



REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA
Tanindrazana - Fahafahana – Fandrosoana

MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DE L'ELEVAGE ET DE LA PÊCHE

**PROJET DE MISE EN VALEUR ET DE PROTECTION
DES BASSINS VERSANTS AU LAC ALAOTRA
(BV ALAOTRA)**



Document de travail BV lac n° 64

***MODELISATION DES EXPLOITATIONS AGRICOLES DU LAC
ALAOTRA***

EN PROGRAMMATION LINEAIRE

avec le logiciel Ganesh

Guillaume Bruelle et Krishna Naudin

Septembre 2010

Introduction

Dans un contexte de prise de conscience des enjeux environnementaux, de nombreuses techniques d'agriculture de conservation ont été mises en place ces dernières années. Ces techniques visent à répondre aux objectifs des agriculteurs tout en respectant l'environnement. C'est le cas du semis direct sous couverture végétale (SCV), une méthode qui permet d'assurer les rendements en améliorant la fertilité des sols et en limitant l'érosion.

Depuis plusieurs années, différents opérateurs, soutenus par la coopération française, tentent de diffuser ces techniques innovantes dans la région du lac Alaotraⁱ, à Madagascar, où les agriculteurs font face à ces problèmes de fertilité, d'érosion et de faibles rendements. Se posent alors les questions d'intégration de ces techniques dans les modèles de production existants au lac : Comment évaluer les performances de ces techniques par rapport aux techniques traditionnelles ? Dans quelles circonstances ces techniques sont-elles susceptibles d'améliorer les performances agronomiques, économiques ou encore environnementales des systèmes de culture ? Dans quelles mesures ces techniques peuvent-elles s'intégrer dans les systèmes d'exploitation ?

Dans le cadre de la tâche 4 du projet ANR « pépite », intitulée « *évaluation ex-ante multi-critères et multi-acteurs des performances des systèmes de culture innovants en AC* », cette étude, à l'échelle du système d'exploitation, tente d'apporter des éléments de réponses par un outil de modélisation en programmation linéaire. Elle est issue d'un travail de 6 mois dans le cadre d'un stage de fin d'étude de la formation dispensée par l'Ecole Nationale Agronomique de Toulouse (ENSAT).

Une première étape de recherche bibliographique a permis de situer cette étude dans son contexte national et régional afin de comprendre la dynamique agraire actuelle du lac Alaotra. Dans cette étude, nous ferons volontairement l'impasse sur ces éléments pour nous concentrer sur le cœur du sujet. De la même manière, nous n'expliquerons pas le principe des techniques SCV. Ces informations sont consultables dans de nombreux documents cités dans la partie « Bibliographie » de ce rapport, notamment dans le rapport de Durand et Nave (2007). Nous débuterons donc cette étude par une définition étoffée de la problématique qui, couplée à la contextualisation précédemment mentionnée, nous amènera à justifier les choix méthodologiques de conception du modèle. Puis, nous analyserons plusieurs scénarios d'exploitations agricoles soumis au modèle créé pour évaluer les effets de l'intégration des techniques SCV dans ces exploitations. Enfin, l'analyse des résultats délivrés par le modèle pourra nous donner des indices quant aux limites et aux perspectives d'utilisation du modèle.

1 Problématique

1.1 Cadre institutionnel de l'étude

1.1.1 Contexte agricole mondial

L'émergence de formes durables d'agriculture qui valorisent l'usage des processus écologiques, tout en répondant aux exigences et contraintes des agriculteurs et de la société, pose des défis de plusieurs ordres. En effet, le développement rapide de l'agriculture de conservation (AC), qui s'étend déjà sur 95 millions d'hectares à travers le monde en 2005 (Cirad, 2008), soulève de nombreuses interrogations : Quelles connaissances et savoirs sont nécessaires de la part des différents acteurs impliqués pour comprendre et valoriser les processus écologiques ? Comment ces processus écologiques sont-ils modifiés par les pratiques de gestion des systèmes de culture, et comment peut-on les optimiser ? Quelles innovations techniques, sociales ou organisationnelles sont

ⁱ Se prononçant « *alotch'* »

nécessaires pour accompagner des pratiques, des systèmes techniques et des réseaux sociaux et professionnels ? Comment ces innovations s'intègrent-elles dans les systèmes de production tout en répondant du mieux possible aux objectifs professionnels et familiaux des agriculteurs ?

Le problème posé est donc celui de l'accompagnement d'un processus d'innovation qui se développe rapidement du fait de sa rentabilité économique, et pour lequel l'usage des processus écologiques apparaît comme un point clé pour accroître la productivité et fournir des services écologiques. Cela nécessite donc de produire des connaissances sur les processus écologiques et les processus d'innovation, de manière à accompagner ce changement dans une démarche d'évaluation et de conception d'innovations techniques et sociales en partenariat.

1.1.2 Le projet ANR « pépites »

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la tâche 4 du projet « pépites » – Processus Ecologiques et Processus d'Innovation Techniques et Sociales en Agriculture de Conservation – lancé en 2009 et financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Ce projet, subdivisé en 9 tâches, s'articule en deux volets (Scopel, De Tourdonnet, Triomphe, 2009). D'une part, l'étude des processus écologiques doit permettre d'approfondir les connaissances sur le fonctionnement de l'agrosystèmeⁱ (modification du biotope et de la biocénose) afin de valoriser ces processus (régulations des adventices par les plantes de couverture, création de porosité par les lombriciens...) et d'évaluer les services écosystémiques (accroissement de la biodiversité, amélioration de la qualité du sol...). D'autre part, l'étude des modifications de l'agrosystème (système de culture et système de production) doit permettre de créer des connaissances, outils et méthodes pour conceptualiser et évaluer des systèmes de culture innovants notamment grâce à la mise en place de réseaux socio-techniques ; ces réseaux ayant pour but de croiser les savoirs des différents acteurs (chercheurs, opérateurs techniques et agriculteurs).

Comme le présente le schéma ci-après (Figure 1), ces deux volets sont en interaction permanente car l'enjeu principal est de créer une interdisciplinarité à plusieurs niveaux, c'est-à-dire entre les différentes disciplines (sciences biophysiques, agronomie, écologie, sciences économiques et sociales) et entre les différentes équipes (UMR Innovation, SCRID, ISARA).

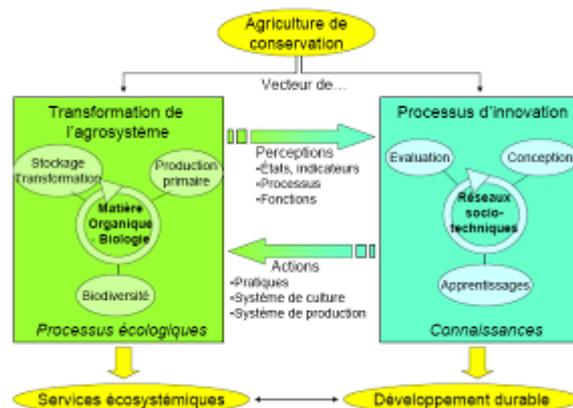


Figure 1: Schéma organisationnel du projet "pépites"

Source : Scopel, De Tourdonnet, Triomphe, 2009

La tâche 4 du projet, intitulée « évaluation ex-ante multi-critères et multi-acteurs des performances des systèmes de culture innovants en AC », a trois objectifs :

- ✓ Développer une démarche intégrée d'évaluation multicritères et multi-acteurs des performances respectives des systèmes en AC par rapport aux systèmes traditionnels ;

ⁱ Un agrosystème est un écosystème construit ou modifié par l'homme pour l'exploitation agricole et soumis à des pratiques agricoles ordonnées dans le temps et dans l'espace (Cirad, 2008).

- ✓ Déterminer a priori dans quelles circonstances les systèmes en AC sont susceptibles d'améliorer les performances agronomiques, économiques et environnementales des systèmes de culture ;
- ✓ Alimenter la réflexion collective des différents acteurs et orienter le processus de co-conception de systèmes innovants et durables en AC.

Cette tâche est mise en œuvre sur deux terrains : Unai dans les Cerrados au Brésil et le lac Alaotra à Madagascar. Sur ce dernier, c'est à travers la thèse de Krishna Naudin – *Choix des meilleurs systèmes AC en fonction du milieu physique, du type de producteurs et d'un cahier des charges lié* – que sont menés les travaux. Pour répondre aux objectifs énoncés précédemment, une analyse multi-critères qualitative à l'échelle du système de culture et une optimisation multi-objectifs en programmation linéaire à l'échelle de l'exploitation sont conduits. C'est précisément pour cette optimisation multi-objectifs que ce stage a été mis en place.

1.2 Objectifs de l'étude

Dans le cadre du projet décrit ci-avant et étant donné le contexte agricole de la région du lac Alaotra, l'objectif de cette étude est de comprendre dans quelles mesures les systèmes innovants SCV peuvent être intégrés dans les exploitations agricoles ; c'est-à-dire évaluer dans quelles mesures ces systèmes répondent aux objectifs des agriculteurs du lac et comprendre les modifications qu'ils apportent (revenus dégagés, temps de travaux familiaux, types de productions...). Il est important de noter que les modifications peuvent être tout aussi bien positives que négatives. En effet, les techniques SCV sont largement diffusées par le projet BV/Lac depuis 2003 pour un développement agricole durable de la région et cette étude est l'occasion de juger de l'efficacité et de l'adaptabilité de ces techniques, d'en déceler les avantages et les failles. Ainsi, ces travaux ne sont pas menés dans l'objectif de promouvoir les SCV mais plutôt dans celui d'en peser le pour et le contre afin d'insister sur les points positifs et, à posteriori, de modifier et adapter les points négatifs.

Pour répondre à ces attentes, il a été choisi de créer le modèle GANESH : *Goals oriented Approach to use No till for a better Economic and environmental sustainability for Small Holders*ⁱ. Ce modèle est basé sur le principe d'optimisation en programmation linéaire (PL). Il est donc nécessaire, dans un premier temps, de justifier le choix de cette méthode, d'en décrire les tenants et aboutissants et de préciser les frontières de son champ d'application (acteurs concertés, public visé, échelle d'étude et types de résultats obtenus).

1.3 Innovation, Modélisation & Agriculture

Dans le contexte actuel de développement durable, les structures de recherche et de développement agricole ainsi que les producteurs accordent une attention particulière aux innovations susceptibles de répondre aux nombreux enjeux en termes de production, de revenus et d'impacts environnementaux. Ainsi, de nombreuses méthodes de conception de systèmes de production innovants à l'échelle de l'exploitation agricole ont été construites, particulièrement ces dix dernières années (Novak, 2008).

En agronomie, l'innovation est définie comme un processus qui mobilise une invention et qui aboutit à sa diffusion. L'invention répond à un problème nouveau par une activité de conception fondée sur des connaissances scientifiques et empiriques, souvent la combinaison des deux. Pour devenir une innovation, l'invention nécessite des vecteurs qui peuvent être soit des chercheurs, des vulgarisateurs, des formateurs, ou bien directement des agriculteurs (Dugué *et al.*, 2006). L'innovation est donc un processus qui relève de la volonté des agriculteurs, mais qui peut être influencé par des agents extérieurs, en particuliers les agronomes des structures de recherche et de développement. Il existe deux types d'innovations : l'innovation technologique qui ne remet pas en

ⁱ GANESH : Approche multi-objectifs de techniques sans labour pour une meilleure durabilité économique et environnementale chez les petits producteurs.

cause le fonctionnement de l'exploitation agricole (par exemple, variété, machine ou produit de traitement...); l'innovation à caractère 'systémique', c'est-à-dire se traduisant par une restructuration ou une reconfiguration plus ou moins profonde du système de production. C'est de ce dernier type qu'il est question dans notre étude.

La conception est un processus actif, intentionnel, qui vise à générer simultanément des concepts et des connaissances, qui déboucheront éventuellement sur de nouveaux produits et de nouvelles technologies. Elle fait donc intervenir une volonté explicite de changement, exprimée par l'agriculteur ou par un autre acteur (Novak, 2008).

Dans cette étude, nous nous plaçons au niveau du système de production, défini comme un ensemble de ressources et de moyens de production mis en œuvre ensemble, dans le temps et dans l'espace, par un ou plusieurs acteurs, en vue de la valorisation des produits agricoles (Boiffin, Hubert, Durand, 2004). La notion de système de production peut s'appliquer soit aux façons de produire à l'échelle d'une région; soit à la combinaison d'activités de production au sein d'une exploitation agricole, ce qui est le cas dans notre étude. Le système de production se décompose en trois sous-systèmes (Novak, 2008) :

- ✓ Le système biophysique, comprenant les interactions entre les composantes physiques et biologiques du système (eau, sol, climat, adventices, ravageurs...) et la croissance des plantes ou le développement des animaux ;
- ✓ Le système technique, défini comme la combinaison des techniques mises en œuvre par le producteur sur le système biophysique, depuis l'échelle de la parcelle ou du troupeau jusqu'à celle de l'exploitation, afin de satisfaire des objectifs de production ;
- ✓ Le système décisionnel, système de gestion ou de pilotage de l'exploitation, représentant la composante humaine du système.

Ces trois sous-systèmes sont caractérisés par de nombreuses interactions, souvent complexes. La conception de systèmes innovants nécessite donc des méthodes dépassant les approches basées sur l'expérimentation, afin de prendre en compte ces multiples interactions. Ainsi, pour concevoir des systèmes innovants, fixer un cadre de contraintes et d'objectifs et évaluer les systèmes conçus, la conception *in-silico*ⁱ présente des avantages indéniables par rapport aux expérimentations classiques, surtout à l'échelle de l'exploitation agricole où ces expérimentations sont très lourdes à mettre en place en terme de temps et de moyens. D'une manière générale, la modélisation est de plus en plus utilisée dans la recherche, à la fois comme moyen d'intégrer et de formaliser les quantités croissantes de connaissances, et comme outil de transfert de la recherche vers le développement (INRA, 2005).

2 Méthodologie

2.1 GANESH : quel type de modèle ?

2.1.1 Domaine d'application

Si l'on se réfère à la synthèse bibliographique de Sandra Novak (2008), il existe en modélisation 8 grands domaines d'application en agriculture : organisation du travail, gestion de l'irrigation, conduite d'un système de culture, conduite d'un système d'élevage, gestion des fertilisants, orientations de l'exploitation, problématiques environnementales, risques. Le modèle GANESH s'insère dans deux de ces domaines, qui sont intimement liés :

- ✓ Conduite d'un système de culture : l'un des objectifs du modèle est d'optimiser les rotations pour réduire l'impact négatif sur l'environnement (fertilité du sol et érosion). Cet objectif n'est pas explicitement modélisé. En effet, en intégrant des cultures de type SCV dans la liste des rotations possibles, on considère que l'on prend en considération l'impact agronomique

ⁱ La conception *in-silico* correspond à la phase de modélisation dans un processus de conception

et environnemental des pratiques agricoles et que par conséquent, indirectement, on vise à diminuer ces impacts. Le but principal est d'évaluer l'impact économique de ces techniques, ce qui entre dans le second domaine d'application.

- ✓ Orientations de l'exploitation : notre étude tente de modéliser les choix stratégiques concernant les productions, les assolements et l'introduction de nouvelles techniques, en l'occurrence les techniques SCV. Ces choix stratégiques ont pour objectifs d'améliorer la production, le revenu de l'agriculteur et son bien-être.

2.1.2 Echelle d'étude

Comme il a été cité plus haut, notre modèle se place à l'échelle de l'exploitation agricole. Cependant, il existe différentes manières de considérer le système de production, étant donnée sa décomposition en trois sous-systèmes (Novak, 2008). Certaines études sont axées sur le fonctionnement du système biotechnique de l'exploitation, étudiant l'effet du milieu et des interventions techniques sur la production et l'environnement. Dans notre cas, nous considérons l'exploitation selon une entrée bioéconomique, c'est-à-dire que l'on s'intéresse à la rentabilité économique du système de production. A l'instar de la méthode de Dogliottiⁱ *et al.* (2005), l'exploitation est représentée sous la forme de plusieurs fonctions d'utilité, considérant l'agriculteur comme « rationnel » et s'efforçant à maximiser son profit sous contraintes de ressources, de préférences ou d'exigences règlementaires.

2.1.3 Optimisation et MGPLⁱⁱ

Le modèle GANESH intègre plusieurs contraintes d'ordre agronomique, sociales ou encore personnelles toutes formulées sous formes d'équations mathématiques qui doivent être optimisées afin de répondre à deux objectifs principaux : maximiser le revenu de l'agriculteur et diminuer la charge de travail familiale. L'optimisation en programmation linéaire est donc le moyen de résoudre ce type de modèle ; on parle de MGPL lorsque les objectifs sont multiples. Le principe de notre modèle et les méthodes d'analyse des résultats, détaillés plus bas, sont largement inspirés du modèle MGPL de Baijukyaⁱⁱⁱ (2004).

2.1.4 Un modèle hybride

L'évaluation de systèmes innovants peut-être de deux types : *ex-ante* ou *ex-post*. Dans le premier cas est une approche *in-silico* qui consiste à évaluer des systèmes de productions non encore testés sur le terrain aux moyens d'indicateurs et d'outils de modélisation plus ou moins sophistiqués et aboutis. Le second cas consiste à évaluer des systèmes de productions mis en œuvre sur le terrain dans des stations de recherches ou chez certains agriculteurs. Les méthodes d'évaluation peuvent être similaires à celles de l'évaluation *ex-ante*, à la différence près que les variables évaluées sont celles mesurées effectivement sur le terrain et non celles simulés par un modèle. Le modèle GANESH est une sorte d'hybride entre ces deux méthodes d'évaluation. En effet, plusieurs agriculteurs de la région du lac Alaotra utilisent les systèmes SCV, notamment grâce à la diffusion de ces techniques par le projet BV/Lac depuis 2003. Ainsi, les données chiffrées sur les itinéraires techniques (temps de travaux, intrants et rendements) utilisées dans notre modèle sont issues de systèmes mis en pratique par les paysans sur le terrain. Il en est de même pour les productions culturelles dites

ⁱ L'étude de Dogliotti *et al.* (2005) traite de la conception et de l'évaluation *ex-ante* de nouveaux systèmes de cultures maraîchères dans le sud de l'Uruguay, dont les objectifs assignés sont de diminuer l'érosion des sols, de maintenir le niveau de matière organique des sols et d'accroître le revenu des agriculteurs.

ⁱⁱ Multiple-Goal Linear Programming.

ⁱⁱⁱ Le modèle de Baijukya (2005) explore les options d'utilisation de légumineuses herbacées pour répondre aux objectifs de rendements en maïs, de production d'engrais et de respect de l'équilibre en azote pour les cultures annuelles à Kikamba, Tanzanie.

conventionnelles ou traditionnellesⁱ. Il s'agit donc d'une évaluation *ex-post*. En revanche, certains paramètres sont directement simulés par le modèle sans aucune expérimentation sur le terrain. Par exemple, les données de chaque système de cultures cité précédemment sont issues d'observations de terrain ; seulement, la liste de toutes les successions culturales possibles sur 6 ansⁱⁱ parmi lesquelles le modèle va choisir celles qui répondent aux objectifs, n'a jamais été testée sur le terrain. Elles sont donc évaluées de manière *ex-ante* par le modèle.

2.1.5 Un outil « chercheurs »

Si l'on reprend toutes les caractéristiques du modèle citées ci-avant, on constate que seul le système technique est explicitement modélisé sous GANESH. En effet, une partie du système décisionnel est explicitement modélisée (décision de production de certains produits par l'agriculteur sans tenir compte de la valeur ajoutée des produits) mais la majeure partie n'est qu'implicitement représentée par la logique d'optimisation qui présente l'agriculteur comme une entité « rationnelle ». Quant au système biophysique, il n'est représenté que sous forme de données saisies par l'utilisateur, c'est-à-dire que les mécanismes internes du système ne sont pas modélisés mais englobés sous une « boîte noire » : on sait que pour une culture donnée, l'apport d'une certaine quantité d'intrants permet un certain rendement, mais on ne connaît pas les mécanismes mis en jeu. Le modèle est donc un modèle empiriqueⁱⁱⁱ qui décrit les relations arithmétiques directes entre les variables d'entrée et les variables de sortie.

Etant donné le niveau de complexité du modèle, les résultats obtenus ne sont pas à interpréter comme résultats idéaux à appliquer sur le terrain pour répondre aux objectifs des agriculteurs. Tel n'est pas le but du modèle et le niveau de précision ne le permet pas. Cet outil est créé par des chercheurs, pour des chercheurs. Il n'y quasiment pas eu de concertation entre acteurs pour la conception de ce modèle : en cours de conception, une unique réunion a été organisée pour présenter la liste des règles de décisions modélisées sous GANESH aux opérateurs techniques (conseillers) afin qu'ils valident, réfutent ou étoffent cette liste. De plus, les agriculteurs n'ont pas été concertés. Le modèle n'est donc pas un outil d'aide à la décision. Il permet, dans une représentation simplifiée mais valide de la réalité du terrain, d'évaluer les effets de l'introduction des techniques SCV dans une exploitation agricole et d'analyser les grandes tendances sous l'influence de diverses contraintes (évolution du solde d'exploitation, de la charge de travail familiale, de la production de riz,...).

2.2 Présentation des outils utilisés

Pour modéliser les exploitations agricoles du lac Alaotra, deux outils complémentaires sont utilisés : GAMS (**General Algebraic Modeling System**) et Microsoft Office Excel® 2007. Le premier logiciel permet de modéliser la structure de l'exploitation agricole et d'optimiser le modèle ; le second permet de stocker toutes les données exogènes du modèle qui sont importées sous GAMS pour le calcul d'optimisation.

2.2.1 La modélisation sous GAMS

GAMS est un langage de modélisation qui a été créé spécifiquement pour résoudre des problèmes d'optimisation linéaires, non-linéaires ou mixte. Spécialement utile pour résoudre des modèles de programmation mathématique relativement grands et complexes, le logiciel GAMS a été mis au point à la Banque Mondiale afin de fournir aux économistes un instrument permettant de construire des modèles lisibles aussi bien par les modélisateurs que par les ordinateurs (Ridier, 2009).

ⁱ Les termes « conventionnel » et « traditionnel » s'opposent aux techniques innovantes SCV. Ils qualifient toutes cultures existantes dans la région avant l'implantation de ces nouvelles techniques.

ⁱⁱ Ces successions culturales sont expliqués plus bas, dans la partie méthodologie.

ⁱⁱⁱ Il existe deux types de modèle : empirique ou mécaniste. Un modèle mécaniste prend en compte tous les mécanismes (biologiques, physiques,...) que l'on connaît sur les processus mis en jeu (Novak, 2008).

En effet, un modèle requiert de nombreuses heures d'analyse et de programmation pour organiser les données et les transformer dans un langage mathématique approprié à l'optimisation ; GAMS a donc été développé pour pallier à ces difficultés (Rosenthal, 2007) en :

- ✓ Proposant un langage de haut niveau pour une représentation compacte de modèles complexes. Ce langage s'apparente à celui utilisé en programmation mathématique avec une écriture utilisant les facilités de la notation mathématique (+, -, =, >, <...);
- ✓ Autorisant la modification de la structure d'un modèle de manière simple et sécurisée ;
- ✓ Permettant de décrire la structure d'un modèle indépendamment de l'algorithme utilisé pour le résoudre.

Structure d'un modèle sous GAMS

Un modèle écrit sous GAMS se décline en 4 grandes parties :

- ✓ Les sets ou ensembles correspondent aux indices de l'écriture algébrique.
- ✓ Les paramètres, scalaires et tables correspondent à toutes les données exogènes du modèle.
- ✓ Les variables endogènes sont calculées par le modèle.
- ✓ Les équations du modèle représentent les contraintes et la fonction objectif à optimiser.

Résolution du modèle

Lorsque le modèle est construit, GAMS offre la possibilité d'utiliser plusieurs solveurs, utilisant des algorithmes différents et s'appliquant à différents types d'optimisations. Sur le conseil de M. Marcel Lubbers, ingénieur agronome de Wageningen University & Research Center qui nous a appuyés dans la conception du modèle sous GAMS, le solveur utilisé dans cette étude est le solveur IBM ILOG CPLEX développé par IBM. L'objectif de cette étude n'est pas d'étudier en détail le raisonnement mathématique de l'algorithme utilisé par le solveur, mais il est tout de même important d'en comprendre le principe général.

L'avantage du solveur CPLEX est de pouvoir résoudre des problèmes d'optimisation de grande taille de type MIP (Mixed Integer Programming, mêlant variables discrètes et variables continues) dans un temps record grâce à l'algorithme Branch-and-Bound ou encore Procédure de Séparation et d'Evaluation Progressive. Le principe de l'algorithme est le suivant (Rebaïne, 2005) :

Pour les problèmes d'optimisation, l'ensemble des solutions est fini (en tous les cas, il est dénombrable). Il est donc possible d'énumérer toutes ces solutions, et ensuite de prendre celle qui répond aux contraintes et objectifs. L'inconvénient majeur de cette approche est le nombre prohibitif de solutions. Ainsi, la méthode de Branch-and-Bound consiste à énumérer ces solutions d'une manière intelligente, c'est-à-dire en utilisant certaines propriétés du problème en question de manière à éliminer des solutions partielles qui ne mènent pas à la solution que l'on recherche. De ce fait, on arrive à obtenir la solution recherchée en des temps raisonnables ou on retombe toujours sur l'élimination explicite de toutes les solutions du problème. Pour ce faire, cette méthode se dote d'une fonction qui permet de mettre une borne sur certaines solutions pour soit les exclure soit les maintenir comme des solutions potentielles.

Par convenance, on représente l'exécution de la méthode de Branch-and-Bound à travers une arborescence. La racine de cette arborescence représente l'ensemble de toutes les solutions du problème considéré. Pour appliquer la méthode de Branch-and-Bound, il faut être en possession :

- ✓ d'un moyen de calcul d'une borne supérieure d'une solution partielle
- ✓ d'une stratégie de subdiviser l'espace de recherche pour créer des espaces de recherche de plus en plus petits.
- ✓ d'un moyen de calcul d'une borne inférieure pour au moins une solution.

La méthode commence par considérer le problème de départ avec son ensemble de solutions, appelé la racine. Des procédures de bornes inférieures et supérieures sont appliquées à la racine. Si ces deux bornes sont égales, alors une solution optimale est trouvée, et on arrête là. Sinon, l'ensemble des solutions est divisée en deux ou plusieurs sous-problèmes, devenant ainsi des enfants

de la racine. La méthode est ensuite appliquée récursivement à ces sous-problèmes, engendrant ainsi une arborescence. Si une solution optimale est trouvée pour un sous-problème, elle est réalisable, mais pas nécessairement optimale, pour le problème départ. Comme elle est réalisable, elle peut être utilisée pour éliminer toute sa descendance : si la borne supérieure d'un nœud dépasse la valeur d'une solution déjà connue, alors on peut affirmer que la solution optimale globale ne peut être contenue dans le sous-ensemble de solution représenté par ce nœud. La recherche continue jusqu'à ce que tous les nœuds sont soit explorés ou éliminés.

De surcroît, pour accélérer la résolution, GAMS propose une option *optcr* paramétrable de 0 à 1. Par principe, lors de la résolution d'un problème de type MIP, la solution optimale si toutes les variables étaient continues est calculée ; elle correspond à ce que GAMS appelle *best possible*. Lors de la recherche de la solution du modèle, appelée *MIP solution*, la résolution s'arrête dès que le *relative gap* est inférieur ou égal à *optcr*.

$$\text{relative gap} = (\text{best possible} - \text{MIP solution}) \div \text{best possible}$$

La valeur par défaut d'*optcr* est 0,1. Ce paramétrage est utilisé dans notre modèle car le *relative gap* obtenu est généralement inférieur à 0,05 (5%) ; ce que nous estimons suffisamment petit pour être interprétable comme étant la meilleure solution du modèle.

2.2.2 Le stockage des paramètres sous Excel

Comme cité ci-avant, GAMS utilise des paramètres correspondant à des données exogènes du modèle. Pour des raisons d'ergonomie, lorsque le nombre de données à traiter est important, il est plus sûr et plus rapide de les intégrer dans un tableur Excel plus lisible. Ainsi, Excel permet de regrouper dans un fichier toutes les données utilisées par notre modèle. Nous ne présentons pas ici le fonctionnement de l'outil bureautique mais uniquement les types de données contenus dans le fichier. Il y a 3 genres de données :

- ✓ Les données brutes : Dans notre étude, on entend par « brute » des données qui sont soit directement saisies à partir des sources de données disponibles, soit traitées (addition, moyenne, conversion d'unité...) avant la saisie dans Excel. Dans tous les cas, aucune modification n'est apportée à ces données dans Excel ; elles sont directement utilisées sous GAMS avec leur valeur attribuée à la saisie.
- ✓ Les données calculées : Ces données sont issues de calculs entre données brutes. Les résultats de ces calculs sont utilisés sous GAMS. Cela permet d'alléger l'écriture du modèle et d'en accélérer l'exécution.
- ✓ Les données combinées : Ces données sont issues à la fois de calculs et de restructurations entre données brutes. Celles-ci sont nécessaires car certaines données brutes ne sont pas traitables sous GAMS et doivent être réagencées de manière à le devenir. De la même manière que les données calculées, l'écriture est allégée et le temps d'exécution raccourci.

Pour le réagencement des données, l'outil de programmation Visual Basic (VBA) est utilisé sous Excel. Ainsi, la restructuration est un processus automatisé (on parle de *macro*) que l'on peut lancer dès que l'on modifie des données brutes. Ces macros VBA permettent non seulement de rendre des données lisibles sous GAMS mais aussi les réorganiser selon des règles de décisions choisies par le programmeur. Cela signifie que le modèle n'est pas uniquement dessiné sous GAMS. En effet, certaines contraintes s'appliquent à travers des règles de décisions dans le traitement des données sous Excel antérieurement à la résolution du modèle sous GAMS.

2.3 Création du modèle GANESH

2.3.1 Source des données utilisées dans le modèle

Depuis les années 70 les agronomes s'intéressent à Madagascar et plus particulièrement à la région du lac Alaotra. Ainsi, de nombreux travaux ont été menés et de nombreuses données ont été récoltées. Avec le lancement du projet BV/Lac en 2003, ces données n'ont cessé de croître et

d'alimenter les différentes bases de données existantes chez les différents opérateurs qui travaillent sur le terrain. S'ajoutent à ces données les nombreux diagnostics agraires et les différentes études effectuées par des étudiants. Devant cette multitude de sources d'informations, il a été fait le choix de construire un modèle avec les données les plus récentes de manière à limiter le décalage avec la réalité du terrain. Ainsi, la plupart des données compilées dans notre modèle datent des 3 dernières années et proviennent de sources exposées dans cette partie.

2.3.1.1 Données pour les caractéristiques des itinéraires techniques

Les cultures proposées dans notre modèle, c'est-à-dire les différentes possibilités de production végétale mises à disposition du modèle pour créer un assolement répondant aux contraintes et objectifs de l'exploitation modélisée, sont caractérisées par :

- ✓ Des temps de travaux à la quinzaine ;
- ✓ Une consommation d'intrants : semences, engrais et produits phytosanitaires ;
- ✓ Un rendement ;
- ✓ Des prix de vente des produits.

Pour toutes les cultures en SCV, les données sont issues du suivi des parcelles paysannes encadrées par l'opérateur Bas-Rhône Languedoc (BRL). Une base de données « Itinéraires techniques » est alimentée par toutes les enquêtes terrains effectuées par BRL. Lorsque le nombre d'itinéraires techniques similaires (même production végétale, même niveau d'intensification, faible variation de rendements) est assez conséquent, des itinéraires moyen (sur une vingtaine d'itinéraires) sont publiés (Andriamalala, Domas, Penot, 2009). On parle alors d'itinéraire technique standard (ITK std). Pour certaines cultures, les ITK std ne sont pas encore publiés ou l'échantillon n'est pas représentatif de la réalité du terrain (moyenne faite sur moins de 8 parcelles). Dans ce cas, c'est l'ITK std de la production végétale la plus comparable agronomiquement qui est attribué à la culture (par exemple, on peut considérer que les caractéristiques d'une culture associée de maïs et dolique sont identiques à ceux d'une culture associée maïs et niébé). De la même manière, les caractéristiques des cultures sur labour SCVⁱ sont issues des ITK std de BRL.

Les caractéristiques des cultures conventionnelles sont issues des données Olympe. Olympe est un logiciel permettant de calculer les données technico-économiques d'une exploitation (marge brute, solde, valorisation de la journée de travail...) à partir de la saisie de toutes les caractéristiques de celle-ci (surface de chaque culture, intrants, rendements, cheptel, autoconsommation,...). On y trouve ainsi toutes les caractéristiques citées ci-avant des productions végétales en conventionnel. Ces données ont été informées par les stagiaires antérieurs, notamment par Méduline Terrier (2008) dont les données complètent notre modèle. Pour la même culture conventionnelle, il peut y avoir plusieurs itinéraires techniques existants. Après avoir éliminé les itinéraires incomplets ou ceux présentant des valeurs aberrantes, il ne reste à chaque fois qu'un seul itinéraire que l'on utilise alors pour notre modèle.

2.3.1.2 Données pour la structure de l'exploitation

Pour modéliser l'exploitation agricole, les données utilisées sont issues de deux sources. La première correspond à la typologie d'exploitation créée par Durand et Nave (2007) ; la seconde est une combinaison des informations renseignées dans la base de données de Méduline Terrier (2008) et des données issues de la base Olympe. Comme les données saisies dans Olympe proviennent des enquêtes exploitations de Méduline Terrier, la source est identique mais les informations sont complémentaires.

Ces données apportent au modèle des informations de deux ordres. D'une part, elles permettent la structuration à proprement parler de l'exploitation ; c'est-à-dire qu'elles guident les

ⁱ Une culture sur labour SCV correspond à la première année d'implantation d'une culture en SCV, où un travail du sol est pratiqué.

choix de caractéristiques à prendre en compte (types de sols cultivés, nombre de bouches à nourrir, types d’animaux élevés...) pour modéliser le plus précisément possible une exploitation en sélectionnant les critères judicieux et en éliminant les critères jugés superflus ou exceptionnels. D’autre part, les données permettent de quantifier les caractéristiques retenues pour modéliser un type d’exploitation donnée.

2.3.2 Création du modèle

2.3.2.1 Echelles de temps utilisées

Avant de détailler tous les paramètres et caractéristiques pris en compte dans le modèle, il faut expliquer les choix de durée et de pas de temps du modèle.

Comme expliqué plus bas, les productions végétales proposées par le modèle s’étalent au maximum sur 3 années. Ainsi, pour que toutes les cultures puissent être répétées au moins deux fois, l’optimisation se fait sur 6 ans. De plus, chaque année est découpée en deux saisons : une saison de mi-octobre à mi-mai et une contre-saison de mi-mai à mi-octobre. Enfin, pour respecter le pas de temps du calendrier cultural du logiciel Olympe, l’année est divisée en quinzainesⁱ (24 quinzaines par an dont 14 en saison). Le schéma ci-dessous (Figure 2) récapitule les différentes échelles de temps utilisées :

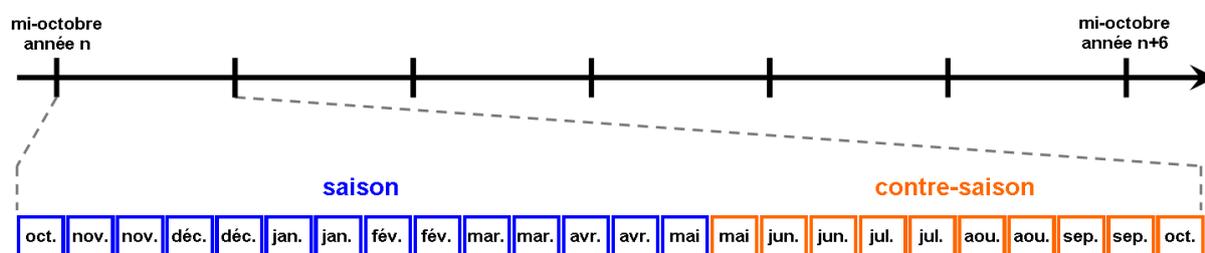


Figure 2: Echelles de temps du modèle

Source : création personnelle

2.3.2.2 Modélisation de l’exploitation agricole

Une structure inspirée des exploitations agricoles de type « D »

Comme expliqué ci-avant, la modélisation de la structure de l’exploitation agricole s’inspire de la structure d’exploitations réelles du lac Alaotra. L’étude de Durand et Nave de 2007 établit une typologie des exploitations agricoles de la région et parmi les différents types décrits, le type « D » – Agriculteurs diversifiant leur production – semble être une structure de départ intéressante à modéliser pour un premier modèle intégrant les systèmes SCV.

En effet, les agriculteurs de type D cultivent peu de surface, et n'ont pas accès aux rizières irriguées mais aux RMME qu'ils travaillent par traction attelée. En général ils sont autosuffisants en riz. Mais il existe une grande insécurité sur les rendements, ce qui fait qu'en cas de très mauvaises années ils ne sont plus autosuffisants en riz et doivent en acheter. C'est pourquoi ce type d'exploitants cherche à sécuriser leurs revenus en cultivant en totalité leurs *tanety* et *baiboho*. Ils sont donc poussés à mettre en valeur du mieux possible ces surfaces et diversifient leurs activités pour en dégager un revenu : cultures de rente (arachides), élevage de porcs voire même de zébus et activités hors exploitation (taxi-bicyclette, ouvrier agricole...). Pour optimiser leurs cultures de *tanety* et augmenter leurs rendements la plupart des agriculteurs enquêtés ont adopté le SCV depuis plusieurs années et pratiquent des cultures de contre-saison sur les rizières (Durand, Nave, 2007).

ⁱ Dans la région du lac Alaotra, il y a un jour de repos par semaine (le dimanche) et un jour de travail interdit (le mardi ou le jeudi, associé à des croyances religieuses). Il y a donc 5 jours travaillés par semaine, soit 10 par quinzaine. Q1= 15 octobre au 31 octobre, Q2=1 novembre au 15 novembre, ..., Q24=1 octobre au 14 octobre.

C'est le type qualifié de plus « innovant », dans la mesure où il s'agit d'un type que l'on retrouve seulement dans les villages de migrants, ces agriculteurs n'ont pas peur des ruptures avec les anciens systèmes. Ils testent facilement les nouvelles techniques proposées.

Description de la structure

Les caractéristiques d'exploitation décrites ci-dessus combinées aux informations chiffrées de toutes les exploitations de type « D » dans Olympe nous permettent de proposer une structure d'exploitation organisée en plusieurs parties.

La famille et la main d'œuvre : Sur une exploitation, on trouve plusieurs membres de la famille qui représentent chacun une bouche à nourrir mais qui ne représentent pas la même force de travail (Tableau 1).

Tableau 1: Composition familiale

Membres familiaux	UTH ⁱ
Agé de plus de 60 ans	0,5
Homme de plus de 15 ans	1
Femme de plus de 15 ans	0,8
Enfant non-scolarisé	0,5
Enfant scolarisé	0

Source : Terrier, 2008

Lorsque la main d'œuvre familiale disponible n'est pas suffisante à l'accomplissement de tous les travaux agricoles, l'agriculteur peut embaucher de la main d'œuvre extérieure. Il existe plusieurs types de rémunération et celle-ci fluctue en fonction de la période. De manière générale, en saison un ouvrier travail 5 heures par jour pour 2 000 Ariary en période de forte demande (repiquage du riz et récolte) sinon pour 1 500 Ariary. En contre-saison, la rémunération est 20% moins chère, c'est-à-dire 1 200 Ariary par jour.

A chaque bouche à nourrir correspond une consommation de différents produits par an. Ces aliments sont soit directement produits par l'exploitation soit achetés à l'extérieur. Grâce au Réseau d'Observatoires Ruraux (ROR), un outil de suivi des conditions de vie des ménages qui couvre l'ensemble du territoire malgache, on connaît les consommations annuelles moyennes à Ambatondrazaka :

Pour une famille, il existe aussi un seuil de survie annuel: Il s'agit de la somme nécessaire pour vivre, très pauvrement bien sûr, de ses propres revenus (sans avoir recours au vol ou à la charité par exemple).

Le cheptel : Dans le modèle GANESH, nous avons décidé de prendre en compte les deux types d'animaux les plus couramment élevés : les zébus et les porcs. Comme l'étude se focalise sur les cultures, ces animaux représentent uniquement des charges, des revenus et des temps de travaux fixes, qui ne sont donc pas optimisés par le modèle et qui ne dépendent que du nombre de têtes.

Les activités sur et hors exploitations : Sur les différentes productions possibles au sein de l'exploitation, on peut forcer le modèle à proposer des solutions qui permettent de produire un minimum de certaines cultures. Pour cela, on saisit une quantité en kilogrammes d'un type de grains à produire par an. Par exemple, un agriculteur peut vouloir optimiser ses revenus en produisant tous les aliments qu'il consomme. Ainsi, les activités culturelles de l'exploitation sont orientées.

Pour compléter le revenu issu de l'exploitation, des membres de la famille peuvent exercer des activités off-farm (taxi-bicyclette, ouvrier agricole, épicerie,...) qui ajoutent un revenu supplémentaire. En fonction du type d'activité off-farm exercé, il peut y avoir une réduction de la

ⁱ UTH : Unité de Travail Humain. Ici, une UTH représentent 8 heures de travail par jour par personne (8 H.j), soit 40 heures de travail par personne par semaine ou encore 80 heures de travail par personne par quinzaine.

main d'œuvre familiale disponible. Ainsi, dans le modèle sont informés, par an, les revenus supplémentaires en kiloAriary et la diminution de main d'œuvre familiale en UTH.

Les surfaces agricoles cultivées : Une exploitation est composée de plusieurs types de surfaces agricoles. Il peut y avoir des surfaces cultivables de RMME, de *baiboho* ou encore de *tanety*. Chacune de ces surface est soit en propriété, dans ce cas la totalité de la récolte revient à l'agriculteur, soit en métayage, dans ce cas la récolte est partagée en deux parties égales entre le propriétaire et l'agriculteur.

Les surfaces en RMME et en *baiboho* constituent des charges, revenus et temps de travaux fixes (uniquement dépendant de la surface) dans le modèle. En effet, on a fait le choix de considérer des itinéraires techniques fixes pour ces types de sols (détaillé dans la partie suivante) car, dans un premier temps, ce sont les *tanety* qui vont être valorisées avec les systèmes innovants lorsque les autres types de sols sont saturés. En effet, lorsque la totalité des RMME et *baiboho* sont cultivés en riz, la valorisation des *tanety* est un moyen de diversifier la production de l'exploitation pour dégager un revenu supplémentaire. La culture de contre-saison est aussi possible sur ces deux types de sols. Elle correspond aussi à des entrées et sorties fixes dans le modèle. L'utilisateur peut faire le choix des surfaces et des années de culture de contre-saison (la surface restera la même sur les 6 ans) tant que ces surfaces restent inférieures aux surface en saison.

Les surfaces en *tanety* sont au cœur de l'optimisation du modèle. En effet, parmi les successions culturales proposées (détaillées dans la partie suivante), le modèle choisit la combinaison de successions culturales qui, au prorata des surfaces attribuées à chacun, répond aux contraintes et objectifs du modèle. Ainsi, la variation de l'assolement des *tanety* est directement liée au scénario que le modèle tente d'optimiser et la somme des surfaces de chaque succession culturale est inférieure à la surface en *tanety* disponible.

2.3.2.3 Création des successions culturales possibles

Comme il a été brièvement expliqué plus haut, l'optimisation du modèle consiste à combiner plusieurs successions culturales sur la surface disponible en *tanety* pour que, selon le scénarioⁱ, cette combinaison réponde aux contraintes et objectifs de l'exploitation modélisée. Dans cette partie, nous allons définir ce qu'est une succession culturale et comment elle est construite.

Définition d'une succession culturale

Le but du modèle étant d'intégrer des systèmes de cultures SCV chez les agriculteurs, il faut proposer des successions d'activités culturales (CPA)ⁱⁱ conventionnelles et SCV dans le temps pour toute la durée du modèle. Une succession de CPA donnés sur une même parcelle (donc sur une même surface) est appelée « succession culturale ». Nous ne pouvons parler ici de rotation culturale car une activité culturale peut se succéder à lui-même plusieurs fois.

La notion de CPA est une extension de la notion d'itinéraire technique à un pas de temps plus long, pouvant prendre en compte plusieurs cultures qui se succèdent. Dans notre étude, on entend par 'CPA' toute production végétale faisant intervenir une ou plusieurs plantes cultivées avec un itinéraire technique défini sur une saison à plusieurs années sans jamais être aussi long que la durée totale du modèle. De ce fait, la durée du modèle est deux fois plus importante que la durée du CPA le plus long pris en compte, de manière à ce que tous les CPA puissent être répétés au moins deux fois dans une succession culturale. Par exemple, une culture de maïs sur labour en saison des pluies correspond à un CPA conventionnel ; une culture sans labour de maïs associé à du *Stylosanthes* la

ⁱ Un scénario correspond à une exploitation agricole donnée (une composition familiale, un cheptel, des surfaces agricoles,...) dans un cadre de contraintes et d'objectifs.

ⁱⁱ Terme traduit de l'anglais *crop production activity (CPA)*, couramment utilisé dans la littérature en modélisation, notamment dans les travaux de Bachinger et Zander (2007) pour la création de rotations culturales.

première année suivie la deuxième année de la culture du Stylosanthes seul correspond à un CPA SCV.

Pour construire les successions culturales mises à disposition du modèle, il faut donc, dans un premier temps, recenser les principaux CPA (conventionnels ou SCV) qui existent au lac Alaotra.

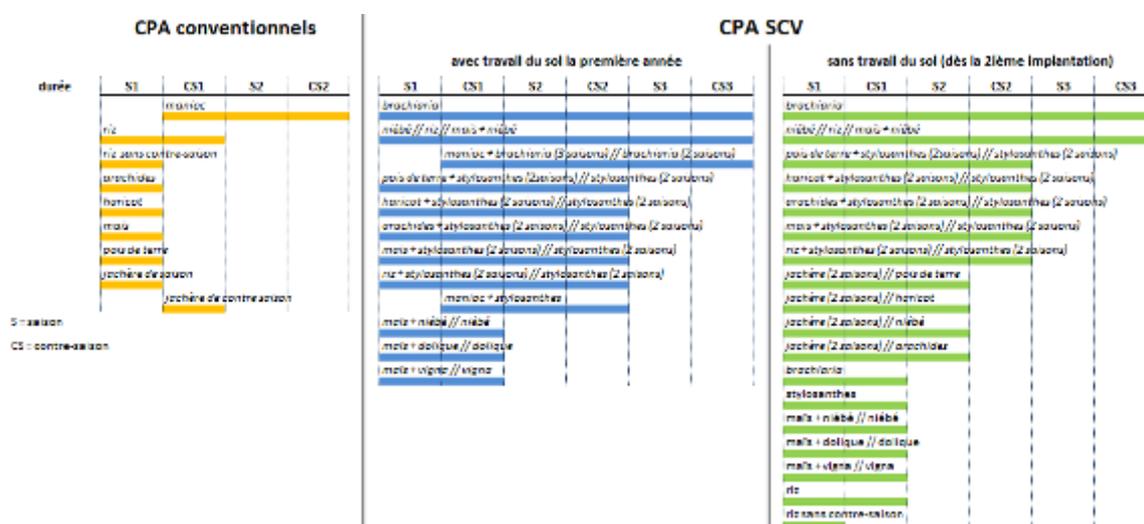


Figure 3: Présentation des 39 CPA selon leur durée et leur type

Source : création personnelle

Les CPA pris en compte dans le modèle

D’après les ITK std fournis par BRL, les enquêtes de Méduline Terrier (2008) et les entrées du logiciel Olympe, 39 CPA ont été recensés (Figure 3). Par convention, le signe « + » équivaut à une association de cultivars dans le temps et dans l’espace ; le signe « // » correspond à une succession dans le temps. A chaque CPA correspond un itinéraire technique comprenant des temps de travaux par quinzaine, des intrants par saison (semences, engrais et pesticides) et des rendements par saison.

Construction des successions culturales

Les CPA les plus longs s’étalent sur 3 ans ou encore 6 saison. Comme expliqué plus haut, la durée du modèle est donc de 6 ans. Ainsi les successions culturales ont la même durée que le modèle, 6 ans. Si l’on tente de générer toutes les successions possibles sur 6 ans avec tous les CPA, on obtient des millions de d’enchaînements possibles¹. Pour cette raison, il faut réduire les possibilités en instaurant des règles de succession. Cette méthode est d’autant plus logique que dans la réalité on ne retrouve pas toutes les possibilités mathématiques. En effet, dans la littérature traitant d’études menées sur la gestion des rotations ou successions culturales, on retrouve quatre types de contraintes de successions (Castellazzi *et al.*, 2007) :

- ✓ Des contraintes de répétition : un CPA ne peut être répété qu’un certain nombre de fois dans la succession culturale ou alors ne peut être répété qu’après un certaine durée. Ce genre de contraintes est typiquement créé pour rompre avec le cycle des adventices ou des ravageurs ;
- ✓ Des contraintes d’effets sur le CPA suivant : les effets peuvent être positifs (stockage d’azote, disponibilité de matière organique pour la culture suivante) ou négatifs (mauvaise structure du sol, développement accru d’adventices) ;
- ✓ Des contraintes de calendrier : la récolte d’une culture doit se faire avant le semis de la culture suivante et chaque CPA à une saison précise d’implantation.

¹ En ne prenant en compte que les CPA d’une durée de 1 ou 2 saisons, on obtient 17⁶ enchaînements possibles, soit 24 137 569 possibilités.

- ✓ Des contraintes de moyens : les moyens disponibles (main d'œuvre et machines) ne sont pas suffisants pour cultiver simultanément plusieurs cultures. Dans nos règles de succession, ce dernier type de contrainte n'est pas pris en compte. En revanche, ces contraintes sont intégrées plus en aval dans le modèle.

Tableau 2: Liste des contraintes prises en compte dans la création des successions culturales

CONTRAINTES DE REPETITION	justification
Les CPA de riz sur 1 ou 2 saisons ne peuvent être répétés que 3 fois <i>Tous les autres CPA peuvent être répétés autant de fois qu'ils le peuvent</i>	Pour assurer une fertilité du sol et des rendements constants
CONTRAINTES DE CALENDRIER	justification
Lorsqu'un CPA se termine en contre-saison, le CPA suivant doit débuter en saison	Pour qu'il n'y ait ni de chevauchement, ni de vide au sein de la succession culturale
Lorsqu'un CPA se termine en saison, le CPA suivant doit débuter en contre-saison	
La fin du dernier CPA d'une succession culturale doit concorder avec la fin de la succession culturale	Pour que toutes les CPA soient pris en compte en entier
CONTRAINTES D'EFFETS	justification
Deux cultures de riz ne se succèdent jamais	La seconde culture nécessiterait trop d'intrants pour assurer un rendement convenable
Une culture de riz ne succède jamais à une culture de brachiaria Un CPA SCV doit toujours succéder à un CPA produisant de la biomasse	Pour assurer un rendement convenable et limiter la repousse des adventices
Il doit y avoir un minimum de deux ans de jachère de cynodon avant les CPA SCV de pois de terre, haricot, niébé ou arachide	Pour que le cynodon ait le temps de pousser suffisamment pour produire de la biomasse
Les CPA SCV de plantes associées doivent se succéder à elles-mêmes, à du stylosanthes ou à du riz SCV	Les CPA SCV de plantes associées ont pour but de créer de la biomasse pour implanter ces CPA
REGLES DE LOGIQUE	Justification
La paille de riz de contre-saison ne peut être remplacée par de la jachère de contre-saison	Pour ne pas doubler le nombre de successions culturales contenant une culture de riz (l'itinéraire technique de contre-saison de jachère ou de paille de riz est identique)
Lorsqu'un CPA est de type SCV, tous les CPA suivants doivent être de type SCV	Même si le retour au conventionnel est possible dans la réalité, une parcelle cultivée en SCV n'a pas de raison de repasser au conventionnel, particulièrement dans une optique d'intégration de techniques innovante
Les CPA de brachiaria et stylosanthes sur 2 saisons ne peuvent que se succéder à eux-mêmes ou un CPA ayant respectivement du brachiaria ou du stylosanthes	Ces CPA sur 2 saisons ont été créés spécialement pour prolonger les systèmes contenant du brachiaria ou du stylosanthes
Les CPA contenant du manioc ou du brachiaria ne peuvent succéder à des CPA de type riz+stylosanthes	Lorsqu'un agriculteur met en place du stylosanthes, c'est au minimum 2 ans pour améliorer la fertilité de sa parcelle. Il va valoriser cette amélioration avec une plante plus exigeante et plus intéressante économiquement que du brachiaria ou du manioc

Source : données personnelles

On retrouve effectivement les trois premiers types de contraintes dans les règles d'enchaînement des successions culturales de notre modèle. S'ajoute à ces contraintes des règles de logique qui permettent de limiter les répétitions de successions culturales (Tableau 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Toutes ces contraintes sont intégrées dans une macro VBA qui automatise la génération des successions culturales possibles en combinant les différents CPA recensés. On obtient alors 141 360 successions culturales possibles sur *tanety*. A chaque enchaînement correspond un itinéraire technique issu des itinéraires techniques combinés des CPA qui le compose, avec :

- ✓ Les temps de travaux par quinzaine sur 12 saisons sur 6 ans (144 quinzaines) ;
- ✓ Trois types d'intrants (semences, engrais et produits phytosanitaires) par saison sur 6 ans (36 entrées) ;
- ✓ Les rendements de 16 produits possibles par saison sur 6 ans (192 entrées).

Tableau 3: Liste des paramètres du modèle

MAIN D'ŒUVRE		
Paramètre	Unité	Sets
Main d'œuvre familiale	Heure/quinzaine	
Main d'œuvre extérieure	Ariary	Quinzaine
CULTURES		
Paramètre	Unité	Sets
Surface cultivée	ares	Sol, acquisition
Prix de vente	Ariary/kg	Produit
Rendement de RMME	kg/are	Année, saison, produit
Intrants de RMME	Ariary	Année, saison, intrant
Travail de RMME	heure	Année, saison, quinzaine
Rendement de <i>baiboho</i>	kg/are	Année, saison, produit
Intrants de <i>baiboho</i>	Ariary	Année, saison, intrant
Travail de <i>baiboho</i>	heure	Année, saison, quinzaine
Rendement des successions	kg/are	Année, saison, produit
Intrants des successions	Ariary	Année, saison, intrant
Travail des successions	heure	Année, saison, quinzaine
CHEPTEL		
Paramètre	Unité	Sets
Cheptel	unité	Animal
Ration	kg/an	Animal
Charges élevage	Ariary/an	Animal
Revenus élevage	Ariary/an	Animal
FAMILLE		
Paramètre	Unité	Sets
Bouches à nourrir	unité	
Consommation	kg/an	Produit
Seuil de survie	Ariary/an	
ACTIVITES		
Paramètre	Unité	Sets
Revenu off-farm	Ariary	Année
Perte de main d'œuvre	UTH	Année
Production minimale	kg/an	Produit
PARAMETRES EXOGENES		
Paramètre	Unité	Sets
Aléas	%	Sol, année
Ratio de SCV	%	Année

Source : données personnelles

2.3.2.4 Contraintes et objectifs du modèle

Sets et paramètres du modèle

Tout d'abord, chaque tableau de données Excel importé sous GAMS est transformé en paramètre, ces paramètres étant par la suite utilisés dans les équations mathématiques correspondant aux contraintes et objectifs du modèle. A chaque paramètre correspond un pas de temps, une unité et un ou plusieurs sets dont il dépend. Il faut donc préalablement définir les sets pris en comptes (Tableau 4).

Tableau 4: Liste des sets du modèle

SURFACES CULTIVEES	
Set	Composantes
Sol	Tanety, baiboho, RMME
Acquisition	En propriété, en métayage
ECHELLE DE TEMPS	
Set	Composantes
Année	1 à 6
Saison	Saison, contre-saison
Quinzaine	1 à 24
CULTURES	
Set	Composantes
Intrant	Semences, engrais, produits phytosanitaires
Produit	Riz, maïs, manioc, stylosanthes, ...
Succession	1 à 141 360
CHEPTEL	
Set	Composantes
Animal	Zébu, porc

Source : données personnelles

Une fois les sets définis, on peut présenter les différents paramètres pris en compte dans le modèle (

Tableau 3). Lorsqu'un paramètre est défini par une unité de temps, il ne dépend pas de sets temporels (Année, saison, quinzaine) et cela signifie que la valeur de ce paramètre reste constante au cours du temps. A l'inverse, lorsqu'un paramètre dépend d'un ou plusieurs sets temporels, cela signifie que la valeur de ce paramètre évolue au cours du temps. Par exemple, la main d'œuvre familiale disponible est constante au cours des 144 quinzaines des 6 ans du modèle ; le prix de la main d'œuvre extérieure varie selon la quinzaine mais cette variation est identique d'année en année.

Les paramètres Aléas et Ratio de SCV n'ont pas encore été mentionnés dans l'étude. Ceux-ci correspondent à des paramètres que l'utilisateur peut faire varier pour ajouter des contraintes aux modèles. Ces paramètres ne sont pas directement liés à la structure de l'exploitation, on parle donc de paramètres exogènes.

Le paramètre Aléas correspond à une perte de rendement en riz conventionnel qui peut être due à des aléas climatiques ou plus généralement d'ordre environnemental. En effet, cela permet de formaliser l'un des avantages des techniques SCV : les systèmes SCV font effet tampon et permettent de stabiliser les rendements d'année en année et sont beaucoup moins sensibles aux variations climatiques et environnementales que les cultures conventionnelles (Domas *et al.*, 2008). Cet effet n'a jamais été mesuré au lac Alaotra, mais à dire d'expert, il y est souvent observé. Les travaux de Naudin *et al.* (2010) au Nord-Cameroun corroborent cette observation : Pour la culture cotonnière, on observe une nette différence de rendements entre techniques SCV et conventionnelle dans la région Extrême-Nord où le climat est très sec ; en revanche, les rendements sont identiques en région Nord où les précipitations sont importantes. Les systèmes SCV expriment donc leur potentiel dans des conditions climatiques difficiles. Le fait d'appliquer les pertes de rendement uniquement sur le riz conventionnel est très caricatural car ces pertes devraient s'appliquer sur toutes les cultures conventionnelles ; mais cela permet de prendre en compte cet effet tampon sans surcharger le modèle avec des contraintes trop fortes qui ralentissent voire empêchent la résolution des calculs.

Le paramètre Ratio de SCV correspond au pourcentage surfacique de *tanety* cultivé en SCV. Celui-ci permet d'envisager plusieurs types d'intégrations des techniques innovantes en forçant le modèle à intégrer plus ou moins rapidement les techniques SCV dans les successions culturales choisies.

Variables du modèle

De la même manière que les paramètres, les variables utilisés dans le modèle sont définies par une unité et dépendent de sets à la différence que les paramètres sont fixés et que les variables sont optimisées pour répondre aux objectifs. Ainsi, une fois exécuté pour un scénario donné, le modèle attribue des valeurs aux différentes variables. Ce sont les sorties du modèle ou encore les résultats que l'on analyse. Le modèle GANESH optimise 10 variables (Tableau 5).

Tableau 5: Liste des variables du modèle

VARIABLE	Type de variable	Unité	Sets
Solde de l'exploitation	continue	Ariary/6 ans	
Marge brute ⁱ <i>tanety</i>	continue, positive	Ariary	Année
Marge brute <i>baiboho</i>	continue, positive	Ariary	Année
Marge brute RMME	continue, positive	Ariary	Année
Travail Familial	continue	Heures/6 ans	
Travail Familial par quinzaine	continue, positive	heures	Année, saison, quinzaine, sol
Travail extérieur	continue, positive	jours	Année, saison, quinzaine, sol
Surface de succession	entière, positive	ares	Succession, acquisition
Production	continue, positive	kg	Année, produit
Quantité achetée	continue, positive	kg	Année, produit

Source : données personnelles

La combinaison des paramètres et des variables présentées ci-avant sous forme d'équations et d'inéquations représentent la formalisation mathématiques des contraintes et objectifs du modèle.

Contrainte d'assolement

La somme des surfaces des différents successions choisies par le modèle ne doit pas dépasser la surface disponible en *tanety*.

$$\sum_{\text{successions}} [\text{Surface de succession}(\text{succession})] \leq \text{Surface cultivée}(\text{tanety})$$

Contrainte de travail familial

Pour chacune des 144 quinzaines du modèle, le travail familial par quinzaine ne doit pas excéder la main d'œuvre familiale disponible par quinzaine.

$$\text{Par quinzaine : } \sum_{\text{sols}} [\text{Travail Familial par quinzaine}(\text{année, saison, quinzaine, sol})] \leq \text{Main d'œuvre familiale}$$

Contrainte de seuil de survie

Le solde annuel de l'exploitation agricole doit couvrir les dépenses minimums de la famille (seuil de survie).

$$\text{Par année : } \text{Marge brute } \text{tanety}(\text{année}) + \text{Marge brute } \text{baiboho}(\text{année}) + \text{Marge brute RMME}(\text{année}) + \text{Marge brute élevage}(\text{année}) + \text{Revenu off-farm}(\text{année}) - \text{Consommation} \leq \text{Seuil de survie}$$

Contrainte de consommation

Chaque année, la somme de la production et des quantités achetées doit couvrir la consommation de la famille.

$$\text{Par année, par produit consommé : } \text{Production}(\text{produit, année}) + \text{Quantité achetée}(\text{produit, année}) \geq$$

ⁱ Solde = Marge brute totale + revenus off-farm – dépenses familiales. Il n'y a pas de charges de structures, d'amortissements ou de frais financiers. Les dépenses familiales correspondent à l'autoconsommation.

Marge brute totale = Marge brute *tanety* + Marge brute *baiboho* + Marge brute RMME + Marge brute élevage

ⁱⁱ Marge brute = Produits – charges opérationnelles. Les charges opérationnelles comprennent les intrants et la main d'œuvre temporaire.

Consommation x Bouches à nourrir

Contrainte d'alimentation animale

Chaque année, la production de son de riz doit couvrir les besoins des porcs.

Par année :

$$\begin{aligned} & \text{Production}(\text{son de riz, année}) \\ & \geq \\ & \text{Cheptel}(\text{porc}) \times \text{Ration}(\text{porc}) \end{aligned}$$

Contrainte de production

Si l'agriculteur souhaite orienter sa production, il peut choisir de forcer le modèle à produire certains produits.

Par année, pour un produit :

$$\begin{aligned} & \text{Production}(\text{produit, année}) \\ & \geq \\ & \text{Production minimale}(\text{produit}) \end{aligned}$$

Contrainte de pratiques SCV

Cette contrainte est exogène à l'exploitation. En effet, comme expliqué plus haut, elle est paramétrable par l'utilisateur et permet de forcer ou de limiter le modèle à choisir des successions culturales contenant plus ou moins de CPA SCV. Cette contrainte permet donc de mettre en place plusieurs scénarios d'intégration des SCV dans une exploitation

Par année, sur tanety :

$$\begin{aligned} & \text{Surface de succession en SCV} \div \text{Surface cultivée}(\text{tanety}) \\ & \leq \\ & \text{Ratio de SCV}(\text{année}) \end{aligned}$$

Objectif 1 : Maximiser le solde de l'exploitation sur 6 ans

L'objectif est de trouver la combinaison de successions culturales qui réponde à toutes les contraintes et qui permette de dégager un revenu maximal à la fin du modèle (ici, le solde). Il faut donc maximiser cette équation :

$$\begin{aligned} & \sum_{\text{années}} [\text{Marge brute tanety}(\text{année}) + \text{Marge brute baiboho}(\text{année}) + \text{Marge brute RMME}(\text{année}) + \\ & \quad \text{Marge brute élevage}(\text{année}) + \text{Revenu off-farm}(\text{année}) - \text{Consommation}] \\ & = \\ & \quad \text{Solde de l'exploitation} \end{aligned}$$

Objectif 2 : Minimiser la charge de travail familial sur 6 ans

Le second objectif est de libérer du temps pour pouvoir exercer des activités off-farm, génératrices de revenus supplémentaires. Il faut donc minimiser cette équation :

$$\begin{aligned} & \sum_{\text{sols, années, saisons, quinzaines}} [\text{Travail Familial par quinzaine}(\text{année, saison, quinzaine, sol})] \\ & = \\ & \quad \text{Travail Familial} \end{aligned}$$

2.4 Validation du modèle

Une fois le modèle construit, il est important de le valider ; c'est-à-dire d'en vérifier la pertinence. Ici, la question que l'on se pose pour valider le modèle est la suivante : Le modèle, tel qu'il est construit, est-il capable de reproduire des données observées ? En effet, en saisissant les données d'un agriculteur réel dans le modèle (en l'occurrence, un agriculteur appartenant au type d'exploitation « D », type ayant inspiré la structure du modèle) et en comparant les solutions du modèles avec les données technico-économiques réelles de l'exploitation, on peut en déduire, si les résultats sont similaires, que :

- ✓ La structure d'exploitation modélisée reproduit la structure des exploitations réelles ;
- ✓ Les contraintes et objectifs pris en compte dans le modèle retranscrivent la logique du terrain (règles de décisions, contraintes agronomiques, objectifs de productions...);
- ✓ La liste des différentes successions culturales (avec leurs caractéristiques) proposée par le modèle est exhaustive.

Dans cette étude, nous ne détaillerons pas le processus de validation du modèle. Nous tiendrons uniquement compte des résultats de cette validation : Il semble que les calculs, équations et inéquations qui structurent le modèle sont la formalisation d'une représentation simplifiée mais valide de la réalité de fonctionnement des exploitations de la région du lac Alaotra. En revanche, la troisième hypothèse de validité est rejetée. En effet, la liste des différentes successions culturales proposées au modèle n'est pas exhaustive. La liste des différents ITK std pris en compte dans le modèle sont des moyennes. Or, il existe une forte variabilité dans la réalité qui n'est pas retranscrite dans notre modèle. Cependant, cela n'est pas gênant car GANESH est un modèle d'optimisation devant proposer des techniques culturales innovantes qui ne sont pas toutes appliquées dans la réalité, au contraire d'un modèle de simulation tel qu'Olympe qui se base sur des données réelles.

2.5 Test de différentes contraintes et analyse des résultats

Les sorties du modèle ou encore les résultats que l'on peut analyser pour un test donné, sont de plusieurs ordres. Il y a :

- ✓ Des sorties économiques :
- ✓ Des sorties de production :
- ✓ Des sorties de main d'œuvre :

Pour un même test, nous analyserons l'évolution d'une partie ou de l'ensemble de ces résultats en fonction des différents scénarios, en nous inspirant de la méthode employée par Baijukya (2004). Lorsque la modélisation est de type multi-objectifs (dans notre cas, 2 objectifs), le principe est d'optimiser chaque objectif l'un après l'autre en laissant les autres objectifs ouverts, c'est-à-dire paramétrer les autres objectifs pour qu'ils ne représentent pas de contrainte pour le modèle. Les résultats obtenus donnent les bornes des solutions possibles. Ensuite, il suffit d'optimiser un des objectifs en faisant varier unité par unité, dans les bornes précédemment trouvées, les autres objectifs passés alors en contraintes.

Dans notre cas, on maximise le solde de l'exploitation sans contrainte de travail familial dans un premier temps. On obtient donc le solde maximal S_{max} pour un certain nombre d'heures de travail familial H_{max} . Ensuite, on minimise le temps de travail familial sans contrainte de solde. On obtient alors le temps de travail familial minimal H_{min} . Enfin, on maximise le solde d'exploitation tout en fixant une contrainte de travail familial que l'on fait varier entre H_{min} et H_{max} . On analyse alors l'évolution des différentes sorties du modèle dans cet intervalle pour en tirer des conclusions.

2.5.1 Test 1 : un agriculteur dit « standard »

Dans un premier temps, pour prendre en main le modèle et pour comprendre les différentes interactions et relations qui existent entre les paramètres et les différents résultats, nous proposons d'analyser l'évolution des sorties du modèle dans le cas d'un agriculteur « standard ». On entend par « standard » un agriculteur dont les caractéristiques représentent la moyenne des agriculteurs de type « D ». En générale, les agriculteurs préfèrent produire sur l'exploitation leur consommation annuelle. Ils orientent donc leurs activités culturales pour couvrir les besoins de la famille. On remarquera que cette logique n'est pas entièrement respectée dans notre modèle. En effet, les productions forcées ne satisfont pas les besoins en pois de terre et arachides. Cela est dû à un problème technique : plus on fixe de contraintes au modèle, plus les temps de calculs sont longs. Ainsi, lorsque le nombre de contraintes à respecter est trop important, les calculs peuvent durer plusieurs heures ou alors ne pas aboutir (dépassement de capacité du solveur ou de l'ordinateur). Il faut donc restreindre les règles. Dans notre cas, nous avons fait le choix de ne pas forcer le modèle à

couvrir tous les besoins en ôtant la production forcée d'arachide et pois de terre car, avec le niébé et le haricot, ce sont les produits les moins consommés par la famille et leurs cultures sont moins lucratives que celle de haricot.

surfaces (ares):		Propriété	Métayage	contre-saison						Composition familiale:	
				1	2	3	4	5	6		
RMMF	100	0								Membres > 60 ans	0
RMMF contre-saison	0	0	<input type="checkbox"/>	Hommes > 15 ans	1						
Baïboho	50	0								Femmes > 15 ans	1
Baïboho contre-saison	15	0	<input checked="" type="checkbox"/>	Total d'enfants < 15 ans	3						
tanety	50	0								Enfants scolarisés	2
Chaptel (têtes):											
Zebu	3										
Swine	2										
Production forcée (kg):											
haricots	50										
maïs	60										
riz blanc	690										
manioc	250										
		Consommation annuelle (kg/pers.):									
		Riz blanc: 138									
		Maïs: 12									
		Arachides/Pois de terre: 10									
		Haricot/Niébé: 10									
		Manioc: 50									
										Bouches à nourrir	5
										Force de travail familiale	2.3 UTH

Figure 4: Caractéristiques d'une exploitation « standard »

Source : copie d'écran de l'interface Excel du modèle GANESH

2.5.2 Test 2 : Différents niveaux d'intégration des SCV

Dans ce test, nous proposons de forcer l'agriculteur à intégrer une certaine surface de systèmes SCV dans son assolement de *tanety* pour évaluer les effets d'une plus ou moins rapide intégration sur les différentes sorties du modèle (production, solde d'exploitation, charge de travail...).

Pour ce faire, nous proposons d'utiliser l'exploitation standard décrite ci-avant (Figure 4), sans mettre de contraintes de disponibilité en main d'œuvre familiale, c'est-à-dire proposer le travail familial maximum de 174 heures par quinzaine. Nous forçons ensuite le modèle à prendre en compte un certain pourcentage surfacique de systèmes SCV dans la combinaison de successions culturales choisies la deuxième année et observons l'évolution sur les années suivantes. Etant donné qu'au sein d'une succession culturale le retour au conventionnel est interdit après un passage en système SCV, le ratio de surface SCV sur la surface totale ne peut que rester constant ou augmenter au cours des années.

2.5.3 Test 3 : Sensibilité des exploitations agricoles aux aléas climatiques

Dans un modèle comme GANESH, le mécanisme de causes et conséquences est l'inverse de la réalité. En effet, une exploitation agricole réelle est composée de ses systèmes de cultures qui peuvent subir des aléas climatiques. En fonction des types de cultures, de la nature de l'aléa et du stade de croissance des plantes cultivées, les cultures subissent des pertes de rendements qui affectent directement les résultats économiques de l'exploitation. Ici, le raisonnement est inversé : les aléas climatiques sont connus à l'avance car ils sont simulés par l'utilisateur. De même, la sensibilité des cultures aux aléas climatiques et de ce fait, les résultats économiques de fin de campagne qui en découlent, sont calculés et connus à l'avance. Ainsi, le modèle ajuste les activités culturales de l'exploitation pour dégager le meilleur solde d'exploitation. Il faut donc toujours inverser l'interprétation des résultats : En appliquant plusieurs intensités d'aléas climatiques sur une exploitation de départ, le but n'est pas de comprendre comment l'exploitation agricole s'adapte à ces différents cas mais plutôt de comprendre pourquoi une exploitation, avec une configuration donnée, dégage le solde le plus important. De plus, l'un des avantages des systèmes de culture SCV est de faire tampon lors d'aléas climatiques, en conservant des rendements stables. Ce test est donc l'occasion de vérifier ce postulat. Les exploitations agricoles les moins sensibles aux aléas climatiques sont-elles celles qui intègrent le plus de SCV dans leur systèmes de cultures ?

De la même manière que pour le test 2, nous proposons de partir du même agriculteur standard de départ, sans contrainte de disponibilité en main d'œuvre familiale. Cette première situation représente donc l'état d'une exploitation ne subissant aucun aléa climatique. Nous soumettons ensuite l'exploitation à des aléas climatiques causant des pertes de rendement en riz conventionnel de 30% sur toutes ses surfaces (RMME, *baiboho* et *tanety*) une année sur trois. Enfin, nous appliquons ces pertes de rendement une année sur deux.

2.5.4 Test 4 : Production laitière et fourragère

Ici, nous allons comparer une exploitation laitière à l'exploitation standard utilisée dans tous les tests. Contrairement aux autres tests, le but n'est pas d'analyser les sorties du modèle pour différents scénarios. Nous n'allons donc pas proposer plusieurs types d'exploitations laitières. Nous souhaitons ouvrir la réflexion sur d'autres possibilités d'usage du modèle. En effet, les tests précédents se focalisent principalement sur les effets technico-économiques de l'intégration des SCV dans une exploitation consacrée exclusivement à la production végétale dans l'optique de vente ou d'autoconsommation. Or, parmi les CPA présentés, certains produisent des fourrages. On peut donc modéliser des exploitations laitières qui souhaitent autoproduire leur fourrage. Pour cela, les paramètres concernant les zébus doivent être modifiés. On utilise les données des travaux de Rakotosolofo (2010).

Les zébus du modèle sont transformés en vaches laitières. On choisit la race « *rana* », une race malgache de 300 kg avec une productivité moyenne. Dans la plupart des exploitations utilisant le brachiaria comme fourrage, la vache est nourrie au brachiaria pendant 6 mois de l'année pour produire, puis elle est nourrie à la paille de riz pour couvrir l'entretien le reste de l'année. Les 6 premiers mois, cela représente :

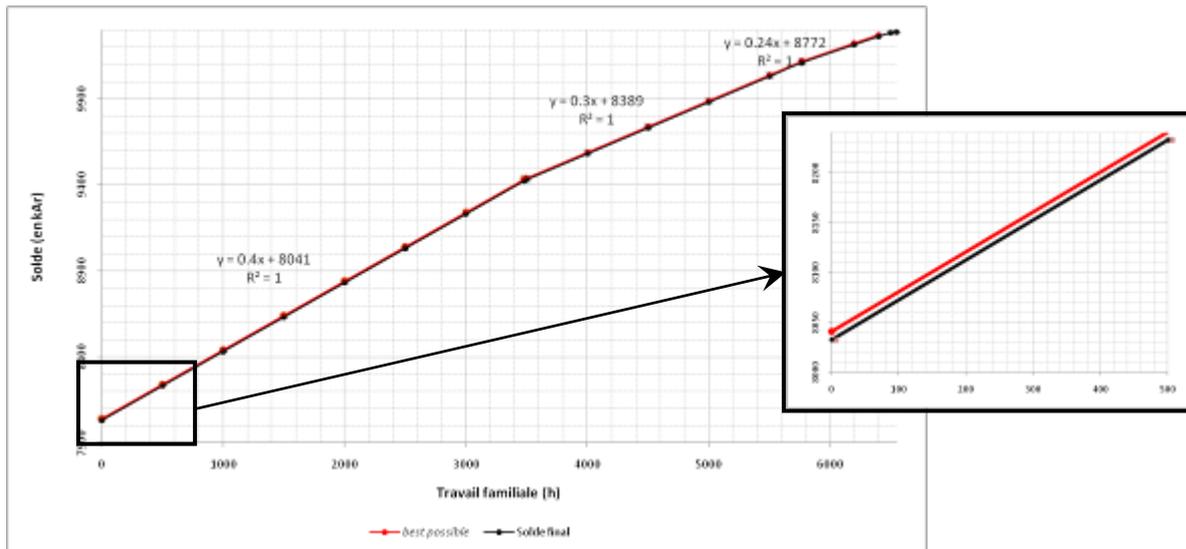
- ✓ 6,64 kg de matière sèche de brachiaria par ration journalière, soit 1 212 kg ;
- ✓ Une production de lait de 2,76 L par jour, à 1 kAr/L, soit 503,7 kAr.

Les 6 derniers mois, cela représente 5,73 kg de paille de riz par ration journalière, soit 1 046 kg. Les rendements annuels de brachiaria dans notre modèle étant de 5 400 kg/ha, un agriculteur possédant 50 ares de *tanety* (2 700 kg de brachiaria produit, au maximum) peut autoproduire le fourrage pour 2 vaches laitières mais nous choisissons de n'avoir qu'une seule vache laitière sur l'exploitation pour laisser l'opportunité au modèle de produire d'autres cultures et de satisfaire l'autoconsommation.

3 Résultats & Analyse

3.1 Maximisation du solde d'exploitation et minimisation de la charge de travail familial chez un agriculteur standard

Lorsqu'on maximise le solde d'une exploitation en diminuant progressivement la disponibilité en main d'œuvre familiale, on obtient les résultats suivant (Figure 5):



Source : traitement Excel des sorties de GANESH

Figure 5: Evolution du solde d'exploitation en fonction de la main d'œuvre familiale disponible. L'écart entre les solutions optimales (*best possible*) et les solutions proposées par le modèle est extrêmement faible. En effet, l'écart relatif (*relative gap*) est toujours inférieur à 0,1%. On peut donc interpréter les résultats en se basant sur l'évolution des solutions optimales.

Pour une exploitation standard, le solde maximal sur 6 ans est de 10 288 kAr pour 6 548 heures de travail familial. Le travail familial peut être diminué et même supprimé. Dans ce cas, le solde baisse à 8 032 kAr. De manière générale, moins il y a de main d'œuvre familiale disponible, plus le solde de l'exploitation est faible ; ce que l'on pressent intuitivement. Effectivement, la main d'œuvre familiale que l'on diminue est compensée par de la main d'œuvre extérieure qui présente un coût et donc une charge supplémentaire qui diminue le solde de l'exploitation. Seulement, il semble que ce ne soit pas le seul facteur qui intervienne dans l'évolution du solde car la relation entre solde et main d'œuvre familiale n'est pas linéaire sur l'intégralité de la variation. En effet, on observe trois intervalles de linéarités (de 0 à 3 480 heures ; de 3 480 à 5 767 heures ; de 5 767 à 6 400 heures) et un cas particulier au niveau des maximums, ce qui laisse deviner une certaine régularité au sein de chaque intervalle et un probable changement d'autres facteurs (assolement, successions culturelles...) entre chacun.

Tableau 6: Choix des successions culturelles de 0 à 6 548 heures de travail familial pour une exploitation standard sur 6 ans

													S=saison ; CS=contre-saison						
				surface (en ares)	S1	CS1	S2	CS2	S3	CS3	S4	CS4	S5	CS5	S6	CS6			
0 à 3000 h de travail familial																			
1				32	maïs+dolique sur labour	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz			
2				9	riz conv.	paille de riz	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	jachère			
5				9	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.			
3480 à 4000 h de travail familial																			
1				32	maïs+dolique sur labour	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz			
3				9	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.			
4				9	haricot conv.	jachère	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	jachère			
4500 à 5767 h de travail familial																			
1				32	maïs+dolique sur labour	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz			
2				9	riz conv.	paille de riz	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	jachère			
5				9	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.			
surface (en ares)	surface (en ares)	surface (en ares)	surface (en ares)																
6200	6400	6500	6548	h de travail familial															
1				31	29	22	15	maïs+dolique sur labour	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz
3				9	9	9	9	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
4				9	9	9	9	haricot conv.	jachère	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	jachère	
6				1	3	10	17	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
6419 h de travail familial sans contrainte de production																			
1				22	maïs+dolique sur labour	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz			
6				28	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.			

Source : traitement Excel des sorties du modèle GANES

Les successions culturales proposées par le modèle sont de deux types (Tableau 6). D'un côté, on trouve les successions n°1 et n°6 qui sont les enchaînements culturaux permettant de maximiser le revenu ; ce sont les cultures de rente. En effet, lorsque l'on supprime les contraintes de productions forcées, les seules successions culturales proposées par le modèle sont les n°1 et n°6. La combinaison de ces deux successions sur la totalité des surfaces en *tanety* permet donc de dégager le meilleur revenu en trouvant l'équilibre entre produits, intrants, travail familial et emploi de main d'œuvre extérieur. D'un autre côté, on trouve les successions culturales n°2, 3 4 et 5 qui permettent d'assurer les productions forcées ; ce sont les cultures vivrières. En effet, les surfaces en *baiboho* et RMME couplées aux successions n°1 et n°6 couvrent les besoins en riz et maïs. Les productions de haricot et manioc sont donc assurées par les successions n°2, 3, 4 et 5. Ces successions ne sont composées que de CPA conventionnels de manioc et haricot et leur surface reste constante (9 ares par succession), peu importe le nombre d'heure de main d'œuvre familiale disponible. Ces quatre successions culturales combinées entre elles (n°2 et n°5 d'une part, n°3 et n°4 d'autre part) offrent exactement les mêmes productions, pour les mêmes intrants et pour le même nombre d'heures de travail. Le fait que le modèle choisisse l'une ou l'autre des combinaisons n'est pas explicable de manière claire ; cela doit être lié à la nature intrinsèque de l'algorithme de résolution employé.

De 6 400 à 6 548 heures de travail familial

Sur cet intervalle, la relation entre solde d'exploitation et main d'œuvre familiale disponible n'est pas linéaire. Le solde ne varie que très peu (10 288 kAr pour 6 548 heures, 10 286 kAr pour 6 500 heures). Une perte de 2 kAr correspond environ à 7 heures de travail extérieur supplémentaire.

Or ici, 48 heures de travail familial sont supprimées. La perte de main d'œuvre familiale est donc compensée par la modification d'autres facteurs que la main d'œuvre extérieure pour minimiser les pertes de revenu.

En effet, on constate un changement de l'assolement avec la diminution de la disponibilité en main d'œuvre familiale (Tableau 6): Moins il y a de main d'œuvre familiale disponible, moins il y a de surface allouée à la succession n°6 et inversement, plus il y a de surface allouée à la succession n°1, ceci jusqu'à la disparition complète de l'enchaînement cultural n°6. La succession culturale n°1 est de type SCV alors que la succession n°6 est de type conventionnel. Le fait d'augmenter les surfaces en SCV (30% des surface de *tanety* sont en SCV pour 6 458 heures ; 64% sont en SCV pour 5 767 heures) permet d'augmenter le revenu sans trop augmenter la charge de travail totale. Ainsi, la diminution de solde causée par l'augmentation de main d'œuvre extérieure est compensée par une augmentation de revenu dégagé par les *tanety* (2 498 kAr pour 6 548 heures, 2 540 kAr pour 6 400 heures). Ceci est la représentation d'un des avantages des techniques SCV : l'heure travaillée est mieux valorisée.

De 0 à 6 200 heures de travail familial

Sur cet intervalle, les CPA et les assolements restent constants. Etant donnée la disponibilité en main d'œuvre familiale, il n'y a aucune autre combinaison possible pour à la fois répondre aux besoins de l'exploitation et maximiser son solde. La variation du solde est donc directement liée aux coûts de la main d'œuvre extérieure. En effet, de 5 767 à 6 200 heures de main d'œuvre familiale disponible, le remplacement d'une heure de travail familial coûte 0,24 kAr, ce qui correspond à 1,2 kAr par jourⁱ. Cette rémunération est celle d'un ouvrier agricole en contre-saison, période à laquelle la main d'œuvre est la moins onéreuse. La logique du modèle est donc de remplacer en priorité la main d'œuvre familiale aux quinzaines où la main d'œuvre extérieure est la moins chère. Cette tendance change une première fois en dessous du seuil des 5 767 heures de travail familial disponible car cela représente le nombre d'heures nécessaires pour couvrir tous les travaux en saison par la famille. En dessous de ce seuil, la main d'œuvre extérieure coûte plus chère : le remplacement d'une heure de travail familial coûte alors 0,30 kAr, soit 1,5 kAr par jour, coût de la main d'œuvre extérieure en quinzaine creuse de saison (quinzaine 1, 6, 7, 8, 9, 10, 11). La tendance change une seconde fois sous le seuil de 3 480 heures de disponibilité en main d'œuvre familiale. Cette valeur correspond aux nombre d'heures de travail familial nécessaire pour couvrir le travail des quinzaines où la main d'œuvre est la plus onéreuse : le remplacement d'une heure de travail familial coûte alors 0,40 kAr, soit 2 kAr par jour.

3.2 La conversion aux techniques SCV, une nécessité ?

Comme présenté précédemment, le solde d'exploitation maximal est de 10 288 kAr pour 6 548 heures de travail familial. Ce résultat est obtenu pour une combinaison de successions culturales intégrant 30% de surface en SCV de la deuxième à la dernière année. On retrouve les deux types de successions (Tableau 7) : les n°1 et n°2 sont les cultures de rente tandis que les n°4 et n°5 sont les cultures vivrières. Nous proposons donc de faire varier le pourcentage de surface en SCV autour de ce résultat : la variation s'étale de 0% à 64% ; pour des raisons techniques, au-delà de 64%, les calculs n'aboutissent plus.

Pour les différents niveaux d'intégration des techniques SCV modélisés (0%, 12%, 30%, 46% et 64%), la surface en SCV ne varie jamais au cours des 6 années. En effet, une à deux parcelles sont consacrées aux cultures SCV dès la deuxième année pour répondre à la contrainte du modèle. Le reste des surfaces est alors consacré à la production de haricot ou de manioc. Seulement, les CPA SCV permettant de produire du haricot (Tableau 7) ne sont pas adaptés à des petites surfaces agricoles. En effet, ce sont des CPA sur 2 à 3 ans où le haricot n'est produit que sur une seule année.

ⁱ Un ouvrier agricole travail 5 heures par jour.

Seules les cultures conventionnelles permettent alors de produire suffisamment de grain chaque année pour couvrir les besoins de la famille.

Modifications de la charge de travail

Les cultures les plus rémunératrices sont la combinaison de maïs et riz en SCV d'une part et la combinaison de riz et manioc conventionnel d'autre part. Même si, pour la même production, les systèmes SCV sont moins chronophages que les cultures conventionnelles (75 H.j/ha/an pour un système maïs+dolique ; 100 H.j/ha/an pour une culture de maïs conventionnel – Olympé 2007), les deux combinaisons dégagant le plus de revenu sont équivalentes (200 H.j/ha/2 ans) car la culture de manioc conventionnelle ne nécessite pas beaucoup de travail.

Plus on augmente les surfaces en SCV, moins la part attribuée à la succession culturale conventionnelle n°2 est importante. La stratégie du modèle est alors de multiplier le nombre de successions culturales en conventionnel (avec des surfaces de plus en plus réduites) afin de pouvoir y insérer la culture de riz conventionnelle qui disparaît dans la succession culturale n°2 tout en garantissant la production de manioc et haricot : on passe de 4 parcelles en conventionnel d'une moyenne de 11 ares pour 12% de surface en SCV à 7 parcelles d'une moyenne de 3,8 ares pour 46% de SCV. Au-delà d'un certain ratio de SCV, il devient plus rentable de maximiser le solde en se concentrant sur des successions en SCV qu'en incluant du riz conventionnel dans les enchaînements (phénomène observable pour 64%). Au fur et à mesure que les surfaces en SCV augmentent, la combinaison des cultures conventionnelles, des cultures SCV et des cultures sur *baiboho* et RMME concentre et augmente le travail en quinzaines 3, 4, 5, 7 et 11. Pour ces 5 quinzaines, la main d'œuvre familiale est saturée (plus de 174 heures de travail par quinzaine). Il faut employer de la main d'œuvre extérieure, ce qui représente un coût supplémentaire. Une augmentation de 10% des surfaces en SCV nécessite 47 heures de travail extérieur supplémentaire. En revanche, le nombre de périodes de travail non saturées diminue, ce qui a pour effet de diminuer les besoins en main d'œuvre familiale : 10% d'augmentation de surfaces en SCV permet de libérer 29,5 heures de travail familial.

Tableau 7: Choix des successions culturales de 0 à 64% de surface de SCV sur 6 ans

		S=saison ; CS=contre-saison											
	surface (en ares)	S1	CS1	S2	CS2	S3	CS3	S4	CS4	S5	CS5	S6	CS6
0% de surface en SCV													
2	23	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
5	9	haricot conv.	jachère	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	jachère
7	9	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
11	9	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
12% de surface en SCV													
1	6	maïs+dolique sur labour	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz
2	17	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
3	9	riz conv.	paille de riz	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	jachère
7	9	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
10	9	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.

30% de surface en SCV													
1	15	maïs+dolique sur labour	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz
2	17	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
4	9	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
5	9	haricot conv.	jachère	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	jachère
46% de surface en SCV													
1	22	maïs+dolique sur labour	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz
2	2	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
3	8	riz conv.	paille de riz	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	jachère
4	8	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
7	1	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
9	6	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
10	1	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
15	1	haricot conv.	manioc+stylosan	manioc+stylosan	manioc+stylosan	riz SCV	paille de riz	haricot+stylosanth	stylosanth	stylosanth	stylosanth	maïs+dolique SCV	résidus dolique
18	1	haricot conv.	jachère	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	jachère
64% de surface en SCV													
1	22	maïs+dolique sur labour	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz
3	9	riz conv.	paille de riz	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	jachère
6	10	maïs+dolique sur labour	résidus dolique	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique
8	9	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.

Source : traitement Excel des sorties du modèle GANESH

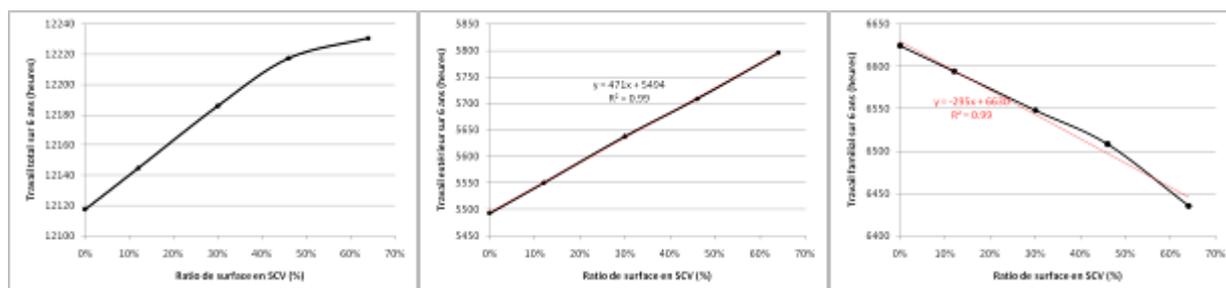


Figure 6: Evolution de la charge de travail (totale, extérieur et familiale) en fonction du pourcentage surfacique de SCV sur tanety

Source : traitement Excel des sorties du modèle GANESH

Evolution du solde d'exploitation

Jusqu'à 30% de surfaces en SCV, l'augmentation de la production compense les pertes du à l'embauche de main d'œuvre extérieure et permet une augmentation du solde d'exploitation (Figure 7). Au-delà des 30%, l'augmentation de la production ne suffit plus. Les CPA tels que présents dans la succession n°15, ne sont pas valorisables à la vente et le solde d'exploitation diminue.

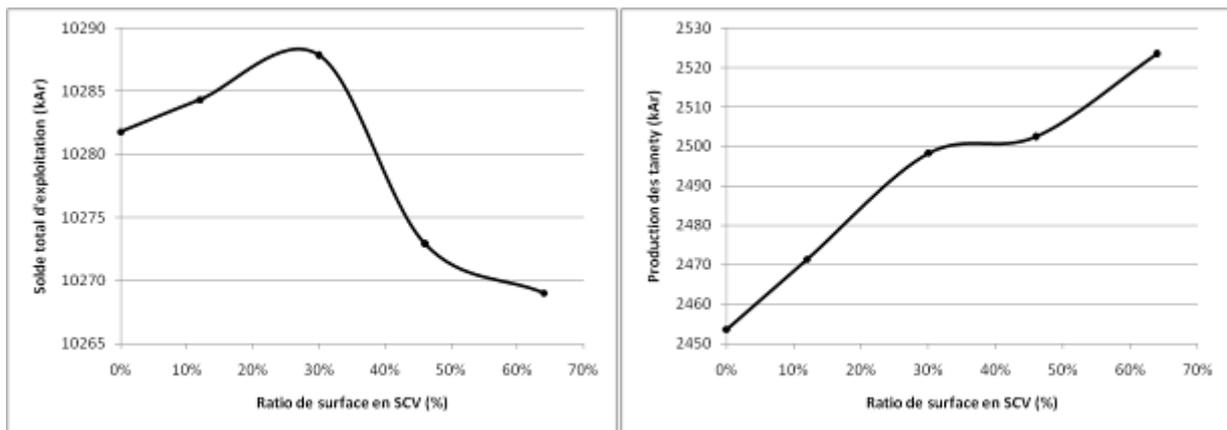


Figure 7: Evolution du solde d'exploitation et de la production sur *tanety* en fonction des surfaces en SCV sur 6 ans

Source : traitement Excel des sorties du modèle GANESH

Dans notre cas, l'effet positif de l'intégration de SCV dans les successions culturales est la diminution du travail familial. Seulement, cela représente moins de 30 heures sur 6 ans pour une augmentation de 10% des surfaces en SCV. L'intérêt de diminuer la charge de travail familial est de permettre d'exercer une activité off-farm apportant un revenu supplémentaire à l'exploitation, ce qui ne semble pas réalisable avec 5 heures libérées par an. En revanche, le travail est concentré sur quelques périodes. Ainsi, de nombreuses journées sont libérées et des activités ponctuelles peuvent être exercées (ouvrier agricole, taxi-bicyclette...).

La concentration du travail pose cependant un problème. En effet, notre modèle considère un bilan annuel où, à la fin de chaque campagne, les charges opérationnelles et les dépenses familiales sont soustraites aux produits d'exploitation. Or, dans le fonctionnement réel d'une exploitation, la main d'œuvre temporaire et les dépenses familiales sont réglées à la journée. Une telle concentration du travail sur peut alors engendrer d'importants problèmes de trésorerie et remettre en question la faisabilité des CPA proposés.

Enfin, la dilatation d'échelle (Figure 7) dessine de fortes variations de solde. Or, l'écart entre le solde maximal et minimal n'est que de 18 kAr, ce qui équivaut à 3 kAr par an. L'analyse de l'évolution du solde décrite plus haut est donc à relativiser. Malgré les fluctuations, le solde reste stable. Pour le type d'exploitation modélisé, l'intégration de SCV dans le but d'améliorer le solde n'est pas une nécessité.

3.3 Le rôle tampon des systèmes de cultures SCV

Sur 6 ans, s'il n'y a pas d'aléa climatique, la combinaison de successions culturales déjà décrite pour les 2 premiers tests permet de dégager le solde maximal (10 288 kAr). On retrouve les deux successions culturales qui permettent de couvrir les besoins de la famille (successions n°1 et n°2) et les deux successions maximisant le solde (n°4 et n°8), comme indiqué dans le Tableau 8.

Tableau 8: Combinaisons culturales les moins sensibles aux aléas climatiques de plusieurs intensités

Les zones en pointillés représentent les années touchées par les aléas climatiques on ; CS=contre-saison													
	surface (en ares)	S1	CS1	S2	CS2	S3	CS3	S4	CS4	S5	CS5	S6	CS6
pas d'aléa													
1	15	maïs+dolique sur	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz
2	17	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
4	9	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
8	9	haricot conv.	jachère	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	jachère
aléas 1 année sur 3													
1	22	maïs+dolique sur	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz
9	9	riz conv.	paille de riz	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	jachère
5	9	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	maïs conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
6	8	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
3	1	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc+stylosant	manioc+stylosant	manioc+stylosant
7	1	haricot conv.	jachère	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	jachère
aléas 1 année sur 2 sur riz													
1	22	maïs+dolique sur	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz
10	9	maïs conv.	jachère	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	jachère
11	8	maïs+dolique sur	résidus dolique	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	riz SCV	paille de riz
6	7	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
12	1	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	maïs conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
13	1	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	maïs conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
14	1	maïs conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.

Source : traitement Excel des sorties du modèle GANESH

Agriculture et facteur chance

Lors de la première simulation des aléas climatiques les plus intenses, les années 2, 4 et 6 sont arbitrairement choisies comme années où les aléas climatiques engendrent des pertes de rendement en riz conventionnel de 30%. L'exploitation qui dégage alors le plus de revenus (8 056 kAr) est composée des mêmes successions culturales que l'exploitation standard qui ne subit aucune contrainte. En effet, on constate qu'en année 2, 4 et 6, il n'y a pas de culture de riz conventionnel sur *tanety*. Ainsi, l'exploitation subit des pertes de rendement sur les rizières de *baiboho* et RMME mais les *tanety* restent intactes (les dégâts causés sont d'une valeur de 744 kAr par année touchée). Si l'exploitation avait subit un aléa en année 1, 3 ou 5, elle aurait subit des pertes d'une valeur respective de 810 kAr, 787 kAr et 787 kAr.

On peut donc parler de « facteur chance », car une exploitation qui ne cultive pas de riz conventionnel sur *tanety* tous les ans, peut dégager de bons revenus si les aléas climatiques se font sentir les « bonnes » années. Pour la suite, nous décidons donc de créer des situations de « malchance », c'est-à-dire que les aléas climatiques sont subit au moins sur une année où du riz conventionnel de *tanety* aurait été cultivé (année 1, 3 ou 5) s'il n'y avait pas d'aléa climatique.

Configuration de l'exploitation la moins sensible aux aléas d'intensité moyenne

Lorsque des aléas climatiques sont subits une année sur trois, l'exploitation agricole la moins sensible arrive à dégager un solde de 8 771 kAr sur 6 ans. La première constatation est que l'exploitation agricole possède plus de surfaces en SCV que l'exploitation décrite ci-avant (44% des surfaces en SCV contre 30% pour l'exploitation précédente). En effet, la succession culturale en conventionnel n°2 est diminuée de surface et cette surface est retrouvée dans succession n°1 en SCV car le riz conventionnel est sensible aux aléas. On retrouve la même logique : plus une exploitation

possède de surface SCV, plus les surfaces restantes en conventionnel sont découpés pour y intégrer du riz conventionnel plus lucratif, tout en assurant la production des produits autoconsommés (Tableau 8). On remarque aussi que la culture de maïs conventionnel dégage plus de revenu que la culture de riz conventionnel ayant subi 30% de pertes de rendement car avec cette première culture en troisième année, l'exploitation est moins sensible aux aléas. Dans un climat extrêmement aléatoire, l'exploitation aurait donc tout intérêt à remplacer ses cultures de riz conventionnel par du maïs conventionnel.

Configuration de l'exploitation la moins sensible aux aléas de forte intensité

Lorsque des aléas climatiques sont subits une année sur deux, l'exploitation agricole la moins sensible arrive à dégager un solde de 8 229 kAr sur 6 ans. Cette exploitation possède plus de surfaces en SCV que les exploitations décrites au-dessus (60%). Au-delà d'une certaine surface en SCV, il est plus rentable d'utiliser les successions culturales n°1 et n°11 (Tableau 8), qui sont des successions culturales SCV. De plus, les quelques parcelles qui peuvent encore être cultivées pour maximiser le revenu sont cultivées en maïs conventionnel.

On peut donc conclure que, plus une exploitation agricole se trouve dans une région à forts aléas climatiques, plus l'agriculteur aura intérêts à favoriser les successions culturales SCV n°1 et n°11 et à cultiver du maïs conventionnel pour maximiser son solde. Il faut rappeler que cela n'est vrai que dans notre modèle. En effet, sur le terrain, ce sont toutes les cultures conventionnelles qui subissent une perte de rendement lors d'aléas climatiques. La véritable information que l'on en tire est que plus une exploitation intègre des systèmes SCV, moins elle est sensible aux aléas climatiques. Seulement, une exploitation exclusivement en SCV ne peut couvrir l'autoconsommation familiale. Il faut donc trouver le compromis entre maximisation du solde, sensibilité aux aléas climatiques et production des aliments autoconsommés.

Nous n'avons pas abordé l'évolution de la charge de travail car les variations sont identiques à celles décrite pour les différents scénarios d'intégration des SCV, avec un travail total autour de 12 100 heures et un travail familial autour de 6 500 heures.

3.4 Intégration de l'élevage dans le modèle

En entrant les nouveaux paramètres dans le modèle, on obtient un solde d'exploitation de 12 310 kAr. On peut comparer quelques données avec l'exploitation standard (Tableau 9) :

Tableau 9: Comparaison des résultats technico-économiques entre l'exploitation laitière et l'exploitation standard

Sur 6 ans	Exploitation laitière (a)	Exploitation standard (b)	Différence (a)-(b)
Solde final (en kAr)	12 310	10 288	2 022
Marge brute <i>tanety</i> (hors main d'œuvre extérieure, en kAr)	1 236	2 498	-1 262
Marge brute élevage (en kAr)	3 830	758	3 072
Main d'œuvre extérieure (en kAr)	1 236	1 902	-666
Main d'œuvre familiale (en heures)	6 131	6 548	-417
Main d'œuvre totale (en heures)	11 034	12 186	-1 152

Source : traitement Excel des sorties du modèle GANESH

Tableau 10: Comparaison des choix de successions culturales entre une exploitation standard et une exploitation laitière

<i>S=saison ; CS=contre-saison</i>													
	surface (en ares)	S1	CS1	S2	CS2	S3	CS3	S4	CS4	S5	CS5	S6	CS6
exploitation standard													
1	15	maïs+dolique sur labour	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz
2	17	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
3	9	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
4	9	haricot conv.	jachère	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	jachère
exploitation possédant 1 vache laitière													
1	7	maïs+dolique sur labour	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidus dolique	riz SCV	paille de riz
2	2	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
3	9	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.
4	9	haricot conv.	jachère	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	jachère
5	23	brachiaria	brachiaria	brachiaria	brachiaria	brachiaria	brachiaria	brachiaria	brachiaria	brachiaria	brachiaria	brachiaria	brachiaria

Source : traitement Excel des sorties du modèle GANESH

Dans les deux exploitations, on retrouve les deux types de successions culturales (Tableau 10) : les successions n°1 et n°2 permettent de maximiser le revenu ; les successions n°3 et n°4 permettent de couvrir les besoins familiaux. 18 ares étant nécessaires pour couvrir l'autoconsommation, les 23 ares de culture de brachiaria sont implantés au détriment des cultures à but lucratif. N'étant pas directement valorisable à la vente, elle diminue la marge brute dégagée par les *tanety* de 1 262 kAr. Cette perte est compensée par deux phénomènes :

- ✓ La réduction du temps de travail : le brachiaria ne demande de travail que pour sa mise en place (15 H.j pour le semis). Dans notre modèle nous considérons que les temps de travaux de coupe sont négligeables car l'agriculteur effectue des coupes rapprochées dans le temps pour alimenter la vache laitière. Ainsi, sur toute la durée du modèle, 1 152 heures sont libérées. Cela permet d'économiser 666 kAr par rapport à une exploitation standard.
- ✓ La production de lait : la valorisation du brachiaria est indirecte. Il permet une production de lait journalière qui dégage 3 072 kAr supplémentaires.

La perte due à la réduction des surfaces de cultures de rente est largement compensée par les gains liés à la production laitière. En effet, l'exploitation laitière présente un solde supérieur de 2 022 kAr. On en déduit que, même à petite échelle, la diversification des ateliers de productions, en l'occurrence la production laitière, peut permettre d'augmenter le revenu des agriculteurs.

4 Limites et perspectives

Les différents scénarios testés dans cette étude ne sont qu'un échantillon des multiples possibilités de modélisation que l'on peut effectuer avec le modèle GANESH. En effet, tous les tests sont effectués sur la même structure d'exploitation (composition familiale et surfaces cultivables), tous les scénarios ne sont pas modélisés et certains paramètres ne sont pas traités. Les résultats des quatre tests permettent cependant de tirer des conclusions liées aux tendances observées et ouvrent les perspectives d'utilisation future du logiciel. Ils permettent également de mettre en évidence les imperfections et les améliorations à apporter. Nous allons donc, dans cette partie, développer ces différents aspects.

4.1 Amélioration du modèle

4.1.1 Limites techniques

Dans cette étude, on trouve à plusieurs reprises des choix arbitraires qui sont pris à cause de problèmes techniques, le principal problème technique étant le temps de résolution des calculs. En

effet, le logiciel GAMS doit analyser 141 360 successions culturelles répétées autant de fois qu'il y a de caractéristiques (intrants, rendements et temps de travaux) dans le tableur Excel. Or, plus il ya de contraintes, plus il ya d'équations et d'inéquations à résoudre, ce qui multiplie le nombre de variables et donc le temps de calcul (lors des tests de certains scénarios, l'exécution du programme a parfois du être interrompue après plusieurs heures sans aboutir aux résultats). Cela induit une limite du nombre de contraintes que l'on peut appliquer simultanément au modèle. Ainsi, même si de nombreux tests et scénarios peuvent être explorés, il y en a certains qui sont trop contraignants et donc insolubles sous GAMS. Si elle existe, la solution à ce problème réside sans doute dans la syntaxe. Dans ce cas, un programmeur averti pourrait peut-être modifier les options de résolution, ou restructurer les équations de manière à accélérer les temps de calcul.

Ce problème technique est à l'origine du choix de la nature de la variable « Main d'œuvre extérieure ». En effet, dans notre modèle la variable est continue car il existe déjà une variable discrète entière, « Surface de succession », alors que les ouvriers agricoles sont rémunérés à la journée de travail. Seulement, avec deux variables discrètes, les calculs n'aboutissent pas. Or, les agriculteurs ne cultivent pas des parcelles à l'échelle du mètre carré, il a donc été choisi de passer la main d'œuvre extérieure en variable continue.

En espérant que l'on puisse outrepasser ce problème technique, on peut envisager des modifications et améliorations du modèle.

4.1.2 Optimisation des assolements sur *baiboho* et RMME

Dans l'état actuel du modèle, seuls les assolements sur *tanety* sont optimisés par le modèle. En effet, les cultures de saisons sur *baiboho* et RMME sont fixées ainsi que les cultures de contre-saisons. A la différence des cultures de saisons, l'utilisateur peut choisir d'appliquer des cultures de contre-saison sur une à plusieurs années mais les systèmes de cultures utilisés sont toujours les mêmes. Pourtant il existe une multitude de systèmes SCV appliqués et destinés à ces types de sols. Il serait donc intéressant d'évaluer et de modéliser, de la même manière que pour les *tanety*, l'intégration des ces systèmes dans les exploitations agricoles. Le raisonnement à appliquer est exactement le même. Il faut donc compléter les paramètres en ajoutant les CPA destinés à ces types de sols avec leurs caractéristiques (intrants, rendements et temps de travaux), créer les successions culturelles selon des règles à définir et ajouter les contraintes supplémentaires qui entrent en jeu. A terme, le modèle GANESH devrait contenir toutes ces informations afin d'être le plus représentatif de la réalité mais surtout afin d'optimiser la plus grande partie du système d'exploitation. Dans cette optique, il peut être envisagé de passer les données d'élevage de simples paramètres à des variables optimisables.

4.1.3 Vers un modèle évolutif

Dans les quatre tests modélisés, on remarque que l'analyse des résultats est généralement faite sur les sorties globales, bilan des 6 années du modèle. En effet, l'analyse de l'évolution d'année en année est éludée. Cette omission est consciente car il existe une régularité : si l'on reprend les successions culturelles choisies dans chaque test, on constate qu'il y a toujours 2 à 4 CPA qui reviennent sur une base de deux. Il n'y a donc pas de véritable évolution interannuelle des données technico-économiques. L'analyse d'une année ou du bilan global donne des résultats assez similaires. Les principaux intérêts d'avoir un modèle sur 6 ans sont de permettre une multitude de combinaisons de successions culturelles et de CPA mais aussi d'avoir une vue d'ensemble pour comprendre plus aisément les schémas et stratégies mis en jeu tels que les répétitions sur deux ans. Seulement, une analyse trop globale peut déformer une certaine réalité.

Comme on a pu le voir dans la construction du modèle et dans l'analyse des résultats, le modèle GANESH effectue en chaque fin d'année un bilan : les quantités produites sont recensées, les marges brutes annuelles de chaque activité sont sommées et les charges opérationnelles et les dépenses familiales sont soustraites pour obtenir un solde d'exploitation annuel dont la somme sur 6

ans doit être maximisée. Ce type de calcul est valide si l'on travaille sous l'hypothèse qu'au départ du modèle, l'agriculteur dispose d'une trésorerie suffisante pour couvrir toutes les charges jusqu'à la première récolte, qui réalimente alors la trésorerie qui doit couvrir les frais jusqu'à la récolte suivante, ainsi de suite jusqu'à la fin du modèle. Cela peut être admis pour certains scénarios mais on ne peut, dans certains cas, assurer la validité du raisonnement. Par exemple, dans le deuxième scénario, la forte concentration du travail sur 5 quinzaines de l'année représente une somme de 130 kAr par une quinzaine (pour comparaison, le seuil de survie de la famille est de 310 kAr par an). Il est fort probable que, dans ce cas, la trésorerie soit déficitaire. Le choix des successions culturales est donc remis en cause. Il faudrait donc transformer le modèle pour que l'évolution des données économiques de l'exploitation soit suivie à une échelle de temps plus courte.

4.1.3.1 D'un bilan annuel à un bilan bimensuel

Pour pallier au problème explicité ci-avant, il faudrait modifier la logique de calcul utilisée dans le modèle. Nous présentons ici les modifications qui devraient être apportées.

De manière à ce que le modèle soit le plus représentatif de la réalité, il faut considérer le pas de temps le plus petit utilisé sous GANESH : la quinzaine (le coût de la main d'œuvre extérieure varie selon la quinzaine et les temps de travaux culturaux sont définis à la quinzaine). C'est à cette fréquence que le bilan précédemment effectué par année doit se faire. Quelques paramètres doivent alors être redécrits dans cette échelle de temps (le seuil de survie annuel devient un seuil de survie bimensuel, le coût saisonnier des intrants devient un coût bimensuel...). Une fois tous les paramètres redéfinis, le modèle peut choisir parmi les successions culturales la combinaison qui répond aux différentes contraintes bimensuelles. Au départ, il existe une trésorerie et un garde-manger auxquels l'utilisateur attribue respectivement un montant et des quantités de produits destinés à l'autoconsommation. Ensuite, à chaque période, en fonction des activités culturales de l'exploitation, la trésorerie est recalculée (déduction des charges et ajout des produits de ventes) et le garde-manger mis à jour (déductions des aliments consommés, ajout des productions non-vendues). Le modèle ne pouvant optimiser des variables qui évoluent, l'optimisation se fait encore sur le solde final d'exploitation. Le résultat obtenu reste valide pour tout type de scénarios car les contraintes sont évaluées par quinzaine et les successions culturales retenues ne sont pas hypothétiquement applicables mais de fait viables tout au long des 6 années.

4.1.3.2 Des caractéristiques de culture variables

Les successions culturales générées sous VBA Excel sont construites selon des règles d'enchaînement qui mettent bout à bout des CPA sur une période de 6 ans. Lors de cette mise en chaîne, chaque CPA est accompagné de ses caractéristiques (intrants, temps de travaux et rendements). Ces caractéristiques sont fixes et donc totalement indépendantes des modalités de mise en place. Or, il a été étudié que les rendements de systèmes de cultures SCV répétés sur une même parcelle plusieurs années successives dépendent de l'année (Domas *et al.*, 2008). L'étude démontre que les rendements sont stables sur les trois premiers cycles culturaux puis le rendement augmente à partir de la quatrième année. De plus, on sait intuitivement et par observation sur le terrain qu'en fonction du précédent cultural, les caractéristiques de la culture suivante peuvent être modifiées (une culture fixatrice d'azote peut permettre de réduire l'apport d'intrant à la culture suivante, une forte production de biomasse aérienne par le précédent cultural peut étouffer les adventices et diminuer les temps de travaux de sarclage pour la culture suivante...). Cette dernière hypothèse reste à mesurer sur le terrain, mais pour être plus représentatif de la réalité, il faudrait intégrer ces variations dans les successions culturales, en modulant les caractéristiques de chaque CPA en fonction de son contexte d'implantation.

4.2 GANESH, un outil d'aide à la décision ?

Choisir de cultiver ou de ne pas cultiver en contre-saison, exercer une activité off-farm, augmenter ou réduire le cheptel, agrandir ou abandonner des surfaces cultivables sont autant de

scénarios qui peuvent être modélisés sous GANESH avec sa structure actuelle. Il semble que ces préoccupations soient avant tout celles des conseillers agricoles et des agriculteurs eux-mêmes qui cherchent à répondre à plusieurs objectifs simultanément. La question se pose : Pourquoi le modèle GANESH est-il un outil de recherche ? Est-il envisageable d'en faire un outil d'aide à la décision ?

Le modèle est créé pour la recherche. Dans sa forme actuelle, les résultats ne sont pas exploitables pour une application sur le terrain. En effet, le degré de précision de la structure et des paramètres utilisés est trop faible pour en avoir un usage pratique. Cela ne signifie pas pour autant que les résultats sont faux et inutilisables. D'une part, la validation du modèle montre que la structure modélisée respecte la logique de terrain et la formalisation des contraintes et objectifs est cohérente. D'autre part, cela permet d'évaluer des tendances générales et des effets globaux de l'intégration des SCV dans les systèmes d'exploitation avec un niveau d'analyse ne nécessitant pas une extrême précision. De plus, cet outil a été créé sans concerter les conseillers et agriculteurs. Or, il semble que ce soit plus socialement acceptable pour tous les acteurs de travailler avec un outil lorsque ils en connaissent le fonctionnement interne et qu'ils ont pris part à la conception. De plus, il paraît légitime que chaque acteur donne son avis et fasse part de ses connaissances pour qu'il y ait une adhésion de tous aux choix méthodologiques et à la structure du modèle réalisé. Enfin, plus pratiquement, le modèle n'est pas facilement utilisable. Les outils utilisés (GAMS et Excel) ne sont pas ergonomiques et peuvent alors être difficiles à prendre en main pour une personne non initiée. Même si l'outil Excel est plus modulable que GAMS et qu'il peut être configuré de manière simple, l'utilisation du modèle nécessiterait une formation des personnes souhaitant l'utiliser.

Si l'on prend en compte les améliorations proposées, GANESH peut, à terme, être utilisé comme outil d'aide à la décision. Ses utilisations peuvent être multiples. Par exemple, le taux d'abandon des SCV par les agriculteurs encadrés par le projet BV/Lac a été de 26,4% en 2007-2008 (Domas *et al.*, 2008). Les principales raisons citées sont (i) des raisons d'adaptation aux techniques (36% des abandons) comme le non respect de l'itinéraire (24%) ou le chevauchement des temps de travaux (12%) ; (ii) des raisons économiques (32% des abandons) comme l'insuffisance de trésorerie (30%) ainsi que le remboursement des crédits de campagne au cours de la contre-saison (environ 2%) et (iii) des raisons foncières dans environ 13% des cas. La plupart de ces problèmes peuvent être prévus voire évités grâce à la modélisation et à l'optimisation du système de production, spécifique à chaque agriculteur. Dans le contexte actuel de prise de conscience globale des enjeux environnementaux liés à l'émission des gaz à effet de serre, les pratiques culturales permettant la fixation de carbone dans le sol et la biomasse, telles que les systèmes SCV, sont sources potentielles de subvention. Le modèle GANESH apparaît alors comme un outil adapté à l'appui de ses démarches agro-écologiques.

Conclusion

Rappelons tout d'abord l'objectif de cette étude, pour évaluer à quel point nous avons pu y répondre : Dans le cadre du projet ANR « pépites » et étant donné le contexte agricole de la région du lac Alaotra, l'objectif est de comprendre dans quelles mesures les systèmes innovants SCV peuvent être intégrés dans les exploitations agricoles ; c'est-à-dire évaluer dans quelles mesures ces systèmes répondent aux objectifs des agriculteurs du lac et comprendre les modifications qu'ils apportent (revenus dégagés, temps de travaux familiaux, types de productions...). Grâce aux différents tests que nous avons modélisés, nous avons pu dégager des éléments de réponses à ces interrogations. Nous préférons utiliser le terme « éléments de réponses » pour deux raisons intimement liées : Premièrement, la nature actuelle du modèle nous a permis de mettre en évidence des tendances qui méritent d'être approfondies, notamment en affinant le modèle. Deuxièmement, les effets n'ont été testés que sur un type d'exploitation (l'exploitation standard). Les résultats seraient peut-être modifiés pour une exploitation de structure différente. La modélisation d'autres types d'exploitations agricoles permettrait de confirmer ou de réfuter les tendances observées. Ainsi, nous ne pouvons généraliser les résultats obtenus. Ils sont à considérer comme des pistes de réflexion à creuser.

Nous avons pu constater que les rendements des systèmes SCV ne sont pas forcément supérieurs aux rendements des systèmes conventionnels car, lorsqu'il ya une forte disponibilité en main d'œuvre familiale, une combinaison de systèmes conventionnels et SCV permet de dégager un revenu maximum. En revanche, lorsque la main d'œuvre familiale est un facteur limitant, les systèmes de cultures SCV expriment tout leur potentiel : étant sans labour, ces systèmes requièrent moins de travail. L'heure travaillée est donc mieux valorisée qu'en conventionnel. Ainsi, lorsque le travail représente un coût, les systèmes SCV deviennent plus intéressants que les systèmes conventionnels.

Dans l'absolu, les systèmes SCV diminuent la charge de travail et on a pu voir que dans certaines situations, cette charge de travail pouvait être concentrée sur quelques périodes de l'année. Cela représente un avantage car de nombreuses journées peuvent être libérées et consacrées à des activités off-farm, génératrices de revenus supplémentaires. Mais ce déplacement du travail peut devenir un inconvénient majeur car, en fonction des autres systèmes de cultures présents sur l'exploitation, ces quelques périodes de concentration du travail peuvent causer de graves problèmes de trésorerie en augmentant les besoins en main d'œuvre extérieure. En effet, même si la charge de travail totale est diminuée, la part de main d'œuvre extérieure peut augmenter et donc augmenter les coûts de production. De plus, si les systèmes SCV mis en place sur une exploitation ne répondent pas à certains des objectifs de production, l'agriculteur peut être mené à planter d'autres systèmes de cultures plus chronophages. Les systèmes SCV auront donc indirectement augmenté la charge de travail total. En termes de gestion des temps de travaux, on comprend que l'implantation de systèmes SCV n'est pas la solution systématique. Il faut analyser le contexte dans lequel ils sont mis en place pour évaluer dans quelles mesures ils apportent des avantages.

Il semble que les systèmes fourragers innovants soient adaptés aux exploitations souhaitant intégrer de l'élevage dans leurs activités de production. La valorisation indirecte des fourrages par la production de lait semble compenser les pertes de surfaces destinées aux cultures de rente et augmenter le revenu de l'agriculteur. Ce résultat reste à confirmer car, dans son état actuel, le modèle n'est pas construit dans une optique d'analyse des ateliers d'élevage. Cependant, le résultat que l'on peut retenir est d'ordre méthodologique : le modèle GANESH est un outil puissant, qui peut s'adapter et optimiser de nombreuses situations dès lors que les modifications nécessaires lui sont apportées.

Nous émettons un maximum de réserve quant au résultat obtenu sur l'analyse de la sensibilité aux aléas climatiques. En effet, les sorties du modèle confirment l'hypothèse avancée par

Domas *et al.* (2008) : Une exploitation agricole est moins sensible aux aléas climatiques lors qu'elle cultive des cultures en SCV, qui font effet tampon. Mais cet avantage des systèmes SCV, qualifié d' « Hypothèse forte » car souvent constaté dans la région du lac Alaotra, a été mesuré (Naudin *et al.*, 2010) sur des cultures différentes (coton) des cultures prises en compte dans notre modèle et dans une zone géographique (Nord-Cameroun) très éloignée de notre zone d'étude.

Outre les résultats d'analyse, on peut tirer des enseignements de la nature et du déroulement des travaux. La modélisation et l'optimisation sont des outils qui ont été initialement créés pour l'industrie afin d'augmenter la productivité. A partir des années 50, l'INRA a commencé à concevoir les premiers modèles en agriculture et aujourd'hui, la modélisation est un outil répandu en agronomie. Seulement, lorsque l'on compare le contexte français et malgache, il est difficile d'imaginer une utilité de la modélisation à Madagascar, où cet outil semble loin des préoccupations premières des agriculteurs. D'un côté, même si les préoccupations environnementales ramènent la tendance à la baisse, on se fait une image des exploitations agricoles françaises comme des exploitations mécanisées, qui ont accès aux produits phytosanitaires et qui sont conduites dans une démarche productiviste poussant certaines exploitations à devenir de véritables entreprises, allant de la dizaine à la centaine d'hectares. D'un autre côté, on visualise les exploitations malgaches comme des exploitations familiales, produisant principalement pour l'autoconsommation sur des petites surfaces avec des techniques traditionnelles très peu mécanisées et un facteur social fort qui génère une grande irrégularité dans la gestion de l'exploitation. Dans le premier cas, on comprend aisément que les outils de modélisation soient adaptés à l'accompagnement de la production ; dans le second cas il semble qu'il y ait un gouffre entre la réalité du terrain et le développement d'outils conceptuels. Cette étude permet de rendre compte de l'adaptabilité de la modélisation à différents cas. En effet, même si l'outil n'est pas créé pour les agriculteurs, il ne semble pas déconnecté de la réalité du terrain. En analysant en amont les avantages et limites de techniques innovantes dans un contexte donné (ici, l'agriculture au lac Alaotra), il permet de mettre en évidence les points forts et les blocages. Ces connaissances peuvent alors être communiquées aux acteurs sur le terrain pour modifier et faciliter la diffusion des techniques, en satisfaisant les véritables objectifs des agriculteurs. Le seul regret quant à la méthodologie employée dans cette étude est que les facteurs sociaux, certes difficiles à modéliser car extrêmement aléatoires, ne sont pas pris en compte dans le modèle. A terme, il semble important de pouvoir les formaliser pour mieux comprendre le niveau d'acceptabilité de ces techniques innovantes et pour renforcer la validité du modèle.

Bibliographie

- ANDRIAMALALA, H., DOMAS, R., PENOT, E. (2009), *Les itinéraires techniques standards en systèmes SCV pour les zones Nord-est et Vallées du Sud Est (BRL)*, document de travail BV/Lac n°35, MAEP, 71 p.
- ANDRIAMANALINA, B. (2006), *Le riz à Madagascar*, fiche de synthèse, Mission économique, Tananarive, 3 p.
- BACHINGER, J., ZANDER, P. (2007), *ROTOR, a tool for generating and evaluating crop rotations for organic farming systems*, ScienceDirect, Agronomy 26 (2007) 130-143, 14 p.
- BAD / CIMA (2003), *Madagascar, revue du secteur agricole*, s.l., 56 p.
- BAIJUKYA, F., P. (2004), *Adapting to change in banana-based farming systems of northwest Tanzania : The potential role of herbaceous legumes*, PhD thesis Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 192 p.
- BEDOIN, F. (2006), *Etude des systèmes agraires de la petite région de Marololo*, Rapport de stage de 3^{ème} année INA-PG, CIRAD, 101 p.
- BOIFFIN, J., HUBERT, B., DURAND, N. (2004), *Agriculture et développement durable : enjeux et questions de recherche*, document interne INRA, 91 p.
- CASTELLAZZI, M., S., WOOD, G., A., BURGESS, P., J., MORRIS, J., CONRAD, K., F., PERRY, J., N. (2007), *A systemic representation of crop rotations*, ScienceDirect, Agricultural Systems, 97 (2008) 26-33, 8 p.
- CIRAD (2008), *ANR2008, Document B / français*, dossier de réponse à l'appel d'offre « pépites » de l'ANR, 73 p.
- COLLETTA, M., ROJOT, C. (2006), *Caractéristiques agraires de deux zones du Lac Alaotra, conditions et impact de l'adoption des systèmes de culture à base de couverture végétale*, rapport de stage 2^{ème} année INA-PG, CIRAD, 114 p.
- CORDELLIER, S., DIDOT, B. (2005), *L'État du monde en 2006: annuaire économique et géographique mondial - 26^{ème} éd.*, Paris, Éditions La Découverte, 191-197 p.
- DEVÈZE, JC. (2006), *Réflexions sur l'avenir des agricultures familiales du lac Alaotra Madagascar*, document de travail provisoire, s.l., 38 p.
- DOGLIOTTI, S., ROSSING, W.A.H., VAN ITTERSUM, M.K. (2005), *Rotat, a tool for systematically generating crop rotations*, Excel Software, AGRON
- DOMAS, R., PENOT, E., ANDRIAMALALA, H. (2008), « *Quand les tanety rejoignent les rizières au lac Alaotra* » : Diversification et innovation sur les zones exondées dans un contexte foncier de plus en plus saturé, Atelier régional de l'Agriculture de Conservation, Laos, 26 p.
- DUGUE, P., MATHIEU, B., SIBELET, N., SEUGE, C., VALL, E., CATHALA, M., OLINA, J-P. (2006), *Les paysans innovent, que font les agronomes ? Le cas des systèmes de culture en zone cotonnière du Cameroun*, Agronomes et innovations : 3^{ème} édition des entretiens du Pradel, colloque du 8 au 10 septembre 2004, Paris : l'Harmattan, p.103 à 122
- DURAND, C., NAVE, S. (2007), *Les paysans de l'Alaotra, entre rizières et tanety : étude des dynamiques agraires et des stratégies paysannes dans un contexte de pression foncière, Lac Alaotra, Madagascar*, Rapport de stage de 3^{ème} année, CIRAD, SUP-AGRO, ENESAD, Groupe ISA, 131 p. + annexes
- FAO, <http://www.fao.org/ag/ca/fr/>, site internet sur l'Agriculture de conservation, consulté le 28 août 2010
- GAMS, <http://www.gams.com/docs/FAQ/SOLVER.htm>, *What is optca/optcr?*, site internet FAQ du logiciel GAMS, consulté le 10 août 2010
- INRA (2005), *La modélisation à l'INRA*, document interne, 60 p.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE DE L'ÉLEVAGE ET DE LA PÊCHE (2001), *Monographie de la région moyen Ouest*, Unité de politique pour le développement rural (UPDR), 246 p.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE DE L'ÉLEVAGE ET DE LA PÊCHE (2004), *Compte rendu de la visite au lac Alaotra du 06 et 07 juin 2004*, 50 p.
- MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DU BUDGET (2004), *Revue d'Information Économique, Publication trimestrielle de la direction Générale de l'Économie*, Antananarivo, 19 p.
- NAUDIN, K., GOZE, E., BALARABE, O., GILLER, K.E., SCOPEL, E. (2010), *Impact of no tillage and mulching practices on cotton production in North Cameroon : A multi-locational on-farm assessment*, Soil & Tillage Research 108 (2010) 68-76, 9 p.
- NOVAK, S. (2008), *Méthodes de conception des systèmes de production innovants à l'échelle de l'exploitation agricole*, synthèse bibliographique, SUP-AGRO, INRA, CIRAD, Solphy expertise, 63 p.
- OGIER, J. (1989), *Zonage du lac Alaotra PRD*, 142 p.
- RAJOELINA, P., RAMELET, A. (1989), *Madagascar, La Grande Île*, Paris, Éditions L'Harmattan, Collection « Repères pour Madagascar et l'océan Indien », 7 - 47p.

- RAKOTOSOLOFA, M. (2010), *Productivité et valeur nutritive des plantes de couvertures (Stylosanthes guianensis, Brachiaria. brizantha, B. ruziziensis, B. humidicola, Vigna unguiculata, Dolichos lablab) et des résidus de récoltes (pailles de riz et de maïs) utilisés en Systèmes de culture sous-Couverture Végétale (SCV) au Lac Alaotra*, Rapport de stage de 3^{ème} année, département élevage, ESSA, Université d'Antananarivo, 93 p.
- RANDRIANARISON, L. (2010), *Statistiques de consommation des ménages*, traitement de données ROR, travail en cours, document Excel
- RAUNET, M. (1984), *Le milieu physique de la région du lac Alaotra – Système et structure*, IRAT, 226 p.
- RAUNET, M. (Juin 2007), *Les systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale permanente (SCV) : enjeux de Recherche-Développement pour les pays du Sud*, recueil de quelques textes parus dans « la gazette des SCV au CIRAD » de 2001 à 2007, CIRAD-UR SCV, 177 P.
- REBAÏNE, D. (2005), *Cours de conception et Analyse des Algorithmes : la méthode de Branch-and-Bound*, notes de cours, Département d'informatique et de mathématique, Université du Québec à Chicoutimi, Canada, chap. 6, 11 p.
- RIBIER, V. (2006), *L'agriculture malgache dans le contexte des négociations commerciales internationales, Constats et recommandations*, Rapport de mission Cabinet JEXCO projet n° 23a. Programme d'appui à l'intégration des états ACP dans le système commercial multilatéral (SCM), 92 p.
- RIDIER, A. (2009), *Modélisation de l'exploitation agricole : Résolution de problèmes d'optimisation par la programmation mathématique sous logiciel GAMS*, support de cours master AREM PURPAN & DAA SPET ENSAT, ENFA-LEREPS, 64 p.
- ROSENTHAL, R. E. (2007), *GAMS – A User's Guide*, Tutorial, GAMS Development Corporation, Washington DC, USA, 274 p.
- SCOPEL, E., DE TOURDONNET, S., TRIOMPHE, B. (2009), *Le projet PEPITES : ambitions et enjeux*, Séminaire de lancement, Présentation de 17 diapos.
- SÉGUY, L. (1999), *Cultiver durablement et proprement les sols de la planète, en semis direct*, CIRAD-CA/GEC, 65 p.
- TERRIER, M. (2008), *Enquêtes exploitations & Base de donnée brute sous forme Excel*, Mémoire de fin d'études, Sup-Agro, Montpellier
- TEYSSIER, A. (1994), *Contrôle de l'espace et développement rural dans l'ouest Alaotra : de l'analyse d'un système agraire à un projet de gestion de l'espace rural*, Thèse de géographie, université Paris I Panthéon Sorbonne. 473 p + annexes
- WILHELM, L., RAVELOMANANTSOA, O. (2006), *Première approche de la problématique famille/genre/jeunes ruraux pour appréhender le devenir des agricultures familiales autour du Lac Alaotra*, AFD, 48 p.