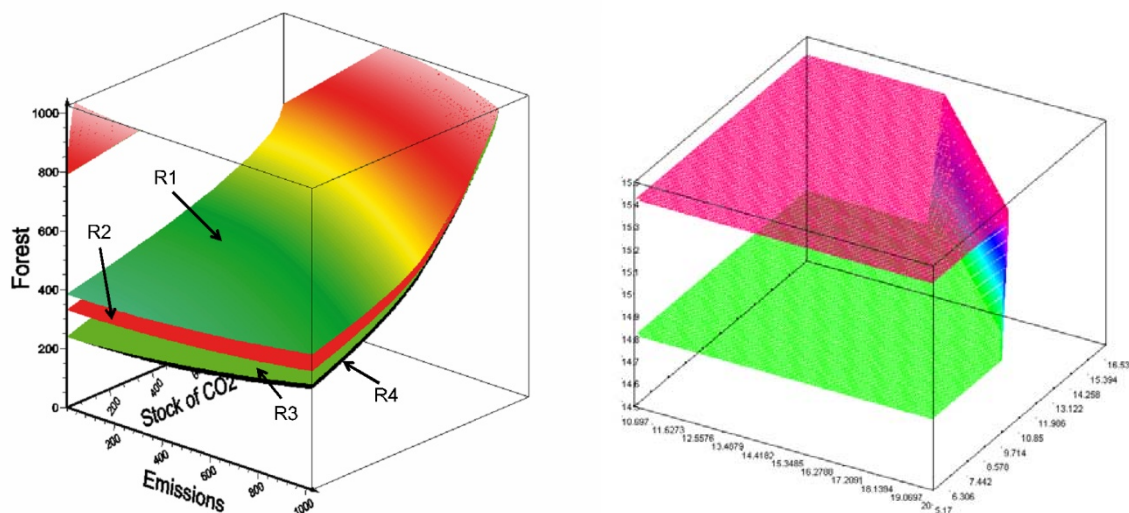


Figure C1 : Domaines viables correspondant à l'ensemble des situations initiales à partir desquelles il existe une stratégie permettant de restaurer une capacité d'absorption minimale de CO₂ par la forêt mondiale.

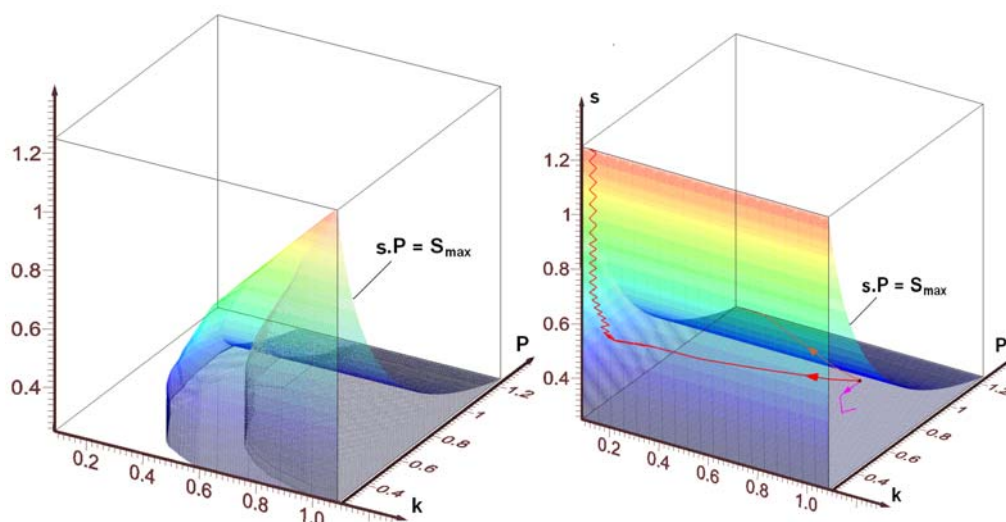


Figure C2 : Domaines viables correspondant à l'ensemble des situations initiales à partir desquelles il existe une stratégie permettant de maintenir un seuil donné a priori de biodiversité, pour différents niveaux de transferts monétaires.

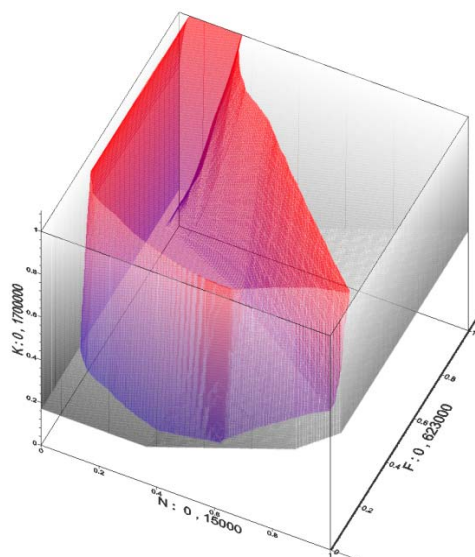


Figure C3 : Domaine viable correspondant à l'ensemble des situations initiales à partir desquelles il existe une stratégie permettant de maintenir la viabilité économique d'une région d'économie traditionnelle.

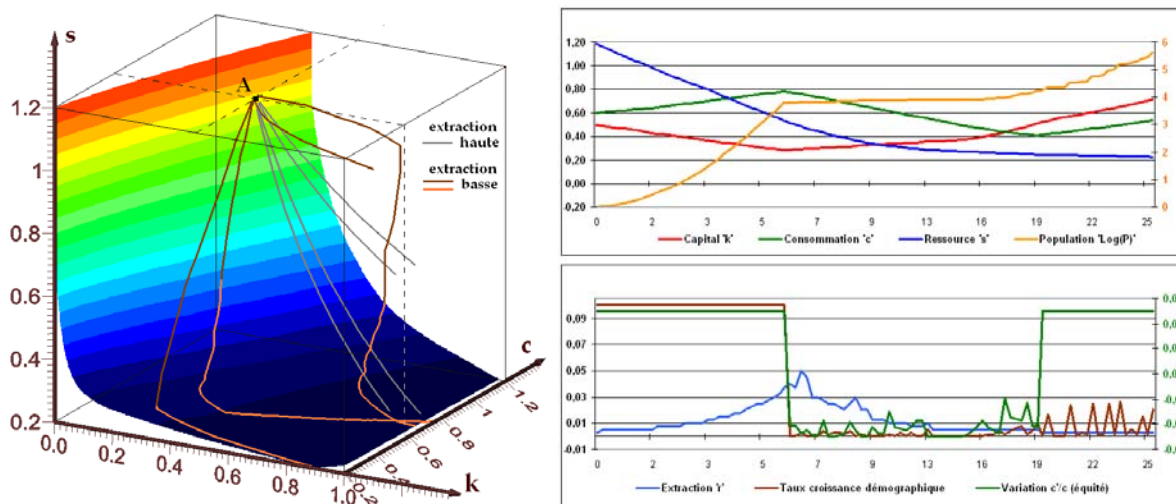


Figure C4 : Scénarios de développement durable assurant un seuil minimal d'équité intergénérationnel et un niveau minimal d'une ressource non renouvelable. A gauche, exemple d'une évolution viable, à droite découps temporels des variables du modèle et des contrôles (stratégies) permettant de réaliser cette évolution.

Pour les modèles à temps discret développés dans le cas de la forêt tempérée, un modèle simplifié a été proposé pour deux espèces d'arbres et trois classes d'âge. Cela représente en tout 6 variables d'état. L'ensemble de contrôles possibles est également de dimension 6. En effet, on suppose que les parcelles vieilles sont systématiquement coupées, les parcelles jeunes jamais, et qu'il n'y a pas de distinction entre récoltées, détruites et en jachère, parmi les parcelles non boisées. Pour 64 parcelles, le nombre total de points de l'espace des états est de $64^6=2^{36}$. Dans ce modèle on cherche à calculer un bassin de capture à horizon fini. La période de calcul est de 100 années. Cela signifie que l'algorithme doit effectuer 100 fois le parcours complet de l'ensemble de points. Ce calcul nécessite une vingtaine d'heures.

Modèle discret à deux espèces et trois tranches d'âge.
Bassin de capture à horizon $T=100$: l'ensemble de répartitions initiales (à $t=0$) des parcelles entre les deux espèces d'arbres qui permettent une évolution économiquement viable sur une période de 100 ans.

Projection du bassin sur l'espace de dimension 3 correspondant aux trois tranches d'âge de la première espèce.

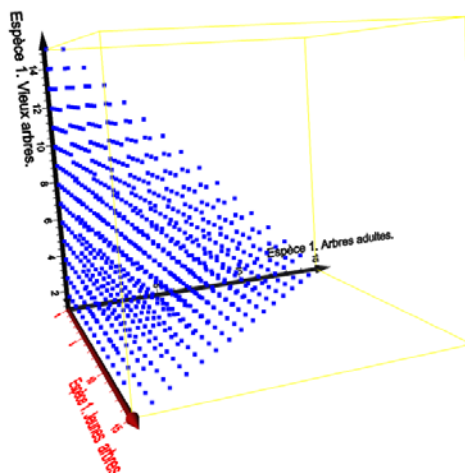


Figure C5 : Modèle discret à deux espèces et trois classes d'âge. Bassin de capture à horizon $T=100$: l'ensemble des répartitions initiales des parcelles entre les deux espèces d'arbres qui permettent

une évolution viable sur 100 ans. Projection sur l'espace de dimension 3 correspondant aux trois tranches d'âge de la première espèce.

Un modèle en temps continu a également été conçu pour la gestion des forêts tempérées. Une nouvelle approche mathématique de modélisation des problèmes de gestion des massifs forestiers a été proposée par J.-P. Aubin (cf C.4.2). Pour ce modèle un algorithme épigraphique de calcul de bassin de capture a été réalisé (dimension 4) permettant non seulement de déterminer l'ensemble d'états initiaux garantissant l'atteignabilité d'un objectif mais également la carte de rétroaction. Cette dernière représente la correspondance permettant de déterminer pour tout état l'ensemble de contrôles qui permettent de réaliser une trajectoire viable qui aboutit dans la cible.

Voici un exemple de bassin de capture obtenu. L'ensemble de contraintes, K , est décrit par les inégalités suivantes : $0 < a < 10$, $0 < t < 20$, $0 < x < 30$ et $t - a > 0$, où la variable a décrit l'âge de parcelles, la variable t représente le temps, la variable x représente la quantité d'arbres d'une espèce donnée. Dans le cas de modèles continus la variable x peut correspondre à la surface des parcelles plantées plutôt qu'au nombre exact d'arbres. Cet ensemble K est représenté sur la figure ci-dessous :

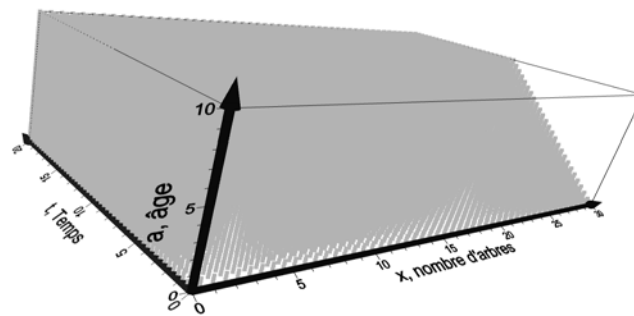


Figure C6 : Ensemble des contraintes K : $0 < a < 10$, $0 < t < 20$, $0 < x < 30$ et $t - a > 0$.

Le bassin de capture correspondant est représenté (en rouge) sur la figure C7 :

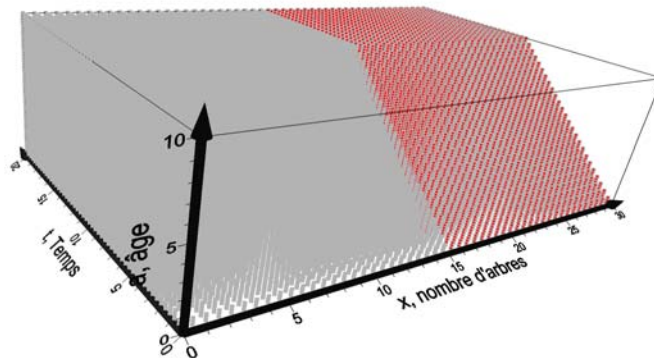


Figure C7 : Bassin de capture en rouge de l'ensemble des contraintes $K : 0 < a < 10, 0 < t < 20, 0 < x < 30$ et $t - a > 0$.

Enfin, la figure C8 donne deux exemples de trajectoires aboutissant dans la cible tout en restant dans l'ensemble de contraintes tout au long de leur évolution.

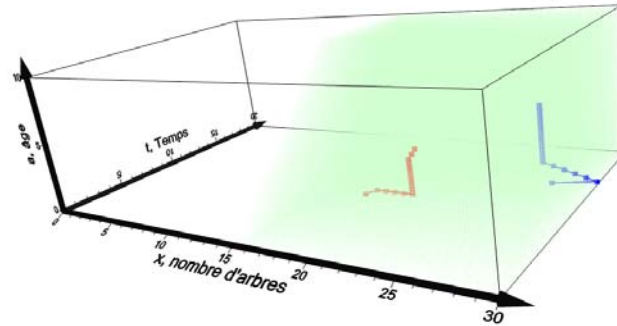


Figure C8 : Deux exemples de trajectoires à l'intérieur du bassin de capture (en vert).

C.5 EXPLOITATION DES RESULTATS

C.5.1 Articles et communications dans des conférences (cf partie E)

C.5.2 Logiciels

Un exécutable a été produit permettant de calculer un bassin de capture pour un modèle de forêts tempérées discret en dimension 6. L'avantage de ce modèle discret réside dans la possibilité de stocker le graphe de la fonction définissant la dynamique du système dans une base de données pour pouvoir ensuite effectuer divers calculs. L'exécutable permet de lire les paramètres des équations de la dynamique dans un fichier de configuration et construire à partir de ces données le bassin de capture ainsi que la fonction de rétroaction. Cette dernière permet ensuite de déterminer les stratégies viables de gestion pour les conditions initiales données.

Un autre programme a été réalisé permettant de calculer les solutions des équations d'Hamilton-Jacobi-McKendrick soumises à des contraintes de viabilité.

C.6 DISCUSSION

Discussion sur le degré de réalisation des objectifs initiaux, les verrous restant à franchir, les ruptures, les élargissements possibles, les perspectives ouvertes par le projet, l'impact scientifique, industriel ou sociétal des résultats.

C.6.1 Degré de réalisation des objectifs initiaux

Le projet Déduction est un projet exploratoire qui avait l'objectif de réaliser de nouveaux développements mathématiques et informatiques utilisant la théorie de la viabilité pour résoudre des problèmes de développement durable. Il a nécessité une activité préalable d'analyse et de modélisation de ce concept et de ses déclinaisons particulières selon les

différents cas d'application qui s'est avérée plus importante que celle initialement prévue au début du projet.

Sur le plan mathématique de nouvelles avancées ont été obtenues motivées par ces problèmes. Outre l'utilisation de fonctions indicatrices de propriétés souhaitées (fonction d'inertie, fonction de résilience, fonction de sureté, fonction de restauration, fonction d'équité) pour traiter les cas de la forêt tropicale et de l'équité intergénérationnelle, des innovations ont été apportées (modèles de générations et classes d'âge de type McHendrick prenant en compte un ensemble de contraintes pour la gestion des forêts tempérées, modèles de gestion de ressources renouvelables en avenir incertain). Ces développements difficiles d'accès pour des utilisateurs non mathématiciens, et réalisés en fin de projet, nécessitent plus de temps que celui du projet pour être « transférés ».

Sur le plan informatique, des solutions ont été trouvées pour effectuer des calculs pour des problèmes de plus grande dimension, et un cadre pour réaliser un logiciel de calcul générique avec une bibliothèque d'algorithmes de viabilité a été créé pour pouvoir diffuser cet outil et le rendre plus accessible.

Sur le plan de l'analyse et de la modélisation des problèmes de développement durable, les réflexions menées dans ce projet ont permis de concevoir divers modèles sur la gestion de ressources exploitées, de ressources sauvages et sur le concept de développement durable. Le traitement du problème posé par la « gestion » du corridor forestier de Fianarantsoa a demandé beaucoup plus temps en raison de l'éloignement de l'équipe et de la grande complexité et les multiples facettes de ce cas qu'il a fallu d'abord identifier.

C.6.2 Les verrous

Un des verrous techniques importants dans l'application des méthodes de viabilité aux problèmes de gestion durable des ressources naturelles est la complexité des modèles en jeu et donc la dimension importante des espaces d'états des systèmes étudiés. Pour développer l'utilisation des algorithmes de viabilité dans ce domaine il sera nécessaire de continuer des recherches sur l'optimisation algorithmique des performances de calcul. L'autre verrou à lever en ce domaine concerne l'accessibilité des algorithmes de viabilité jusque là restreints à leurs quelques concepteurs. La réalisation d'un logiciel générique de viabilité pouvant être utilisé pour une grande variété d'applications et non plus au cas par cas est nécessaire mais demandera un travail de programmation informatique très important.

La communication entre mathématiciens et non mathématiciens est toujours difficile. Cela est encore plus difficile pour ce qui concerne les méthodes mathématiques non orthodoxes de la théorie de viabilité, connue d'un faible nombre de personnes. Un des premiers verrous à lever est donc de développer l'apprentissage de ces méthodes auprès un public plus large d'utilisateurs potentiels.

Le rapprochement de différentes communautés scientifiques, mathématiciens, modélisateurs agronomes, écologues, économistes, très éloignées, pourrait se faire par la mise à disposition de plateformes informatiques permettant de manipuler certains outils de la théorie de la viabilité, en interface avec des thématiciens ou des gestionnaires, et avec un objectif de développer des applications. Le module Mustard dans Capsis va dans ce sens.

C.6.3 Les perspectives

C.6.3.1 Résolution de problèmes de désagrégation par contraintes

Dans le cas de la gestion sylvicole, pour surmonter la question de la dimension en fonction du nombre d'espèces, une théorie originale de l'agrégation « non linéaire » de systèmes dynamiques et d'équations d'Hamilton-Jacobi a été élaborée tout à la fin de ce projet (novembre 2009) pour calculer l'évolution totale des arbres des diverses espèces.

Luxi Chen et Jean-Pierre Aubin ont réalisé un modèle et un logiciel de "décentralisation par contraintes" d'un problème de gestion de récoltes de ressources renouvelables en avenir tychastique. La gestion de récoltes de ressources renouvelables conduit à repenser de nouveau les problèmes d'agrégation et de désagrégation : dans le cas des systèmes dynamiques non linéaires, y compris les systèmes contrôlés tychastiques, il s'agit d'agréger les dynamiques et non pas les états pour déduire des contraintes de viabilité agrégées des contraintes de viabilité décentralisés au niveau des dynamiques individuelles. En conséquence, il s'agit de résoudre d'abord un problème de viabilité agrégé, et ensuite, le désagréger en utilisant les contraintes de viabilité désagrégées. Cela remplace les problèmes de décentralisation non plus par les prix, qui n'existent d'ailleurs pas en biologie, mais par des contraintes.

Ces découvertes obtenues à l'issue du projet Dédution sont le point de départ de problèmes dynamiques d'agrégation et de décentralisation par contraintes désagrégées, tant dans le cadre de la gestion de récoltes de ressources que dans celui de la gestion de systèmes structurés en âge.

Le problème de la désagrégation pour en déduire l'évolution des arbres de chaque espèce est un problème nouveau et ouvert sur lequel débouche cette partie du projet Dédution. Il en est de même du découplage du noyau de calcul de la rétroaction et du module de gestion pour intégrer ce dernier dans la plateforme Capsis de simulation de modèles forestiers.

C.6.3.2 Pistes de prolongement des travaux sur le cas malgache

(1) Nous explorons la possibilité de travailler sur la base de pixels d'images satellites, du fait du futur fonctionnement d'une station de réception d'images satellites à La Réunion. La question se pose à la suite de l'obtention d'images satellites SPOT de très haute résolution sur les forêts tropicales humides (corridor COFAV, Fianarantsoa) et sèches (forêt des Mikea et Androy, Tulear) du Sud malgache et leur traitement en collaboration avec l'IRD Montpellier (US 140 Espace, Maison de la Télédétection) et l'IOGA (Université d'Antananarivo).

La question est de savoir si les différences de résilience entre les forêts tropicales malgaches, humides et sèches, ont des conséquences en termes de viabilité et sont prises en compte dans les dispositifs de conservation. Une recherche en réseau est proposée pour relier des équipes de terrain en activité dans le Sud malgache :

- Forêt humide de l'Est – COFAV Fianarantsoa (MEM), point de référence à Zahamena (IOGA), Farafangana (DBEV), transect à Andohahela (MNP/IRD/WWF) : corridor forestier, forêt résiliente ;
- Forêt sèche du Sud et Sud-Ouest – Androy (Fanakoa) / forêt des Mikea (CNRE)/ transect à Andohahela (MNP/IRD/WWF) : forêt résiduelle, forêt non résiliente.

(2) Une collaboration avec les économistes de l'Université d'Antananarivo et les chercheurs du projet ANR SERENA de l'IRD est en cours concernant les services environnementaux avec des questions comme : quel est le coût d'un hectare de forêt à conserver ?

(3) Des rapprochements sont envisagés avec les chercheurs canadiens du GERAD, HEC, Montréal.

C.7 CONCLUSIONS

La théorie de la viabilité est une théorie mathématique motivée par l'étude des systèmes vivants qui s'intéresse à la régulation des systèmes dynamiques contraints sous diverses formes d'incertitude. Nouvelle et encore mal connue, même de la communauté des mathématiciens, elle est cependant de plus en plus utilisée pour diverses applications, dans le domaine agricole et halieutique en particulier, proposant une nouvelle manière d'appréhender ces problèmes de gestion de ressources naturelles.

L'objectif de ce projet exploratoire était double : 1) concevoir différents outils issus de la théorie de la viabilité pour étudier divers aspects du développement durable inspiré par 3 cas concrets : un problème de gestion sylvicole, deux problèmes de gestion/préservation d'une ressource renouvelable commune, et un aspect plus théorique de développement durable : le problème de l'équité intergénérationnelle, 2) développer les outils informatiques et la programmation d'algorithmes de viabilité de manière à pouvoir prendre en compte des problèmes de plus grande dimension.

Ces diverses applications constituaient des cas types pour lesquels il s'agissait de proposer une nouvelle manière de les appréhender. L'établissement de fonctions indicatrices permettant de réguler des évolutions ayant des propriétés souhaitées sont un aspect déjà connu des techniques viabilistes (fonction d'inertie, fonction de résilience, fonction de temps de crise), d'autres ont été développées dans le cadre de ce projet sur la forêt tropicale et l'équité intergénérationnelle (fonction de sureté, fonction de restauration, fonction d'équité). La prise en compte des contraintes dans les modèles structurés en classes d'âge de type McHendricks est une innovation apportée dans ce projet, de même que la méthode de désagrégation par les contraintes. Ce problème soulevé par le cas de la gestion sylvicole est susceptible de trouver de nombreuses applications touchant le développement durable. Il permet de réguler une évolution globale de façon à ce qu'elle se conforme à des propriétés souhaitées (sa viabilité, mais pas seulement) lorsque celle-ci est générée par plusieurs évolutions locales indépendantes. Enfin, un autre apport de ce projet porte sur la manière d'appréhender l'incertitude distinguant les situations d'incertitude contingente et tychastique. Il s'agit dans le premier cas de maintenir la capacité d'expression et d'adaptation future, dans l'autre d'éradiquer le risque (noyau de viabilité garanti).

C.8 REFERENCES

Arrow K., Dasgupta P., Goulder L., Daily G., 2004. Are we consuming too much ?, Journal of Economic Perspectives, 18(3), 147-172.

Aubertin C. et Vivien F.-D. (dir.), 2006. Le développement durable. Enjeux politiques, économiques et sociaux, Etudes de la documentation française, La documentation française, IRD éditions, 143 p.

Aubin J.-P., Martin S., et Saint-Pierre P., 2007. Politiques de peuplement des essences : un projet de recherche. Rapport.

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

Bakkenes M., Alkemade J.R.M., Ihle F., Leemans R. and Latour J.B., 2002. Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Global Change Biology*, 8, 390-407.

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

Bernard C., 2009. Mathematical modelling of sustainable development: an application to the case of the rain-forest of Madagascar. BIOMAT 2009 9th International Symposium on Mathematical and Computational Biology, Brasilia, Brasil, 1-6 august 2009.

Bonneuil N. and Boucekkine R., 2009, Sustainability, optimality and viability in the Ramsey model, CORE Discussion Paper, n°2009079.

Carrière L., Ratsimisetra L. and Edmond R., 2007. Le couloir forestier de Fianarantsoa : forêt «primaire » ou forêt des hommes, chapitre 3, pages 39–46. Serpantié G., Rasolofoharinoro, Carrière S., Antananarivo, Ird edition - CITE.

Carson R., 1962. Silent Spring, Houghton Mifflin, Boston.

Chapel L., Deffuant G., Martin S. and Mullon C., 2008. Defining yield policies in a viability approach. *Ecological Modelling*, 212 (1-2), pp.10-15.

Cozic P. et Boisseau B., 2004. Ingénierie écologique. Des recherches pour l'action, sur les systèmes écologiques. Collection Hors-série revue "Ingénieries Eau-Agriculture-Territoires". 156 p.

Dasgupta P. and Heal P., 1974. The optimal depletion of exhaustible resources, *The Review of Economic Studies*, 41, 3-28.

Domenech P., Saint-Pierre P., Zaccour G., 2010. Forest Conservation and CO2 emissions: A Viable Approach, (en révision), *Environmental Modeling and Assessment*.

Doyen L., DeLara M., Ferraris J. et Pelletier D., 2007. Sustainability of exploited marine ecosystems through protected areas : A viability model and a coral reef case study, *Ecological Modeling*, 208 (2-4), pp. 353-366.

Durand M.-H, Martin S. et Saint-Pierre P., 2010. Viabilité et développement durable, *Nature, Sciences et Sociétés*. (accepté).

Goreaud F., de Coligny F., Labbé T. et Meredieu C., 2007. Version agrégée du modèle retenu pour l'application aux forêts tempérées. Rapport.

Gunderson L. H. and Holling C. S., 2002. Panarchy: understanding transformations in human and natural systems. Island Press, Washington, D.C., USA.

Hervé D., Ganomena T. et Randriamahaleo S., 2008. Contraintes et dynamiques institutionnelles des transferts de gestion : corridor forestier fandriana-vondrozo. Colloque International « Les parties prenantes de la gestion communautaire des ressources naturelles : coopération, contradictions, conflits », ESSA, 1-3/07/08, Antananarivo, Actes du colloque, pp. 67-73.

Hervé D. (ed.), Laloë F. (ed.), 2009. Modélisation de l'environnement : entre natures et sociétés. Versailles, Coll. Indisciplines, Coéd. QUAE/NSS-Dialogues, 224 p.

Karsenty A., et Pirard R., 2008. Changement climatique : faut-il récompenser la « déforestation évitée » ? *Natures Sciences Sociétés* 15, 357-369.

Kates R.W., Clark W. C., Corell R. and Hall J.M., 2001. Sustainability science, *Science*, 292, 641-642.

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), 8.

Martinet V. and Doyen L., 2007, Sustainability in an economy with an exhaustible resource: a viable control approach, *Resource and Energy Economics*, 64, 411-422.

Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J. and Behrens W. W., 1972. The Limits to Growth: a Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind, Universe Books, New York.

Mebratu D., 1998. Sustainability and sustainable development : historical and conceptual review, *Environmental Impact Assessment Review*, 18, 493-520.

Mullon C., Curry P. and Shannon L., 2004. Viability model of trophic interactions in marine ecosystems. *Natural Resource Modeling*, 17, 27-58.

Ramsey F.P., 1928, A mathematical theory of savings, *The Economic Journal*, 38(152), 543-559.

Rakotoasimbahoaka C., Serpantié G., Toillier A., Treuil J.P., Ramamonjisoa A., et Hervé D., 2007. Un automate cellulaire pour modéliser l'aménagement des bas-fonds en fonction du peuplement, chapitre 6, pages 69-77. Serpantié G., Rasolofoharinoro, Carrière S., Antananarivo, Ird edition - CITE.

Rakotoasimbahoaka C., Ratiarson V., Ramamaonjisoa B., Hervé D., 2010. Modélisation de la dynamique d'aménagement des bas-fonds rizicoles en forêt. Colloque CARI 2010, Abidjan, Côte d'Ivoire, session : Modélisation des systèmes complexes.

Randriamalala R.J., Serpantié G., et Carrière S., 2007. Influence des pratiques culturelles et du milieu sur la diversité des jachères d'origine forestière (Haute-Terre, Madagascar). *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)*, 62, 65-84.

Robinson J., 2004. Squaring the circle? Some thoughts on the idea of sustainable development, *Ecological Economics*, 48, 369–384.

Seppälä R., Buck A., and Katila P., (eds.). 2009. Adaptation of Forests and People to Climate Change. A Global Assessment Report. IUFRO World Series Volume 22. Helsinki. 224 p.

Solow R.M., 1974, Intergenerational equity and exhaustible resources, *The Review of Economic Studies*, 41, 29-45.

Vitasse Y., Delzon S., Bresson C.C., Michalet R. and Kremer A., 2009. Altitudinal differentiation among populations of temperate tree species growing in a common garden: early survival, growth and leaf phenology. *Canadian Journal of Forest Research*, 39, pp. 1289-1269.

Vivien F.-D., 2005. Le développement soutenable, Paris, La Découverte, collection Repères.