

MODELISATION DES EXPLOITATIONS AGRICOLES DU LAC ALAOTRA - MADAGASCAR EN PROGRAMMATION LINEAIRE



– **Guillaume Bruelle** –

Krishna Naudin

Maître de Stage

Philippe Grieu

Jury – 1er correcteur

Daniel Wallach

Jury – 2nd correcteur

Projet ANR « pépites »

Mémoire de fin d'études

Septembre 2010

REMERCIEMENTS

Ceux grâce à qui cette étude s'est déroulée dans un cadre convivial ne pourront tous être cités : Marie, Marion, Sakda, Juliette, Céline, Clara, Nowlenn et toutes les personnes de passage à la case des stagiaires du Cirad... Je vous remercie !

Merci à Mme Isabelle Michel et tous ses élèves de m'avoir permis de découvrir la réalité du terrain pendant 15 jours en leur compagnie.

Merci à Mme Hélène David-Benz, M. Olivier Husson, M. Eric Scopel, M. Eric Penot, M. Paulo Salgado et M. Raphaël Domas d'avoir donné de leur temps pour répondre à mes interrogations.

Merci à M. Marcel Lubbers qui, même à distance, a été à l'écoute et a réussi à résoudre mes problèmes techniques.

Merci à M. Philippe Grieu et M. Daniel Wallach, tuteur ENSAT et jurys de soutenance, qui ont su faire preuve de patience et qui m'ont fait confiance dans la prise en main de mon stage.

Je tiens enfin à adresser mes remerciements les plus sincères à M. Krishna Naudin qui a été un maître de stage exemplaire, toujours à l'écoute, disponible et qui a su m'orienter pour que le stage se déroule dans les meilleures conditions. Merci !

SOMMAIRE

Introduction	6
1 Cadre de l'étude	7
1.1 Organisation de la zone d'étude	7
1.1.1 Madagascar, la grande île.....	7
1.1.2 La région du lac Alaotra	8
1.1.2.1 Le « Grenier à riz de Madagascar ».....	8
1.1.2.2 Le milieu physique.....	9
1.1.2.3 Dynamique agraire de la région	13
1.2 Les systèmes de cultures sous couverture végétale (SCV).....	18
1.2.1 Principe des SCV.....	18
1.2.2 Les différents itinéraires techniques pratiqués.....	19
2 Problématique	21
2.1 Cadre institutionnel de l'étude.....	21
2.1.1 Contexte agricole mondial.....	21
2.1.2 Le projet ANR « pépites »	21
2.2 Objectifs de l'étude	22
2.3 Innovation, Modélisation & Agriculture.....	23
3 Méthodologie.....	25
3.1 GANESH : quel type de modèle ?	25
3.1.1 Domaine d'application	25
3.1.2 Echelle d'étude	25
3.1.3 Optimisation et MGPL	26
3.1.4 Un modèle hybride	26
3.1.5 Un outil « chercheurs ».....	26
3.2 Présentation des outils utilisés.....	27
3.2.1 La modélisation sous GAMS	27
3.2.2 Le stockage des paramètres sous Excel.....	29
3.3 Création du modèle GANESH	30
3.3.1 Source des données utilisées dans le modèle	30
3.3.1.1 Données pour les caractéristiques des itinéraires techniques.....	30
3.3.1.2 Données pour la structure de l'exploitation	31

3.3.2	Création du modèle	32
3.3.2.1	Echelles de temps utilisées.....	32
3.3.2.2	Modélisation de l'exploitation agricole	32
3.3.2.3	Création des successions culturales possibles	36
3.3.2.4	Itinéraires techniques sur RMME et baiboho	40
3.3.2.5	Contraintes et objectifs du modèle.....	42
3.4	Validation du modèle	46
3.5	Test de différentes contraintes et analyse des résultats	47
3.5.1	Test 1 : un agriculteur dit « standard »	48
3.5.2	Test 2 : Différents niveaux d'intégration des SCV.....	49
3.5.3	Test 3 : Sensibilité des exploitations agricoles aux aléas climatiques.....	49
3.5.4	Test 4 : Production laitière et fourragère	49
4	Résultats & Analyse.....	51
4.1	Validation du modèle	51
4.2	Maximisation du solde d'exploitation et minimisation de la charge de travail familial chez un agriculteur standard.....	53
4.3	La conversion aux techniques SCV, une nécessité ?	58
4.1	Le rôle tampon des systèmes de cultures SCV	63
4.2	Intégration de l'élevage dans le modèle	66
5	Limites et perspectives	67
5.1	Amélioration du modèle.....	67
5.1.1	Limites techniques	67
5.1.2	Optimisation des assolements sur baiboho et RMME.....	67
5.1.3	Vers un modèle évolutif.....	68
5.1.3.1	D'un bilan annuel à un bilan bimensuel	68
5.1.3.2	Des caractéristiques de culture variables	69
5.2	GANESH, un outil d'aide à la décision ?	69
	Conclusion	71
	Bibliographie.....	73
	Annexe : Les unités morpho-pédologiques de la région Alaotra	78

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Localisation de Madagascar et de la région du lac Alaotra	8
Figure 2: Région du lac Alaotra	9
Figure 3: Diagramme ombrothermique (Station Ambatondrazaka 1962-2005).....	10
Figure 4: Erosion d'un versant de tanety en lavaka	12
Figure 5: Mise en valeur des unités de paysage.....	14
Figure 6: Haricot sur paillage de Cynodon Dactylon	18
Figure 7: Schéma organisationnel du projet "pépites"	22
Figure 8: Echelles de temps du modèle	32
Figure 9: Exemple de description des différentes surfaces cultivées	35
Figure 10: Présentation des 39 CPA selon leur durée et leur type	37
Figure 11: Caractéristiques de l'exploitation de l'agriculteur M1101	47
Figure 12: Caractéristiques d'une exploitation « standard »	48
Figure 13: Evolution du solde d'exploitation en fonction de la main d'œuvre familiale disponible	53
Figure 14: Evolution du travail total par quinzaine pour les combinaisons de successions culturales de 0 à 6 200 heures de travail familial disponible	56
Figure 15: Evolution de la charge de travail (totale, extérieur et familiale) en fonction du pourcentage surfacique de SCV sur tanety	59
Figure 16: Evolution du solde d'exploitation et de la production sur tanety en fonction des surfaces en SCV sur 6 ans	61
Tableau 1: Température et pluviométrie moyenne de la région du lac Alaotra	10
Tableau 2: Synthèse de la typologie.....	17
Tableau 3: Composition familiale.....	33
Tableau 4: Rémunération de la main d'œuvre extérieure par quinzaine	33
Tableau 5: Consommation annuelle moyenne de produits à Ambatondrazaka	34
Tableau 6: Composition du seuil de survie	34
Tableau 7: Valorisation des produits de culture	38
Tableau 8: Liste des contraintes prises en compte dans la création des successions culturales	39
Tableau 9: Liste des paramètres du modèle	41
Tableau 10: Liste des sets du modèle	42
Tableau 11: Liste des variables du modèle	43
Tableau 12: Comparaisons des sorties économiques de GANESH et OLYMPE pour un même agriculteur (en kAr)	51
Tableau 13: Choix des successions culturales de 6 200 à 6 548 heures de travail familial pour une exploitation standard sur 6 ans.....	54
Tableau 14: Choix des successions culturales de 0 à 64% de surface de SCV sur 6 ans.....	59
Tableau 15: Combinaisons culturales les moins sensibles aux aléas climatiques de plusieurs intensités	62
Tableau 16: Comparaison des choix de successions culturales entre une exploitation standard et une exploitation laitière	65
Tableau 17: Comparaison des résultats technico-économiques entre l'exploitation laitière et l'exploitation standard	66

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, 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).

Après avoir situé la région du lac Alaotra dans son contexte national et régional, nous nous attacherons à monter comment les conditions agro-écologiques du milieu ont construit la dynamique agraire actuelle. Nous expliquerons ensuite le principe des techniques SCV. Cette contextualisation couplée à la définition plus étoffée de la problématique nous amènera à justifier les choix méthodologiques de conception du modèle. Enfin, nous analyserons plusieurs scénarios d'exploitations agricoles soumis au modèle créé pour évaluer les effets de l'intégration des techniques SCV dans ces exploitations. L'analyse des résultats délivrés par le modèle pourra aussi nous donner des indices quant aux limites et aux perspectives d'utilisation du modèle.

ⁱ Se prononçant « *alotch'* »

1 Cadre de l'étude

Cette première partie a pour objectif d'apporter les informations permettant de comprendre le contexte général du stage. Pour cela, une description de Madagascar et de la zone d'étude, la région du lac Alaotra, est présentée suivie d'une description des techniques d'agriculture de conservation (AC) mises en œuvre dans la région.

1.1 Organisation de la zone d'étude

1.1.1 Madagascar, la grande île

Située dans l'océan Indien (Figure 1), séparée du continent africain par le canal du Mozambique, Madagascar est la cinquième île du monde par sa taille (1580 km du Nord au Sud, 580 km d'Est en Ouest) pour une superficie totale de 587 040 km². Sa population est en majeure partie d'origine asiatique (indo-malaise), ce qui explique que son agriculture soit basée sur la riziculture aquatique repiquée, dont la superficie représente environ 13 000 km² (Andriamanalina, 2006). La population malgache dépasse aujourd'hui les 18 millions d'habitants et se compose à plus de 50% de jeunes de moins de 15 ans (Cordellier, Didiot, 2005). L'île est située presque entièrement dans la zone intertropicale (entre les 11°57' et 25°38' de latitude Sud et 43°12' et 50°17' de longitude Est) et repose sur un plateau continental constitué pour les deux tiers par un socle cristallin (Rajoelina, Ramelet, 1989). En surface, la majorité du pays est recouverte de latérite ce qui lui a valu le surnom d' «Île Rouge ». L'extension en latitude, la double façade maritime et les reliefs offrent à Madagascar une grande variété de paysages et de climats. Les Hauts-Plateaux traversant le pays du Nord au Sud sont réputés pour leurs températures fraîches et des paysages aux reliefs accidentés. La côte Est est marquée par une succession de falaises forestières et de lagunes longeant le littoral de l'océan Indien. Le Nord-Ouest se caractérise par la présence de vastes plaines alluviales sillonnées de nombreux cours d'eau. Enfin, à l'extrême Sud, un climat aride façonne des paysages quasi désertiques formés d'épineux et de plantes grasses (Rajoelina, Ramelet, 1989).

La diversité des écosystèmes permet une production agricole variée. Madagascar est exportateur de vanille (1er exportateur mondial), de girofle (2ème exportateur mondial), de café, de litchis et plus récemment de crevettes (BAD/CIMA, 2003). En 2006, l'agriculture représentait 35 % du PIB et occupait plus de 75 % de la population (Ribier, 2006). Madagascar dispose de 33 millions d'hectares de terres cultivables (soit environ 56 % de sa superficie totale) mais moins de 10 % sont cultivées dont la moitié en rizière (BAD/CIMA, 2003). Le riz reste la principale ressource alimentaire du pays. Les moyennes de consommation de riz blanc sont de 138 kg/hab/an en milieu rural et 118 kg/hab/an en zone milieu urbain ; ce qui classe les malgaches parmi les plus gros consommateurs de riz au monde (Ministère de l'Economie, des Finances et du Budget, 2004). Malgré des efforts pour atteindre l'autosuffisance, Madagascar est encore aujourd'hui importateur net en riz (les principaux fournisseurs sont asiatiques : Pakistan, Thaïlande, Inde). En 2005, l'île a importé pour plus de 34 millions US \$ de riz (Ribier, 2006), soit 10% de la consommation nationale.

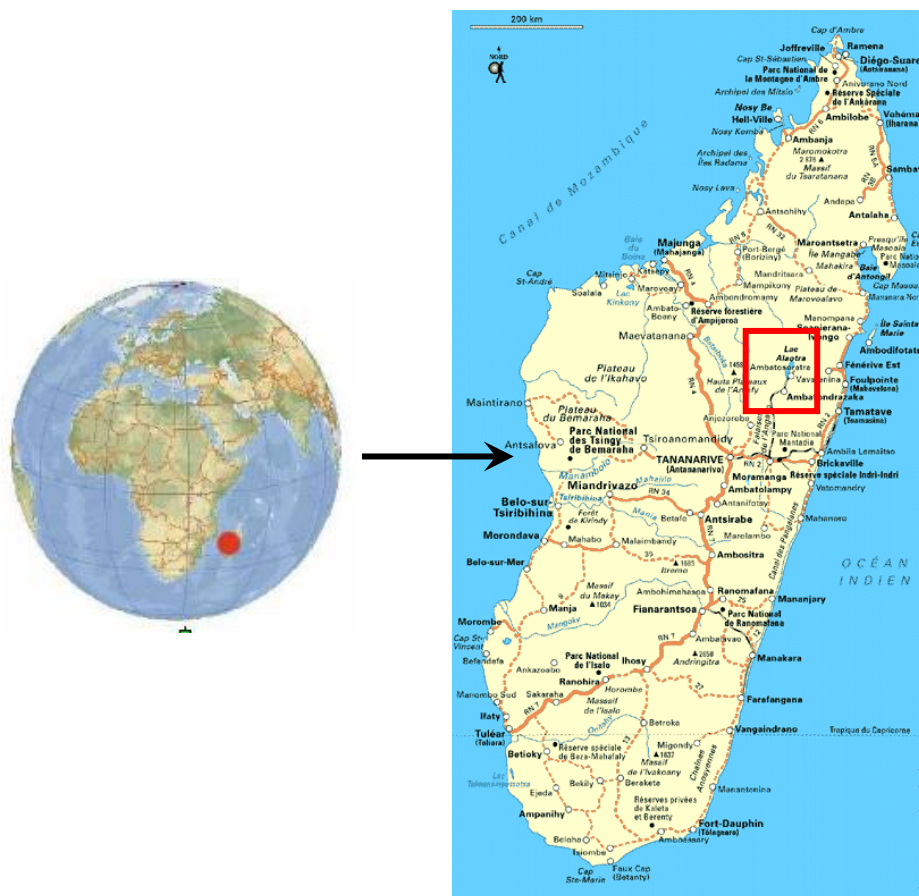


Figure 1: Localisation de Madagascar et de la région du lac Alaotra

Source : www.routard.com/guide_carte/code_dest/madagascar.htm et www.olscom.com

1.1.2 La région du lac Alaotra

1.1.2.1 Le « Grenier à riz de Madagascar »

La région d'étude (Figure 2) se trouve dans la partie Nord-est de l'île (région Alaotra-Mangoro, province de Tamatave), à 250 km d'Antananarivo. La sous-division Alaotra comprend les trois districts d'Ambatondrazaka, Amparafaravola et Andilamena pour une superficie totale de 18 965 km² (Ministère de l'agriculture malgache, 2001). La démographie de la région a été caractérisée par une forte immigration de familles paysannes attirées par la richesse de la cuvette du lac Alaotra. Aujourd'hui encore l'immigration se poursuit à un rythme soutenu. Ce phénomène conjugué à un fort taux de natalité explique le taux de croissance démographique de l'ordre de 4,2 % par an depuis une vingtaine d'années, bien supérieur à la moyenne nationale (autour de 2,7 %) (Wilhelm, Ravelomanantsoa, 2006). La population de la cuvette est estimée en 2005 à 670 000 habitants, dont près de 130 000 urbains. Elle aurait doublé depuis 1987 (Devèze, 2006).

La région de l'Alaotra, vaste plaine cernée de collines, se trouve enclavée dans une impasse, une unique route permettant d'y accéder. Malgré son isolement, la région se trouve depuis plusieurs décennies au cœur d'enjeux majeurs concernant la production rizicole. En effet, dans années 1970, le gouvernement malgache décide de faire de l'Alaotra le « grenier à riz de Madagascar », avec pour objectif de parvenir à l'autosuffisance alimentaire et de faire passer l'île de la position d'importateur à celle d'exportateur (Devèze, 2006). Grâce à l'augmentation des surfaces cultivées et à la maîtrise de l'eau (liée aux

aménagements réalisés par la SOMALAC), la production de riz double dans les années 70ⁱ. Cependant, les effets sont amoindris par une hausse rapide de la population au lac (forte natalité, migration) et la région enregistre une régression des surplus rizicolesⁱⁱ destinés à la commercialisation (Teyssier, 1994).



Figure 2: Région du lac Alaotra

Source : Projet BV/Lac

Actuellement, la région du lac Alaotra compte près de 30 000 ha de périmètres irrigués aménagés et environ 72 000 ha de périmètres traditionnels sans maîtrise de l'eau (MAEP, 2004). Malgré une saturation des rendements, un manque d'entretien des réseaux d'irrigation et une population toujours en hausse, la région du lac Alaotra demeure grande productrice de riz à l'échelle nationale (300 000 tonnes de paddy pour la campagne 2004 / 2005 selon la DRDR, soit 9% de la production nationale) et la réputation de grenier à riz malgache se maintient. La cuvette du lac Alaotra est l'une des rares zones du pays excédentaires en riz : chaque année un volume moyen de 80 000 tonnes de riz blanc est exporté vers Antananarivo et Tamatave, ce qui fait de l'Alaotra la principale source alimentaire de la capitale (MAEP, 2004).

1.1.2.2 Le milieu physique

Le climat

La région du lac Alaotra est marquée par un climat tropical humide d'altitude avec une température moyenne annuelle supérieure à 20°C (Tableau 1). La région étant située dans la zone de convergence intertropicale, le climat est caractérisé par deux saisons nettement contrastées : la saison des pluies (correspondant à l'été austral) et la saison sèche (l'hiver austral) :

ⁱ En 1980, la région Alaotra produit environ 200 000 tonnes de riz paddy par an (Teyssier, 1994)

ⁱⁱ Le surplus rizicole est le solde entre la production et les besoins régionaux. Les besoins étant calculés à partir d'une norme de consommation en kg de riz blanc par jour et par habitant (Teyssier, 1994).

- ✓ **la saison des pluies** : entre novembre et mars, un été chaud et pluvieux avec une température moyenne de 24°C et 80% des précipitations annuelles. C'est la principale saison de culture. Dans cette période, les maxima moyen et absolu s'approchent respectivement de 30°C et 35°C et l'ensoleillement maximum intervient entre janvier et juin.
- ✓ **la saison sèche** : durant les 7 autres mois de l'année s'installe un hiver frais et sec avec des températures moyennes autour de 17°C et des minima moyen et absolu respectivement au-dessous de 15°C et 5°C de mai à octobre. Pendant cette période de jours courts, les températures basses ainsi qu'un déficit hydrique important (Figure 3) excluent la possibilité d'une double culture de riz. Par contre dans certaines zones, des cultures de contre saison peuvent être pratiquées (grâce à une alimentation en eau par remontée de la nappe). La période hivernale (juillet et août) est marquée par une nébulosité et des crachins fréquents ; les mois suivants (jusqu'en novembre), la région entre dans la période d'insolation minimum.

Tableau 1: Température et pluviométrie moyenne de la région du lac Alaotra

Station météorologique d'Ambatondrazaka, période 1962 - 2005													
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	annuel
Température (°C)	23.6	23.9	23.3	22.1	19.8	17.6	17	17.3	18.5	20.8	22.9	23.6	20.87
Pluviométrie moyenne (mm)	249	218	157	44	15	4	5	4	9	30	89	224	104

Source : Durand, Nave, 2007

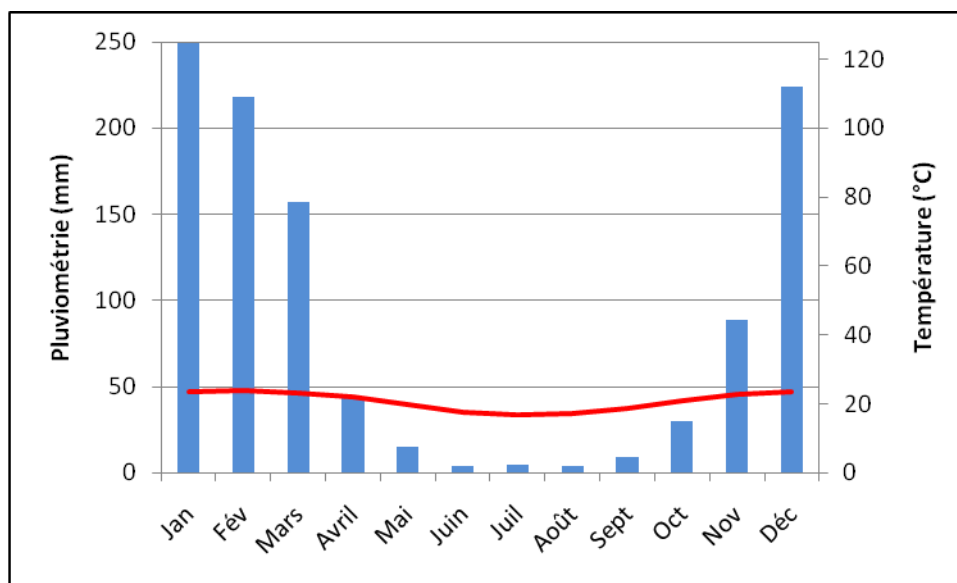


Figure 3: Diagramme ombrothermique (Station Ambatondrazaka 1962-2005)

Source : Durand, Nave, 2007

Il existe une forte variabilité inter annuelle qui entraîne une alternance de campagnes très sèches et très arrosées. L'aléa concerne surtout le début de la saison (octobre et novembre) : les premières précipitations importantes tardives entraînent parfois un décalage dans le lancement de la saison de cultures (Durand, Nave, 2007).

Il existe également une forte variabilité spatiale des précipitations due à un effet de foehn régional. La région étant soumise au vent de l'alizé, la pluviométrie est dépendante de

la circulation des masses d'air océaniques en provenance de l'Est. Après un assèchement et réchauffement, des masses d'air s'humidifient à nouveau en traversant la plaine lacustre avant de se condenser en abordant les massifs de l'Ouest. Globalement la zone Ouest / Sud-ouest est donc plus arrosée que la rive Est du lac (Teyssier, 1994).

Enfin, l'agressivité des précipitations devient parfois spectaculaire dans la région (en mars 2005, 150 mm de pluie tombés en 4^h30 à la station d'Ampitatsimo). Ces précipitations hors normes entraînent rupture de barrages et inondation de parcelles. De plus, elles sont particulièrement érosives, d'autant qu'elles se concentrent au moment de l'implantation des cultures lorsque le sol est généralement laissé à nu.

Ce climat irrégulier constitue une contrainte majeure pour tous les agriculteurs du lac Alaotra. C'est un des premiers facteurs de risque évoqué par les paysans (Durand, Nave, 2007). Chaque année, il faut adapter les calendriers en fonction du temps (par exemple, le repiquage du riz est impossible avant les premières pluies permettant la mise en boue des rizières). En cours de cycle, une inondation ou une sécheresse prolongée font chuter les rendements et peuvent même conduire à la perte de toute la parcelle.

L'hydrologie

Le fossé d'effondrement de l'Alaotra est occupé en position décentrée vers le Nord-est par le lac Alaotra, couvrant un plan d'eau de 25 000 hectares. Ce lac résiduel, profond de 2 à 4 mètres, est cerné d'un marécage à dominance de cypéracées s'étendant sur près de 100 000 hectares. Ces papyrus génèrent une quantité de débris qui à leur tour donnent naissance à une tourbe flottante se développant sur les 2 premiers mètres au dessous de la surface de l'eau. Le lac est alimenté par une trentaine de rivières en dispositif rayonnant. En se plaçant au Sud du lac et en suivant un mouvement circulaire vers l'Est, les principaux affluents rencontrés sont :

- ✓ **la Lohafasika Sahasomanga** : au sud du lac, avec un bassin versant de 275 km², cette rivière trouve son importance dans l'irrigation des 4 000 hectares de rizières du Périmètre de Colonisation n°15 (PC 15).
- ✓ **les vallées Sud-Est** : avec les rivières Harave, Lohafasika II et Manamontana (bassins versants de 23 000 hectares au total).
- ✓ **l'Anony** : au nord, bassin versant d'environ 1 600 km² irriguant un périmètre rizicole de 4 476 ha.
- ✓ **l'Imamba et l'Ivakaka** : deux bassins de respectivement 176 km² et de 57 km² irriguant à l'Ouest du lac un périmètre rizicole de 2 671 ha
- ✓ **la Sahabe** : elle se prolonge dans le lac par un chenal de 3 km, constituant une voie d'eau pour les pirogues des pêcheurs. Ce Bassin versant situé au Sud Ouest s'étend sur 1 200 km².

Les eaux circulent grâce à un écoulement gravitaire depuis les bassins versants jusqu'aux eaux libres du lac. Elles s'en échappent ensuite au travers de l'unique exutoire, le Maningory, situé au Nord-est de la dépression. Le Maningory quitte ensuite la région de lac Alaotra et se prolonge en direction du Nord-est pour finalement se jeter dans l'Océan Indien (Colletta, Rojot, 2006).

Encadré 1 : Des formations à fort potentiel érosif (Durand, Nave, 2007)

Comme le souligne A. Teyssier en 1994, « *Compte tenu d'une pluviométrie caractérisée par l'irrégularité et de sols faiblement structurés sur les reliefs, les conditions propices au développement de phénomènes érosifs de surface sont réunis* ». Deux phénomènes d'érosion vont être décrits ici. Le premier, à peine perceptible, concerne le ruissellement superficiel ; le second prend la forme de figures d'érosion d'envergure spectaculaire portant le nom de *lavaka*.

En fin de saison sèche, les sols des *tanety* (collines) se trouvent desséchés et compactés du fait d'une longue exposition au soleil et aux vents ainsi qu'aux passages répétés de feux de brousse. Sur les premiers centimètres, une croûte superficielle presque imperméable se forme et se trouve colonisée par des lichens. Les premières pluies orageuses s'abattent sur ce sol dont les pores bouchés empêchent toute infiltration. Les eaux entament alors un écoulement en nappe le long des pentes des versants convexes. La rareté de la végétation arborée ne permet pas d'opposer une résistance à ces ruissellements qui dévalent les pentes, prennent de la vitesse, emportent des particules solides et parviennent même à déchausser des touffes de graminées *Aristida (bozaka)*. Il ne faut pas sous estimer les conséquences des eaux superficielles qui sont souvent à l'origine de déplacements de matériaux et de remaniements très importants si l'on se place à une échelle temporelle humaine (Teyssier, 1994). Lorsque se conjugue la violence des premières pluies de janvier avec le caractère quasi imperméable des sols de *tanety* sortant de saison sèche, on comprend les problèmes d'ensablement auxquels doivent faire face les riziculteurs de la plaine.

Les *lavaka* (signifiant « trou » en malgache) sont des figures d'érosion d'origine géologique comptées parmi les plus impressionnantes de la planète. L'imagination ne suffit pas pour comprendre les mots des géomorphologues des années 50 qui, pour décrire les *lavaka* de l'Alaotra, disaient souvent « *c'est comme si la colline s'effondrait sur elle-même* » (Figure 4). Les *lavaka* se présentent comme des ravins en forme de poire renversée (resserrées en aval et large en amont), dont le profil transversal dessine un « U » ou un « V ». On rencontre sur les versants de l'Alaotra des *lavaka* de taille très variables (certaines pouvant atteindre plus de 100 km de périmètre). Le terme *lavaka* est aujourd'hui largement employé au-delà de Madagascar pour désigner des figures d'érosion comparables.



Figure 4: Erosion d'un versant de tanety en lavaka

Source : Krishna Naudin

Le climat de l'Alaotra favorise de telles dynamiques érosives. En saison sèche, les altérites argileuses se dessèchent, se compactent et se fendillent au sommet des *lavaka*. Dès les premières précipitations, les eaux s'immiscent dans ces fentes, des blocs de terre s'effondrent immédiatement. Du fait de l'irrégularité des précipitations au cours de la saison des pluies, chaque orage conduit à une fragilisation de la structure qui, dépassé son seuil de résistance, s'affaisse soudainement.

Le régime hydrologique du lac est intimement lié à celui des précipitations qui s'abattent sur les bassins versants de la région. Ce lien est d'autant plus compréhensible lorsque la disparition de la couverture végétale sur les *tanety* accentue les phénomènes de ruissellements. En saison sèche, les eaux ne dépassent pas la cote de 750 m, par contre, en saison des pluies, le niveau monte de 2 voire 5 mètres en période cyclonique (Ogier, 1989). Les orages de début de saison des pluies entraînent des crues soudaines et violentes dans les rivières affluentes. Ces eaux à régime torrentiel ajoutées au ruissellement particulièrement important dans la région se déversent en excédent dans le lac. Bien que l'exutoire de Maningory joue un rôle de tampon régulateur et retardateur dans le fonctionnement hydrologique du lac, il devient insuffisant notamment en période cyclonique. Le lac connaît une brusque montée des eaux en janvier et atteint sa cote maximale dans le courant du mois de février. Dans les années de très fortes crues, le plan d'eau peut augmenter de 50%. La surface du lac passe alors de 200 km² à 300 km² (Teyssier, 1994). Le niveau de crue varie d'une année sur l'autre et n'est pas forcément lié au cumul des précipitations enregistrées pendant la saison des pluies considérée. A partir des mois de mars ou avril, le niveau des eaux du lac décroît progressivement pour atteindre son niveau le plus bas en novembre et décembre. Là encore, les niveaux d'étiage varient selon les années.

L'encadré 1 évoque le potentiel érosif des bassins versants surplombant la cuvette. Les phénomènes de ruissellement superficiel et la progression des *lavaka* engendrent l'altération et le transport de plusieurs tonnes de matériaux chaque année. Le lac, pris en étau dans une ceinture de marais qui avance lentement sous l'effet des apports dus à l'ensablement, voit sa superficie se réduire d'années en années. Sa profondeur n'atteint pas les 2 mètres par endroit. Les scénarios les plus pessimistes pronostiquent un comblement rapide du lac si des pratiques antiérosives ne sont pas mises en œuvre sur les *tanety*.

Les unités morpho-pédologiques

En 1984, Raunet établit une classification des unités morpho-pédologiques de l'Alaotra. Son étude met en évidence une répartition des unités depuis la périphérie vers le centre de la cuvette. On distingue alors différents types de sols selon leurs spécificités pédologiques et leurs régimes hydriques propres :

- ✓ les sols ferrallitiques de *tanety* ;
- ✓ les sols de bas de pente ;
- ✓ les sols alluviaux (*baiboho*) ;
- ✓ les sols de plaine.

Dans l'annexe 1 sont détaillés les quatre types de sols avec leurs subdivisions, leurs propriétés physico-chimiques et hydriques.

1.1.2.3 Dynamique agraire de la région

1.1.2.3.1 Agriculture et toposéquence

Compte tenu de la répartition spatiale des différentes unités morpho-pédologiques présentées ci-avant, les agriculteurs ont raisonné la mise en valeur agricole de leurs terres selon la toposéquence. Le schéma ci-après (Figure 5) présente les grandes tendances de mise en valeur des sols.

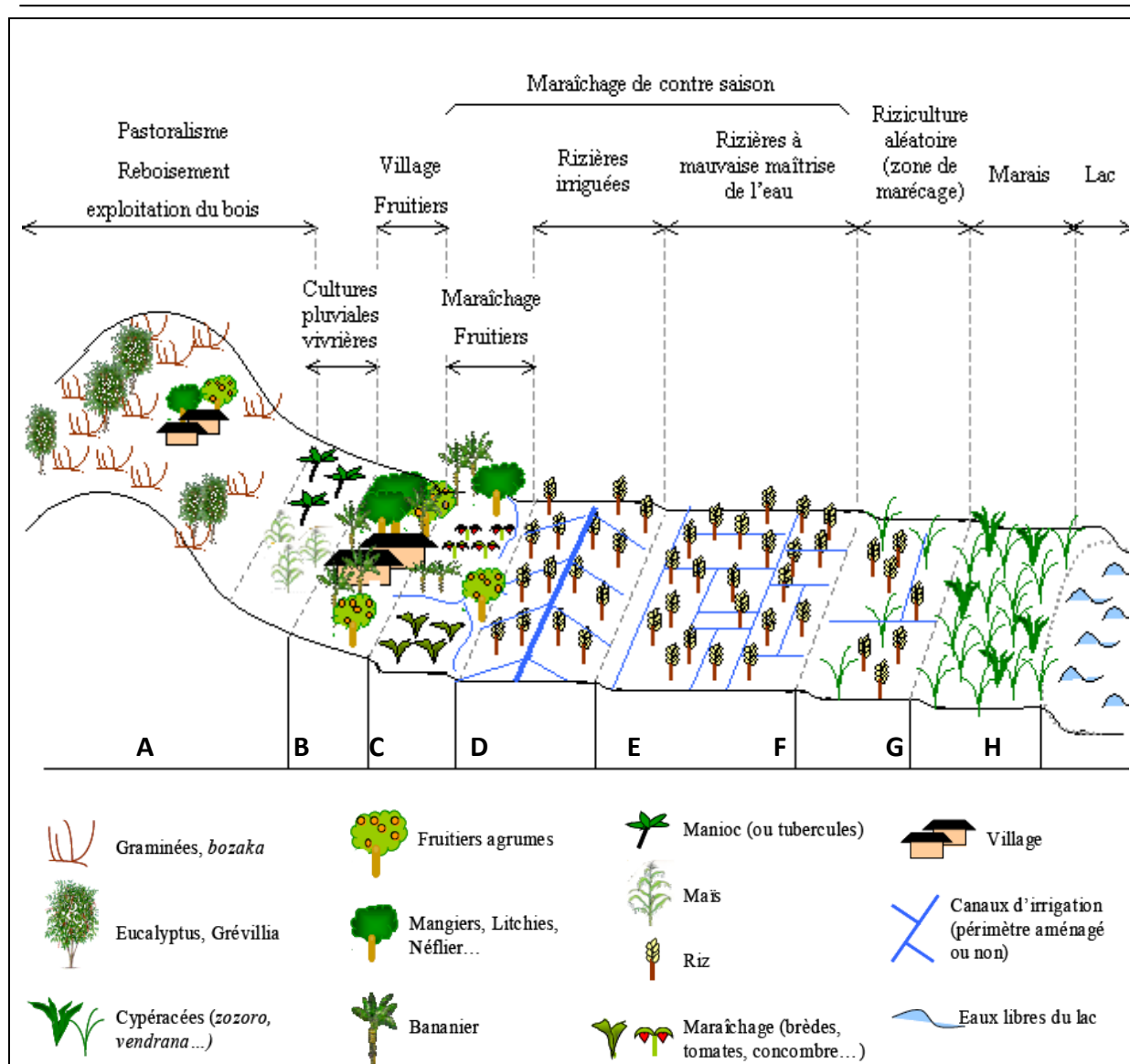


Figure 5: Mise en valeur des unités de paysage

Source : inspiré de Durand, Nave, 2007 ; modifications personnelles

L'unité A représente les *tanety*. Du sommet vers le bas, on y trouve trois types de valorisations agricoles :

- ✓ La partie plate supérieure, appelée plateau sommital, est une zone de pâturage. Elle est peuplée de graminées diverses, majoritairement *Aristida multicaulis* et des fougères. C'est une zone de pastoralisme où les ressources ligneuses sont globalement très rares. À l'Ouest on trouve quelques eucalyptus (*Eucalyptus robusta*) et Grévillia (*Grevillea robusta*) isolés, issus de reboisement. À l'Est et surtout au Sud, certaines zones sont nettement plus boisées, cette fois uniquement par des Eucalyptus.
- ✓ La partie en pente est une zone très peu fréquentée et non mise en valeur du fait de sa dénivellation importante. C'est ici que se forment les *lavaka*.
- ✓ Les bas de pente, correspondant au piémont des collines, sont le lieu de cultures vivrières de type manioc et maïs principalement. Selon les villages et la topographie, ces zones sont plus ou moins étendues : dans certains cas, l'élévation est progressive vers les *tanety* ce qui laisse un espace considérable pour ces cultures pluviales ; à

l'inverse, ces zones sont parfois en pente raide ce qui limite rapidement leur mise en valeur agricole.

L'unité B coïncide avec la zone d'habitation du village. A proximité des maisons, des arbres fruitiers et quelques rares jardins de case sont exploités.

L'unité C se situe parfois à proximité directe du village, ou à quelques minutes de marche sur un niveau topographique inférieur, ou encore très en contre bas, encaissée au fond d'une vallée. C'est à cet endroit que l'on trouve les sols alluvionnaires nommés *baiboho*. Sur ces terres riches, les agriculteurs pratiquent le plus souvent des cultures maraîchères. Les *baiboho* sont des lieux humides où l'eau circule dans les multiples canaux naturels ou artificiels qui le quadrillent. Ces canaux, peu profonds (moins d'un mètre), mettent à jour l'eau de la nappe que l'on sait proche de la surface. L'humidité et la sensation de fraîcheur qui y règne est maintenue grâce à l'ombre des arbres fruitiers : manguiers, papayers, litchis, néfliers, caféiers, cocotiers, orangers (...) ainsi que de nombreux bananiers parfois plantés en ligne et faisant office de clôture entre les parcelles.

L'unité D représente les zones cultivées en riz dans lesquelles les agriculteurs parviennent à maîtriser l'eau correctement. Qualifiées de rizières irriguées (RI), elles peuvent avoir fait l'objet d'aménagements lourds réalisés par la SOMALAC (on parlera alors de périmètre irrigués), ou être le fruit du travail des agriculteurs.

L'unité E, bien que visuellement très proche de la précédente, s'en distingue sur un point fondamental : il est difficile voire impossible de contrôler l'eau à certains moments de l'année. Ces rizières à mauvaise maîtrise de l'eau (RMME) sont fréquemment inondées, ce qui induit des rendements inévitablement plus faibles que ceux des rizières irriguées.

L'unité F est une zone de marécage qui laisse place à des surfaces rizicultivables. Ces surfaces sont alors mises en valeur grâce à des systèmes de riz de décrue. Les rendements sont très aléatoires car soumis aux imprévisibles crues du lac.

L'unité G est constituée du marais qui ceinture le lac (**unité H**). Ces zones sont utilisées par les pêcheurs. Les différentes espèces pêchées sont surtout *Tilapia nilotica*, *Cyprinus carpio* et *Ophiocephalus spp.*. Afin de préserver les ressources halieutiques, la pêche est interdite au lac entre les mois d'octobre et décembre.

1.1.2.3.2 Le projet BV/Lac : Mise en valeur et protection des bassins versants du lac Alaotra

Aujourd'hui, la cuvette du lac Alaotra est l'une des plus grandes zones rizicoles de Madagascar, avec de 80 à 100 000 hectares de rizières (MAEP, UPDR, 2001). Mais la région est menacée par une pression démographique et des pratiques agricoles érosives, une insécurité foncière, et des problèmes d'organisation de maintenance des réseaux hydrauliques depuis le désengagement de l'État. Le bassin versant du lac Alaotra (7 000 km²) fait partie de la convention internationale sur les zones humides RAMSARⁱ depuis plusieurs années.

ⁱ La convention RAMSAR sur les zones humides est un traité intergouvernemental qui sert de cadre à l'action nationale et à la coopération internationale pour la conservation et l'utilisation rationnelle des zones humides et de leurs ressources, en tant que contribution à la réalisation du développement durable.

Les projets et actions de développement ont été nombreux au lac. Après l'indépendance, la priorité a été la mise en valeur rizicole de la cuvette et l'agriculture familiale, avec la création d'un établissement public en 1961 : la SOMALAC permettant entre autre l'amélioration des aménagements hydrauliques des périmètres irrigués. Plus tard dans les années 80, le Fofifa (Centre national de la recherche appliquée au développement rural, créé en 1974) et le Cirad ont mis en place un programme de création variétale de riz pluvial, permettant le développement de cette culture. En 2004, un projet d'appui à la diffusion des techniques agro-écologiques à Madagascar dont les opérateurs sont l'ONG Tafa et le GSDM, intervient dans 5 régions dont le lac Alaotra. Tafa est chargée de la mise au point locale des itinéraires techniques, de la formation et de la diffusion des systèmes de culture SCV.

Pour permettre le développement durable de la région du lac Alaotra, le projet de mise en valeur et de protection des bassins versants du lac Alaotra (BV/Lac), conçu en 2000, a démarré en avril 2003 pour une durée prévue de 5 ans. Le projet d'un budget de 8,5 millions d'euro est financé par l'agence française de développement (AFD) et par la République de Madagascar. Le projet concernait initialement 7 communes autour d'Ambatondrazaka (PC15-Vallée Marianina et Vallées du Sud Est) ainsi que dans le bassin versant en amont des périmètres irrigués Imamba et Ivakaka, en continuité d'actions entreprises avec le soutien de l'AFD depuis 1990. La zone d'action a été progressivement étendue à d'autres collectivités territoriales en réponse à la demande des partenaires locaux.

Il est important de préciser que ce projet chargé de mettre au point et de tester des nouvelles méthodes d'intervention répliquables par ailleurs, constitue le prototype de la mise en application de l'approche « Bassins Versant » sur laquelle repose le programme national « Bassins versant – Périmètres irrigués » que le ministère de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche (MAEP) continue de promouvoir au près des différents bailleurs de fonds. Les objectifs du projet sont les suivants :

- ✓ accroître et sécuriser les revenus des producteurs, touchés par les aléas climatiques ;
- ✓ préserver les ressources naturelles d'une zone écologique très fragile actuellement menacée et sécuriser les investissements d'irrigation existant en aval ;
- ✓ appuyer les organisations des producteurs en leur permettant de devenir progressivement des maîtres d'ouvrages locaux d'actions de développement.

La tutelle du projet est le MAEP et le maître d'œuvre délégué est le Cirad (département ES). La cellule de projet basée à Ambatondrazaka est chargée de la coordination et de la mise en œuvre d'actions par des prestataires locaux. Ces actions se concentrent sur les points suivants :

- ✓ la sécurisation foncière;
- ✓ l'environnement;
- ✓ la mise en valeur agricole;
- ✓ l'élevage;
- ✓ les infrastructures rurales;
- ✓ les aménagements hydro-agricoles;
- ✓ le crédit rural;
- ✓ l'animation-formation.

Ces actions sont basées en particulier sur la diffusion des techniques agro-écologiques, comme le système de culture en semis direct sous couverture végétale (§ 1.2.)

et la mise au point à grande échelle de systèmes de valorisation des rizières à mauvaise maîtrise de l'eau (RMME).

1.1.2.3.3 Typologie des exploitations agricoles du lac Alaotra

A la demande de la cellule BV/Lac, une étude précise reflétant le fonctionnement et la diversité des exploitations agricoles de la zone d'intervention du projet a été réalisée (Durand, Nave, 2007). Pour ce faire, un diagnostic agraire a été établi ; ce qui a permis de mettre en évidence les dynamiques agricoles qui animent la région. Sur un échantillon de plusieurs exploitations enquêtées, une typologie d'exploitations (Tableau 2) a été créée. Construite sur la base de 9 critères discriminants, 7 types d'exploitations agricoles ont été dégagés.

Tableau 2: Synthèse de la typologie

TYPE	Critère 1 : Autosuffisance en riz liée au type de rizière	Critère 2 : Niveau de diversification avec d'autres productions	Critères 3 : Type de main d'œuvre et activité off-farm
A : Grands riziculteurs	5 ha de RI, autosuffisance en riz et vente	<i>Tanety</i> (<i>T</i>) > 4 ha peu voire pas cultivées, cultures extensives	Main d'œuvre temporaire (MO temp.) > 300 H.j
B : Riziculteurs à rendement aléatoire	RMME de décrue, autosuffisance en riz et vente	2 à 3 ha de T et <i>baibofo</i> (<i>B</i>) cultivés, moyennement intensif, objectif de vente	MO temp. > 200 H.j
C : Autosuffisants exploitant les <i>tanety</i>	2 ha de RI/RMME, risque moyen, autosuffisant en riz	Moins de 3 ha de T/B cultivés, cultures intensives, objectif de vente	MO temp. = 100 H.j, off-farm = services
D : Agriculteurs diversifiant leur production	1,5ha de RMME, risque++, autosuffisant (pas tous les ans)	1 à 2 ha de T/B cultivés, objectif de vente, élevage	MO temp. = 100 H.j si 1 ha → off-farm
E : Agriculteurs non-autosuffisants, ouvriers agricoles	Peu ou pas de RI/RMME, risque+++, non-autosuffisants	Moins de 1 ha de T/B, cultures très intensives, objectif de vente	Pas de MO temp. Off-farm = ouvrier agricole
F : Pêcheurs pratiquant l'agriculture	1 ha de RMME, non-autosuffisants	Moins de 0,5 ha de T/B, cultures intensives, vente et autoconsommation	Pas de MO temp. Off-farm = pêche
G : Pêcheurs sans terre, sans activité agricole <i>Susceptibles de devenir type « F »</i>	Sans terre, non-autosuffisants	Sans terre	Ouvriers agricoles fournissant de la main d'œuvre aux autres types

Source : Durand, Nave, 2007

1.2 Les systèmes de cultures sous couverture végétale (SCV)

Les systèmes de culture en semis direct sont particuliers dans la mesure où ils peuvent être considérés comme des systèmes de cultures pérennes, avec des rotations de cultures annuelles. Ce sont des systèmes agro-écologiques qui s'intègrent donc dans un objectif d'agriculture de conservation (AC) comme défini par la FAO : l'agriculture de conservation repose sur les trois critères suivants : (i) l'absence de retournement profond du sol et donc une implantation des cultures en semis direct ; (ii) le maintien d'un couvert végétal permanent (mort ou vivant) ; (iii) la gestion des cultures en rotation en essayant de développer des synergies (insertion de légumineuses, association de cultures). L'AC vise à une meilleure utilisation des ressources agricoles par la gestion intégrée des disponibilités en sol, en eau et en ressources biologiques, avec une limitation des intrants externes. Elle contribue à la conservation de l'environnement et à une production agricole durable.

1.2.1 Principe des SCV

Le SCV est un système de culture en semis direct sous couverture végétale permanente. Semer directement signifie semer sans travailler préalablement le sol qui n'est alors plus perturbé par des outils. C'est l'activité biologique (faune, racines...) qui remplace alors l'effet de l'outil. Une couverture végétale permanente est une protection permanente et totale du sol par une biomasse végétale (cultures principales, résidus de cultures, intercultures, plantes fourragères,...) que l'agriculteur doit gérer. À aucun moment le sol n'est dénudé. Le semis direct se fait à travers le mulch (Figure 6).



Figure 6: Haricot sur paillage de Cynodon Dactylon

Source : Olivier Husson

Il peut s'agir d'une couverture morte ou vive. Ces couvertures ont plusieurs fonctions (Raunet, 2007):

- ✓ une fonction protectrice vis à vis des agressions climatiques, d'un excès d'évaporation, des mauvaises herbes et du poids des engins agricoles ;
- ✓ une fonction restructurante et revitalisante du sol, par une réactivation biologique et une décompaction du sol par enracinement profond;
- ✓ une fonction recycleuse des éléments minéraux en profondeur ;
- ✓ une fonction fourragère, dans les intercultures ;

- ✓ une fonction de séquestration du carbone dans la mesure où une partie de la biomasse (aérienne et souterraine) se transforme en humus stable et reste dans le sol.

Grâce à ce système, imitant l'écosystème forestier, le ruissellement de l'eau est moindre, le sol est protégé de l'érosion, et l'activité microbiologique du sol s'accroît. L'évaporation de l'eau du sol est réduite et la fertilité s'améliore progressivement. La couverture permet de contrôler les adventices. Ainsi les rendements des cultures sont stabilisés au cours des années et peuvent même augmenter. Le SCV permet théoriquement de diminuer les temps de travaux et les coûts, et d'augmenter la productivité du travail (Séguy, 1999). Ces systèmes peuvent constituer une alternative à la jachère.

Dans un contexte où la productivité agricole est aléatoire et ne peut pas toujours assurer la sécurité alimentaire et fournir une source de revenu stable, les exploitants s'orientent vers une exploitation non contrôlée des sols dégradés ; la fertilité du sol n'est pas renouvelée car les agriculteurs n'ont pas les moyens d'accéder aux engrais chimiques ; l'intégration agriculture-élevage est peu développée et le surpâturage est fréquent par manque de production fourragère. Les itinéraires techniques SCV proposés semblent adaptés et permettraient de résoudre une grande part de ces problèmes (restauration de la fertilité, amélioration des rendements, production fourragère...).

1.2.2 Les différents itinéraires techniques pratiqués

Les systèmes SCV doivent être bien adaptés à la situation des agriculteurs (surfaces, productions, types de sols...) car pour eux tout doit être rapidement valorisable. La production *in situ* de biomasse par des légumineuses volubiles associées aux céréales qui servent ensuite de paillage pour la culture suivante sont préconisés pour restaurer la fertilité des sols. Le choix des productions doit également être judicieux. En effet, les agriculteurs préfèrent cultiver les légumineuses en association avec une céréale (riz, maïs) qui constitue une culture de subsistance ; ou encore, les productions de brachiaria et stylosanthes ne seront proposées qu'aux agriculteurs pratiquant de l'élevage, ou à ceux ayant de grandes surfaces et des sols très compacts et peu structurés.

L'enherbement par du *Brachiaria spp.* ou du *Stylosanthes guianensis* seul, en général sur des aires de parcours, est un autre type de couverture vive possible. On peut le considérer comme un système SCV si l'objectif à court terme du paysan est de reprendre sa parcelle en culture vivrière, qu'il plantera alors en semis direct. Le Stylosanthes associe fixation de l'azote et amélioration de la structure du sol. Le Brachiaria a une propriété restructurante du sol et agit comme une pompe biologique recyclant les éléments minéraux du sol. Ce sont aussi des fourrages, riches en protéines, capables de pousser pendant la saison sèche. Trois espèces sont diffusées : le *Brachiaria humidicola* pour restructurer les sols de *tanety* très dégradés, le *Brachiaria ruziziensis* pour reprendre les parcelles en cultures vivrières (après deux ans environ), et le *Brachiaria brizantha* qui à long terme sert surtout de pâturages. En association, le Brachiaria permet d'augmenter les rendements de manioc.

Les itinéraires de systèmes SCV se mettent en place sur plusieurs années, c'est pourquoi il est plus facile de travailler avec des agriculteurs propriétaires de leur parcelle. Les contrats de location ou métayage sont instables et adopter le SCV dans ces conditions

est un risque peu négligeable pour l'agriculteur qui n'est pas certain de pouvoir cultiver la même parcelle plusieurs années consécutives.

Les systèmes SCV sont réalisés sur les bas de pentes principalement, mais aussi sur versants de *tanety* et *baiboho*. Ils sont en général basés sur une rotation graminée-légumineuse. Les propriétés des sols que l'on retrouve sur la topographie sont différentes et on n'adoptera donc pas les mêmes systèmes (par exemple, les cultures de contre-saison ne sont pas possible sur les bas de pente car elles n'ont pas accès à l'eau de la nappe contrairement aux cultures des zones de *baiboho*). Les systèmes les plus fréquemment adoptés dans la région sont (Durand, Nave, 2007) :

- ✓ sur bas de pente en couverture vive, une année de maïs et dolique associés (ou maïs et niébé), suivi d'une année de riz ; ce qui permet un apport d'azote et de pouvoir à terme, limiter les apports extérieurs d'engrais ;
- ✓ sur *baiboho* en couverture morte, chaque année, la culture du riz est immédiatement suivie de cultures de contre-saison paillées (il s'agit souvent de cultures maraîchères et dans un premier temps on privilégie le haricot pour l'apport d'azote).

2 Problématique

2.1 Cadre institutionnel de l'étude

2.1.1 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 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.

2.1.2 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).

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).

Comme le présente le schéma ci-après (Figure 7), 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).

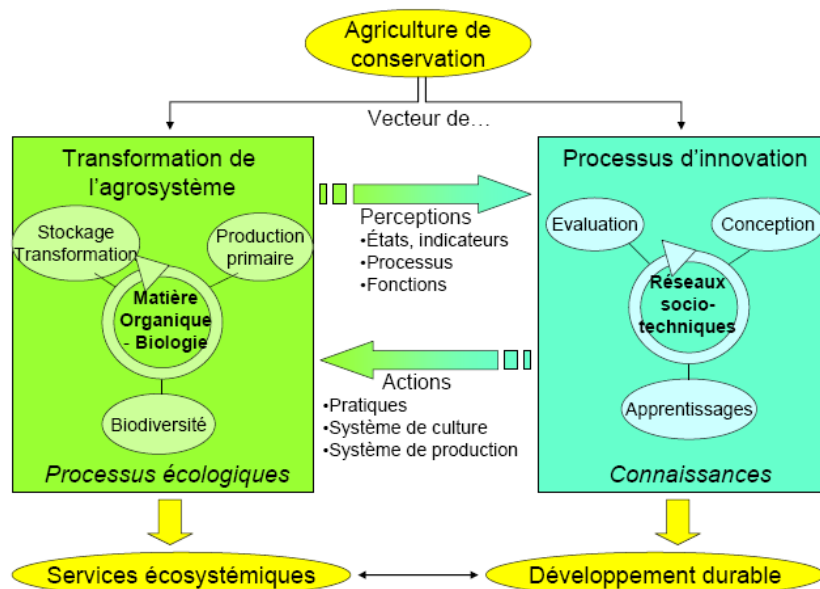


Figure 7: Schéma organisationnel du projet "pépites"

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 ;
- ✓ 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.

2.2 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).

2.3 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 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

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

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).

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

3 Méthodologie

3.1 GANESH : quel type de modèle ?

Déjà mentionnés plus haut, quelques indices laissent deviner la nature du modèle GANESH, mais il est important de définir clairement, ou de repréciser, les caractéristiques du modèle afin d'en comprendre les objectifs, le domaine d'application et les résultats attendus dans cette étude.

3.1.1 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, dont les avantages agronomiques et environnementaux sont décrits au § 1.2, dans la liste des rotations possibles, on considère que l'on prend en considération l'impact agronomique 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.

3.1.2 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 réglementaires.

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.

3.1.3 Optimisation et MGPLⁱ

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 Baijukyaⁱⁱ (2004).

3.1.4 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 culturales dites conventionnelles ou traditionnellesⁱⁱⁱ. 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 ans^{iv} 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.

3.1.5 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

ⁱ Multiple-Goal Linear Programming.

ⁱⁱ 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.

ⁱⁱⁱ 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.

^{iv} Ces successions culturales sont expliqués plus bas, dans la partie méthodologie.

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 empiriqueⁱ 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,...).

3.2 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.

3.2.1 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). 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 (+, -, =, >, <...);

ⁱ 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).

- ✓ 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. *L'explication de chaque partie s'appuie sur un exemple simple d'exploitation agricole souhaitant optimiser sa marge brute globale (maximiser) sous une contrainte de surface agricole disponible maximale.*

- ✓ Les sets ou ensembles correspondent aux indices de l'écriture algébrique. *Par exemple, pour une exploitation donnée, il y a les différentes **cultures** disponibles.*
- ✓ Les paramètres, scalaires et tables correspondent à toutes les données exogènes du modèle. *On définit une surface disponible maximum (le scalaire **surface** = 50 ha) et les rendements et les prix de vente de chaque culture (les paramètres **rendement(cultures)** et **prix(cultures)** qui prennent une valeur différente par culture).*
- ✓ Les variables endogènes sont calculées par le modèle. *Ici, **S(cultures)** représente la surface de chaque culture.*
- ✓ Les équations du modèle représentent les contraintes et la fonction objectif à optimiser :

- *La contrainte d'assolement est la suivante :*

$$\sum_{cultures} [S(culture)] \leq surface ;$$

La somme des surfaces attribuées à chaque culture doit être inférieure ou égale à la surface disponible totale.

- *La fonction à maximiser est la suivante :*

$$Marge Brute = \sum_{cultures} [(S(cultures) \times rendement(cultures) \times (prix(culture)))] ;$$

La somme des surfaces de chaque culture multipliées par leurs rendements et leurs prix représente la marge brute globale à maximiser.

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'Évaluation 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.

3.2.2 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 (§ 3.2.1), 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.

3.3 Création du modèle GANESH

3.3.1 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.

3.3.1.1 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.

3.3.1.2 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 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

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.

superflus ou exceptionnels. D'autre part, les données permettent de quantifier les caractéristiques retenues pour modéliser un type d'exploitation donnée.

3.3.2 Création du modèle

3.3.2.1 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 (§ 1.1.2.2) : 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 8) récapitule les différentes échelles de temps utilisées :

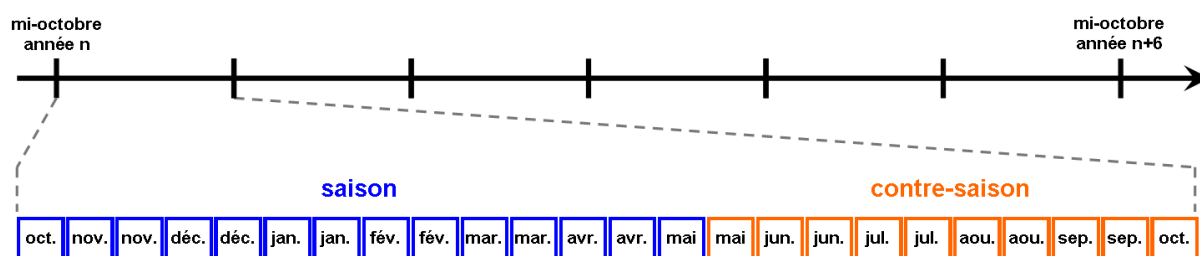


Figure 8: Echelles de temps du modèle

Source : création personnelle

3.3.2.2 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 (§ 1.1.2.3.3) 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

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.

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).

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 3).

Tableau 3: 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 (Tableau 4). 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.

Tableau 4: Rémunération de la main d'œuvre extérieure par quinzaine

Quinzaine n°	1	2 à 5	6 à 11	12 à 14	15 à 24
Rémunération Journalière (Ariary ⁱⁱ)	1 500	2 000	1 500	2 000	1 200

Source : Bedoin, 2006

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.

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.

ⁱⁱ L'Ariary est la monnaie malgache : 1 Euro = 2600 Ariary au 1 septembre 2010

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 (Tableau 5) :

Tableau 5: Consommation annuelle moyenne de produits à Ambatondrazaka

Produit	Consommation (kg/personne/an)
Riz blanc	138
Maïs	12
Arachides ou Pois de Terre	10
Haricot ou Niébé	10
Manioc	50

Source : Randrianarison, 2010

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). Ce seuil de survie est composé de différents besoins (Tableau 6):

Tableau 6: Composition du seuil de survie

	Coût (en Ariary/an)	unité
Repas (poisson, légumes)	37 000	Bouche à nourrir
Pétrole	3 000	Famille
Sel	200	Bouche à nourrir
Savon	9 000	Bouche à nourrir
Vêtements	5 000	Bouche à nourrir
Obligations familiales	15 000	Famille
Frais de scolarité	18 000	Enfant scolarisé

Source : Bedoin, 2006

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 zébus sont la principale force de travail sur l'exploitation et peuvent représenter un capital sur pieds, mobilisable en cas d'imprévu. Cette dernière option n'est pas prise en compte dans le modèle. Dans notre cas, un zébu représente (Olympe, 2007), par an:

- ✓ 12 000 Ariary de frais de bouvier (frais fixe, peu importe le nombre de zébus) ;
- ✓ 8 400 Ariary de frais vétérinaires ;
- ✓ 5 500 Ariary de fumier produit.

En revanche, les porcs représentent une véritable activité lucrative. On considère que sur les 6 ans, le nombre de porcs ne varie pas, c'est-à-dire que l'agriculteur achète autant de porcelets qu'il vend de porcs par ans. Un porc représente par an :

- ✓ 32 500 Ariary de frais vétérinaires et d'alimentation en son de riz ;
- ✓ 60 000 Ariary à l'achat ;
- ✓ 166 000 Ariary à la vente ;
- ✓ 5 heures de travail par quinzaine (travail uniquement familial).

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 (Tableau 5). Ainsi, les activités culturales 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 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. Comme il est décrit dans la toposéquence (§ 1.1.2.3.1), 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. Dans le modèle, la description des surfaces cultivées se fait comme suit (Figure 9) :

Area (ares):	Owned	Shared	Off-Season					
			1	2	3	4	5	6
PWC	100	0						
PWCos	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
AS	50	0						
ASos	15	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Hill	50	0						

Figure 9: Exemple de description des différentes surfaces cultivées d'une exploitation agricole sous GANESH

Source : copie d'écran du modèle GANESH

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

ⁱ PWC=RMME ; AS=*baiboho* ; Hill=*tanety* ; os ou Off-season=contre-saison ; Owned=Propriété ; Shared=métayage

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.

3.3.2.3 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 construit.

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 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.

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 définis au § 3.3.2.4.

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.

CPA conventionnels

durée	S1	CS1	S2	CS2
		manioc		
riz				
riz sans contre-saison				
arachides				
haricot				
maïs				
pois de terre				
jachère de saison				
		jachère de contre saison		

S = saison

CS = contre-saison

CPA SCV

avec travail du sol la première année

S1	CS1	S2	CS2	S3	CS3
brachiaria					
niébé // riz // maïs + niébé					
	manioc + brachiaria (3 saisons) // brachiaria (2 saisons)				
	pois de terre + stylosanthes (2 saisons) // stylosanthes (2 saisons)				
	haricot + stylosanthes (2 saisons) // stylosanthes (2 saisons)				
	arachides + stylosanthes (2 saisons) // stylosanthes (2 saisons)				
	maïs + stylosanthes (2 saisons) // stylosanthes (2 saisons)				
	riz + stylosanthes (2 saisons) // stylosanthes (2 saisons)				
	manioc + stylosanthes				
maïs + niébé // niébé					
maïs + dolique // dolique					
maïs + vigna // vigna					

sans travail du sol (dès la 2ième implantation)

S1	CS1	S2	CS2	S3	CS3
brachiaria					
niébé // riz // maïs + niébé					
	pois de terre + stylosanthes (2 saisons) // stylosanthes (2 saisons)				
	haricot + stylosanthes (2 saisons) // stylosanthes (2 saisons)				
	arachides + stylosanthes (2 saisons) // stylosanthes (2 saisons)				
	maïs + stylosanthes (2 saisons) // stylosanthes (2 saisons)				
	riz + stylosanthes (2 saisons) // stylosanthes (2 saisons)				
	jachère (2 saisons) // pois de terre				
	jachère (2 saisons) // haricot				
	jachère (2 saisons) // niébé				
	jachère (2 saisons) // arachides				
brachiaria					
stylosanthes					
maïs + niébé // niébé					
maïs + dolique // dolique					
maïs + vigna // vigna					
riz					
riz sans contre-saison					

Figure 10: 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 10). 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 (16 produits valorisables - Tableau 7).

Tableau 7: Valorisation des produits de culture

Produits valorisables à la vente (en Ariary/kg)	
Haricot	1 050
Maïs	400
Riz blanc	800
Pois de terre	280
Arachides	330
Niébé	700
Dolique	1100
Vigna	900
Manioc	200
Produits l'alimentation animale	
Son de riz	Alimentation des porcs
Résidus de dolique et vigna	Fourrage
Stylosanthes	
Brachiaria	
Résidus de niébé	
Canne de maïs	
Paille de riz	

Source : Olympe, 2007

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 ;

¹ En ne prenant en compte que les CPA d'une durée de 1 ou 2 saisons, on obtient 17^6 enchaînements possibles, soit 24 137 569 possibilités.

Tableau 8: 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 répétées 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 dédoubler 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

- ✓ 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.
- ✓ 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.

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 8). 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).

3.3.2.4 Itinéraires techniques sur RMME et baiboho

Comme il l'a été mentionné plus haut, l'optimisation de l'assolement ne se fait que sur *tanety*. Sur RMME et *baiboho*, les itinéraires techniques sont fixés ; les charges et revenus dégagés par ces sols ne dépendent donc que des surfaces cultivées. Ces itinéraires techniques présentent les mêmes caractéristiques que ceux des successions culturales ; les données proviennent des informations de l'itinéraire technique de la première année répété sur les 6 ans.

Sur RMME, de la riziculture irriguée est pratiquée en saison et de la culture de haricot en contre-saison (ITK std BRL). Sur *baiboho*, de la riziculture pluviale est pratiquée en saison et du maraîchage en contre-saison. Les cultures maraîchères sont une combinaison fixée de différentes cultures, issue d'une moyenne faite sur les agriculteurs de type « D ». Ainsi, pour une surface donnée de culture maraîchère, on aura toujours :

- ✓ 31% cultivés en maïs ;
- ✓ 26% cultivés en haricot ;
- ✓ 43% cultivés en autres cultures (*carotte 21%, pomme de terre 10%, tabac 6%, brèdes 3%, patate douce 3%*). Dans notre modèle ces 43% représentent uniquement un revenu et non des productions de l'exploitation.

Toutes ces données stockées dans Excel (caractéristiques de la structure d'exploitation, liste des successions culturales et itinéraires techniques sur RMME et *baiboho*) sont ensuite importées dans le logiciel GAMS pour être soumises à différentes contraintes et aux objectifs de l'agriculteur.

Tableau 9: 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

3.3.2.5 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 10).

Tableau 10: 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 9). 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 importante. 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 11).

Tableau 11: Liste des variables du modèle

VARIABLE	Type de variable	Unité	Sets
Solde ⁱ de l'exploitation	continue	Ariary/6 ans	
Marge brute ⁱⁱ <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.

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.

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).

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

Contrainte de consommation

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

$$\text{Par année, par produit consommé : } \text{Production}(\text{produit, année}) + \text{Quantité achetée}(\text{produit, année}) \geq \text{Consommation} \times \text{Bouches à nourrir}$$

Contrainte d'alimentation animale

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

$$\text{Par année : } \text{Production}(\text{son de riz, année}) \geq \text{Cheptel}(\text{porc}) \times \text{Ration}(\text{porc})$$

Contrainte de production

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

$$\text{Par année, pour un produit : } \text{Production}(\text{produit, année}) \geq \text{Production minimale}(\text{produit})$$

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 :

$$\frac{\text{Surface de succession en SCV}}{\text{Surface cultivée}(\text{tanety})} \leq \text{Ratio de SCV}(\text{année})$$

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 :

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

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 :

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

Dans les contraintes et objectifs explicités, on ne retrouve pas toutes les variables et tous les paramètres énoncés (Tableau 9, Tableau 11). En effet, pour ne pas surcharger les formules mathématiques présentées, certains paramètres et variable sont implicites et n'apparaissent pas. Nous n'allons pas donner le détail de toutes les contraintes mais seulement l'illustrer avec un exemple.

La contrainte de seuil de survie est la suivante :

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

Si l'on développe une partie de l'inéquation, on a :

$$\text{Marge brute } \textit{tanety}(\text{année}) =$$

$+\sum[\text{rendement de succession}(\text{année, saison, produit})$ $*\text{Prix de vente}(\text{produit})*\text{surface de succession}(\text{succession, propriété})]$	①
$+\sum[\text{rendement de succession}(\text{année, saison, produit})$ $*\text{Prix de vente}(\text{produit})*\text{surface de succession}(\text{succession, métayage})*0,5]$	
$-\sum[\text{intrant de succession}(\text{année, saison, intrant})$ $*\text{surface de succession}(\text{succession, acquisition})]$	②
$-\sum[\text{rendement de succession}(\text{année, saison, riz conventionnel})$ $*\text{Prix de vente}(\text{produit})*\text{surface de succession}(\text{succession, propriété})$ $*\text{Aléas}(\text{année})]$	③
$-\sum[\text{rendement de succession}(\text{année, saison, riz conventionnel})$ $*\text{Prix de vente}(\text{produit})*\text{surface de succession}(\text{succession, métayage})*0,5$ $*\text{Aléas}(\text{année})]$	
$-\sum[\text{Travail extérieur}(\text{année, saison, quinzaine, } \textit{tanety})$ $*\text{Main d'œuvre extérieur}(\text{quinzaine})]$	④

- 1- **Produit sur *tanety***
- 2- **Intrants apportés (charge opérationnelle)**
- 3- **Perte de produits du à l'aléa climatique**
- 4- **Main d'œuvre extérieure (charge opérationnelle)**

3.4 Validation du modèle

Une fois le modèle construit, il est important de le valider ; c'est-à-dire d'en vérifier la pertinence. Nous rappelons que le modèle construit est un modèle empirique prenant en compte un grand nombre de paramètres. De plus, l'objectif n'est pas de quantifier précisément les sorties du modèle mais d'en observer l'évolution ou encore les grandes tendances sous l'effet de différents scénarios. Ainsi, une validation du modèle par méthode statistique serait lourde, trop précise et donc inappropriée à l'utilisation que l'on souhaite en avoir. 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.

Etant donné le niveau de précision du modèle, nous n'attendons pas une égalité stricte entre les sorties du modèles et les données réelles. Les résultats peuvent être considérés comme similaires si les résultats du modèle sont compris dans un intervalle de plus ou moins 5% autour des résultats réels.

Pour valider le modèle, on décide de prendre les données de l'agriculteur noté M1101 dans la nomenclature de Méduline Terrier (2008) car, parmi les agriculteurs de type « D », les données de cette exploitation sont les mieux renseignés sous le logiciel Olympe (Figure 11).

<u>surfaces (ares):</u>		Propriété	Métayage	<i>contre-saison</i>						<u>Composition familiale:</u>	
				1	2	3	4	5	6		
RMME	30	200								Membres > 60 ans	0
RMME contre-saison	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Hommes > 15 ans	1
<i>Baiboho</i>	0	0								Femmes > 15 ans	1
<i>Baiboho</i> contre-saison	2	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Total d'enfants < 15 ans	3
<i>tanety</i>	40	0								Enfants scolarisés	3
<u>Cheptel (têtes):</u>										Bouches à nourrir	5
Zebu	3									Force de travail familiale	1.8 UTH
Swine	0										
<u>Production forcée (kg):</u>										<u>Consommation annuelle (kg/pers.):</u>	
Pois de terre	114									Riz blanc	560
manioc	1200									Maïs	0
										Arachides/Pois de terre	28
										Haricot/Niébé	6.8
										Manioc	200

Figure 11: Caractéristiques de l'exploitation de l'agriculteur M1101

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

3.5 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 :
 - Marge brute dégagé par chaque type de surface ;
 - Charges opérationnelles pour chaque type de surface (intrants et travail extérieur) ;
 - Marge brute dégagée par l'élevage ;
 - Revenus off-farm ;
 - Dépenses familiales (autoconsommation) ;
 - Solde de l'exploitation sur 6 ans
- ✓ Des sorties de production :
 - Successions culturales et leur surface respective ;
 - Production annuelle ;
 - Ratio de surface de *tanety* en SCV ;
 - Achat de produits par année.
- ✓ Des sorties de main d'œuvre :
 - Travail familial sur 6 ans ;
 - Travail familial par quinzaine ;
 - Travail extérieur par quinzaine.

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.

3.5.1 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 ». D'après les données Olympe et les enquêtes de Méduline Terrier (2008), une exploitation de type « D » moyenne présente les caractéristiques décrites en Figure 12.

En générale, les agriculteurs préfèrent produire sur l'exploitation leur consommation annuelle. Ils orientent donc leurs activités culturelles 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.

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

Figure 12: Caractéristiques d'une exploitation « standard »

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

3.5.2 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 12), 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 (§ 3.3.2.3.), le ratio de surface SCV sur la surface totale ne peut que rester constant ou augmenter au cours des années.

3.5.3 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 (§ 3.3.2.5.), 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.

3.5.4 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 (Figure 10), 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.

4 Résultats & Analyse

4.1 Validation du modèle

On rappelle que pour valider le modèle, on utilise les données d'une exploitation réelle, ici celle de l'agriculteur M1101, dont les données sont stockées sous Olympe. Avant d'entrer dans une comparaison détaillée des résultats du modèle aux données réelles, on constate deux grandes différences :

- ✓ La production de riz de l'exploitation modélisée est quasiment deux fois moins importante que la production de riz réelle (2 500 kilos produits par le modèle pour 4 550 produits par l'exploitant M1101) ;
- ✓ Le coût des intrants utilisés dans le modèle est 7 fois plus important que dans la réalité (700 kArⁱ contre 111 kAr).

Ces différences ne sont pas négligeables. Il faut donc en comprendre les raisons pour pouvoir corriger et ajuster le modèle. Lorsque l'on s'intéresse au niveau d'intensification des itinéraires techniques utilisés par l'agriculteur, on constate qu'aucun engrais n'est utilisé, quelque soit la culture, ce qui peut expliquer la différence de coût d'intrants utilisés. On décide donc de supprimer l'apport d'engrais dans notre modèle pour coller au mieux à la réalité. De plus, le rendement en riz sur *baiboho* est nettement supérieur au rendement de l'ITK std proposé par le modèle. On aligne alors le rendement du modèle à celui de la réalité. Même s'il peut sembler étrange que les rendements soient supérieurs avec un apport azoté quasiment nul, le but n'est pas de juger les données d'enquête, mais de valider la structure de notre modèle. On obtient alors des nouvelles sorties de modèle.

Le premier tableau compare les sorties économiques du modèle à celles d'Olympe (Tableau 12). Le modèle s'étalant sur 6 ans, nous prenons la moyenne des années 2 à 6. En effet, l'année 1 est particulière car la production de manioc n'y est pas possibleⁱⁱ.

Tableau 12: Comparaisons des sorties économiques de GANESH et OLYMPE pour un même agriculteur (en kAr)

	GANESH	Ecart-type	OLYMPE	Intervalle de validité (+/- 5%)
Produit	4 007	<0.01	4 178]3 969 ; 4 387[
Charges opérationnelles (intrants+W extérieur)	848	<0.01	855]812 ; 898[
Intrants	239	<0.01	111]105 ; 117[
Travail extérieur	609	<0.01	736]699 ; 773[
Marge brute (Produit – charges opérationnelles)	3 159	<0.01	3 323]3 157 ; 3 489[
Consommation	2 522	<0.01	2 526]2 400 ; 2 652[
Solde d'exploitation (Marge brute – Consommation)	637	<0.01	633]601 ; 665[

Source : Données Olympe et GANESH

Aux vues des résultats, on peut considérer que les sorties de GANESH sont identiques à celles d'Olympe. En effet, toutes les données économiques du modèle entrent dans l'intervalle de validité, excepté le coût des intrants qui reste supérieur dans le modèle. Ce la peut-être du au fait que les agriculteurs utilisent parfois des semences autoproduites, ce qui

ⁱ kAr = kilo Ariary, soit 1 000 Ariary.

ⁱⁱ Les CPA avec manioc débutent en contre-saison et les premières récoltes se font à la saison de l'année suivante.

diminue le coût des intrants. Malgré cela, on peut valider le modèle car d'autres données viennent renforcer ces similitudes. En effet, les productions de riz sont identiques (4 550 kilos pour GANESH et Olympe) et les assolements sur *tanety* sont similaires sur une année (20 ares de pois de terre conventionnel et 20 ares de manioc dans les deux cas). Ainsi, si l'on reprend les hypothèses de validité (§ 3.4.), on peut affirmer 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...).

En effet, 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. De plus, comme on vient de le voir plus haut, il est possible d'intégrer des itinéraires techniques supplémentaires dans le modèle.

4.2 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 13):

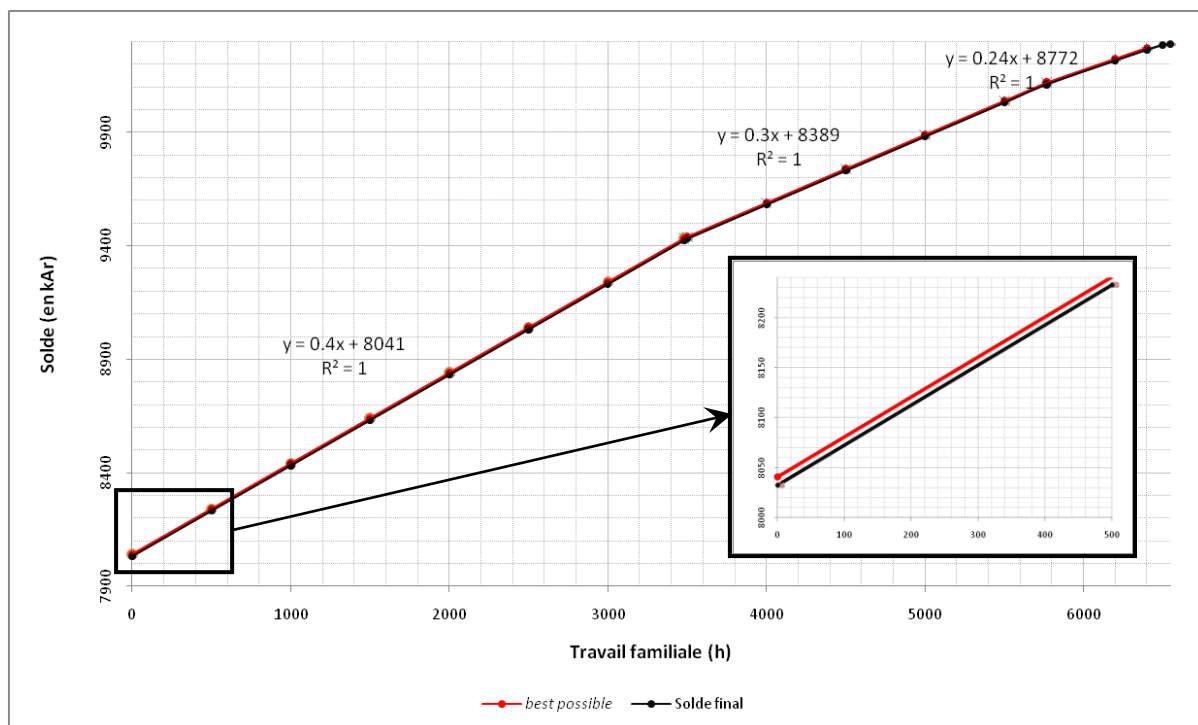


Figure 13: Evolution du solde d'exploitation en fonction de la main d'œuvre familiale disponible

Source : traitement Excel des sorties de GANESH

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 3480 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 culturales...) entre chacun.

Tableau 13: Choix des successions culturales de 6 200 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)	h de travail familial													
6200	6400	6500	6548														
1				31	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	
3				9	9	9	9	9	riz conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	
4				9	9	9	9	9	haricot conv.	jachère	haricot conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	manioc conv.	haricot conv.	jachère
6				1	3	10	17	17	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 GANESH

Les successions culturales proposées par le modèle sont de deux types (Tableau 13). 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 13): 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 Figure 14 présente le travail total à fournir par quinzaine sur les 6 ans pour cette combinaison. La variation du

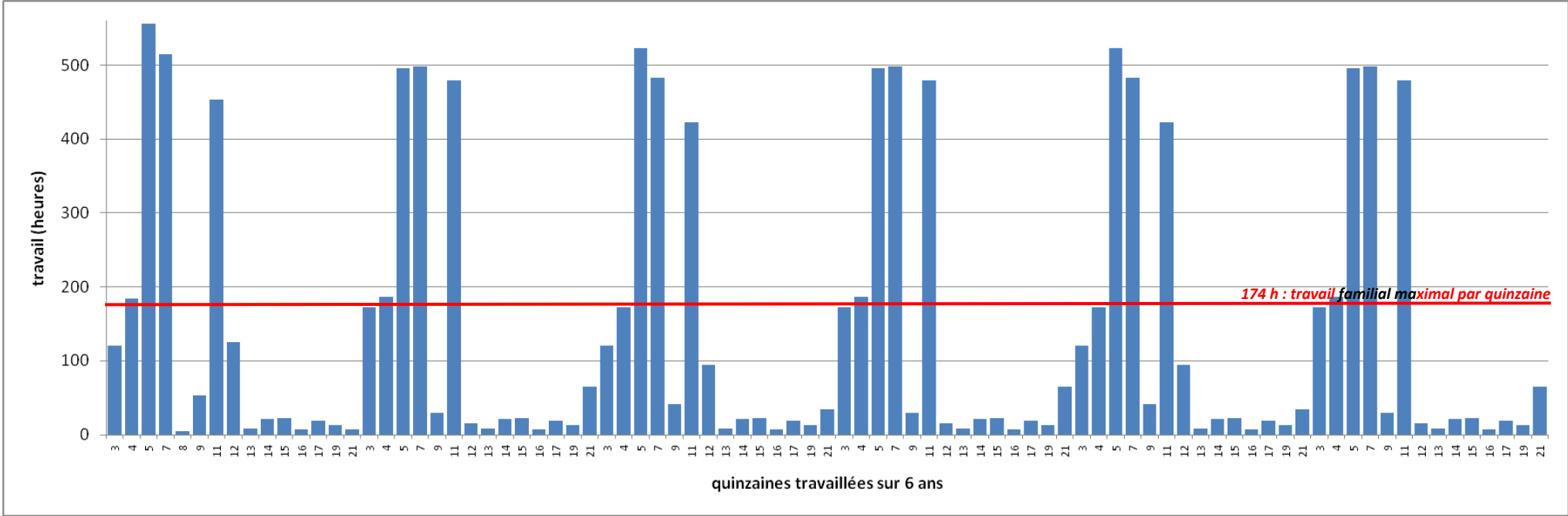


Figure 14: Evolution du travail total par quinzaine pour les combinaisons de successions culturelles de 0 à 6 200 heures de travail familial disponible

Source : traitement Excel des sorties du modèle GANESH

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 (Tableau 4), 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 au 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.

ⁱ Un ouvrier agricole travail 5 heures par jour.

4.3 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 14) : 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 (Figure 10) 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. 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 – Olympe 2007), les deux combinaisons dégagent 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 culturelle 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 culturelle 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 (Figure 15).

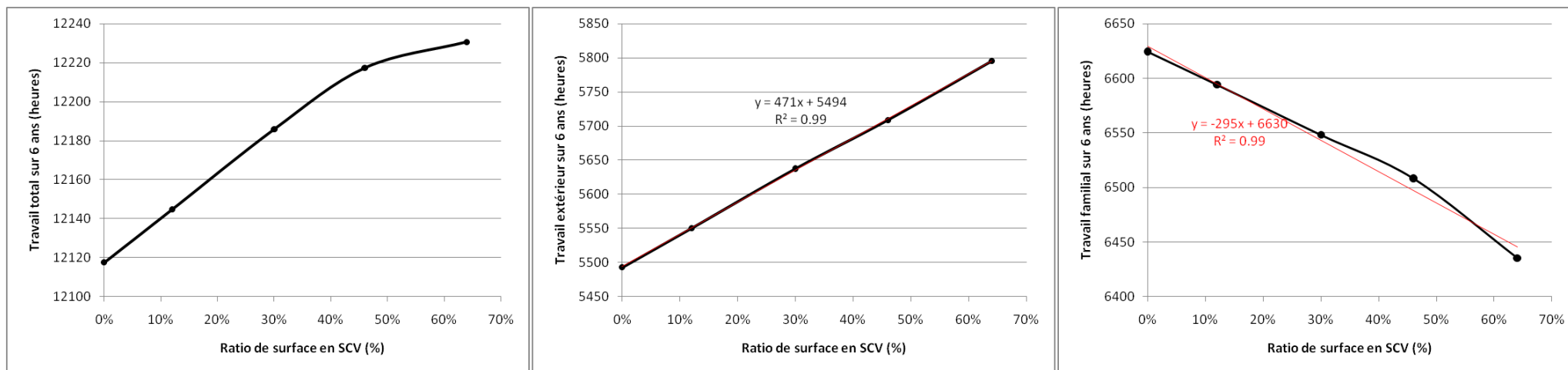


Figure 15: Evolution de la charge de travail (totale, extérieur et familiale) en fonction du pourcentage surfacique de SCV sur tanety

Source : traitement Excel des sorties du modèle GANESH

Tableau 14: 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.	

Tableau 14 – suite : Choix des successions culturales de 0 à 64% de surface de SCV sur 6 ans

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+stylo santhes	manioc+stylo santhes	manioc+stylo santhes	riz SCV	paille de riz	haricot+stylosanthes	stylosanthes	stylosanthes	stylosanthes	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

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 16). 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.

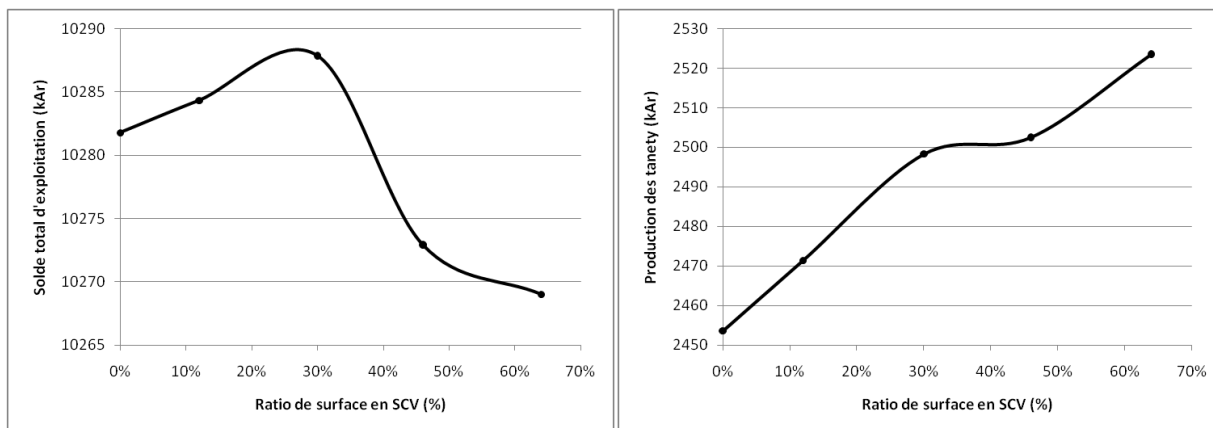


Figure 16: Evolution du solde d'exploitation et de la production sur *tanety* en fonction des surfaces en SCV sur 6 ans

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 16) 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.

Tableau 15: Combinaisons culturales les moins sensibles aux aléas climatiques de plusieurs intensités

		<i>Les zones en pointillés représentent les années touchées par les aléas climatiques</i>											<i>S=saison ; CS=contre-saison</i>	
	surface (en ares)	S1	CS1	S2	CS2	S3	CS3	S4	CS4	S5	CS5	S6	CS6	
pas d'aléa														
1	15	maïs+dolique sur labour	résidu dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidu dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidu 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 labour	résidu dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidu dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidu 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+stylo santhes	manioc+stylo santhes	manioc+stylo santhes	
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 labour	résidu dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidu dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidu 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 labour	résidu dolique	maïs+dolique SCV	résidu dolique	riz SCV	paille de riz	maïs+dolique SCV	résidu 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

4.1 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 15.

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 dégager 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 que décrite en § 4.3 : 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 15). On remarque aussi que la culture de maïs conventionnel dégager plus de revenu que la culture de riz conventionnel ayant subit 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%). Comme décrit au § 4.3, au-delà d'une certaine surface en SCV, il est plus rentable d'utiliser les successions culturales n°1 et n°11 (Tableau 15), 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 intérêt 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, comme expliqué au § 4.2, 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 décrites 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.

Tableau 16: 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

4.2 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 17) :

Tableau 17: 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

Dans les deux exploitations, on retrouve les deux types de successions culturales (Tableau 16) : 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.

5 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.

5.1 Amélioration du modèle

5.1.1 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 culturales répétées autant de fois qu'il y a de caractéristiques (intrants, rendements et temps de travaux) dans le tableur Excel. Or, plus il y a de contraintes, plus il y a 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.

5.1.2 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 de 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 culturales 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.

5.1.3 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 culturales 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 culturales 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.

5.1.3.1 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.

5.1.3.2 Des caractéristiques de culture variables

Les successions culturales générées sous VBA Excel sont construites selon des règles d'enchaînement (§ 3.3.2.3.) qui mettent bout à bout des CPA sur une période de 6 ans. Lors de cette mise en chaîne, chaque CPA est accompagné des 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 augment 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 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.

5.2 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 ?

Comme cela est expliqué au § 3.1.5, 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'absolue, les systèmes SCV diminuent la charge de travail et on a pu voir que dans certaines situation, 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 implanter 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 fourragés 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^{ième} 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^{ième} 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^{ième} 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.

Annexe : Les unités morpho-pédologiques de la région Alaotra

En 1984, Raunet établit une classification des unités morpho-pédologiques de l'Alaotra. Son étude met en évidence une répartition des unités depuis la périphérie vers le centre de la cuvette. On distingue alors différents types de sols selon leurs spécificités pédologiques et leurs régimes hydriques propres :

→ **Les sols ferrallitiques de *tanety*** : Dans les collines périphériques, on rencontre un éventail de sols allant de sols moyennement différenciés ferrallitiques à très différenciés lessivés. La fertilité et la stabilité dépend de la nature de la roche mère (essentiellement cristallines métamorphiques), on distingue :

- ✓ **les sols sur roches acides** (gneiss, granites et migmatites) : ils occupent la région Ouest de la cuvette. La rareté de la végétation au sommet de ces *tanety* explique un horizon organique O particulièrement mince. Dans le meilleur des cas, il atteint les 3 ou 4 cm, le plus souvent, l'érosion a totalement arraché cet horizon superficiel. Se développe alors en surface une couche de matériaux colmatée (sorte de cuirasse), de structure lamellaire qui constitue un véritable obstacle à la pénétration verticale de l'eau et au développement de systèmes racinaires. Cette « croûte », colonisée par endroit par des lichens, facilite la circulation latérale des eaux de pluies qui ruissellent le long des pentes, accélérant ainsi les processus d'érosion.

Pour le cas des sols moyennement différenciés, l'horizon inférieur, de structure grumeleuse, est un horizon d'altération S, plus précisément Sk, caractérisé par la présence de l'association Fer – Kaolinite. Cet horizon, de couleur rouge, est relativement riche en hématites (oxydes de fer Fe_2O_3) ce qui témoigne d'un régime hydrique très contrasté (alternance de forte humidité et de sécheresse accentuée).

Pour les sols très différenciés lessivés, les particules d'argiles et les hydroxydes (fer et aluminium) ont migré vers le bas du profil. Cette migration génère un horizon E appauvri en argiles au profit d'un horizon inférieur B enrichi en argiles. La présence d'ions monovalents (H^+ , Na^+) sur le complexe absorbant facilite la dispersion et donc la migration des particules, c'est le cas des milieux les plus acides. Par endroit, l'hydrolyse et la lixiviation des éléments est telle que l'on trouve, insérés dans les limons et les sables du l'horizon E, des quartzs (produits résiduels initialement contenus dans les roches et ayant résisté à la dissolution). L'horizon E peut prendre des couleurs variables : il est rosâtre si le milieu est bien drainé (reçoit beaucoup d'eau mais s'assèche vite), brun ou jaune si l'horizon est moyennement bien drainé.

Ces sols acides sont parmi les plus pauvres du lac, ils sont extrêmement fragiles d'un point de vue structural (l'érosion en *lavaka* y prédomine). Dans certaines zones particulièrement lessivées, ils atteignent le stade de podzolisation.

- ✓ **les sols sur roches basiques** (amphibolites, gabbros, gneiss à amphiboles) : ils se trouvent plutôt à l'Est et au Sud de la cuvette. L'érosion par ravinement est plus fréquente que celle en *lavaka*. Ces sols de couleur rouge sont plus argileux et globalement mieux structurés que ceux rencontrés à l'Ouest. Ils ne dépassent que très rarement le stade moyennement différencié. Leur pH neutre ou légèrement basique les rend plus fertiles que les sols acides très lessivés des *tanety* de l'Ouest.

Que l'on soit à l'Ouest ou à l'Est, il est fréquent de trouver au bas du profil (souvent au fond de micro cuvettes) des traces d'hydromorphisme au sein d'horizons particulièrement mal drainés (traces repérables à leur couleur grises tachetée de rouille).

→ **Les sols de bas de pente** : ils correspondent à la zone de piémont des *tanety*. Ces sols minéraux (majoritairement argilo sableux) sont composés de matériaux issus du fluage des altérites des collines alentours. Leur fertilité est faible du fait de leur pH acide (4,5 à 5), d'une capacité d'échange faible et d'une capacité de rétention d'eau voisine de 3%.

→ **Les sols de plaines** : commence ici une grande zone de rizières (beaucoup plus étendue à l'Ouest qu'à l'Est). Les sols se présentent de l'amont vers l'aval en :

- ✓ **sols hydromorphes minéraux** : ce sont des sols très argileux, contenant par endroit des strates de sable pur à faible profondeur (gênant pour la riziculture). Ils représentent cependant 25% de l'ensemble des rizières cultivées dans la région (soit environ 10% de la plaine). Leur pH se situe entre 5 et 6 et leur capacité de rétention d'eau dépasse les 10%. Malgré une faible porosité, ces sols présentent une structure correcte et sont donc globalement plus fertiles que les sols de bas de pente.
- ✓ **sols hydromorphes moyennement organiques** : plus en aval, se trouve des sols hydromorphes contenant 6 à 15% de matière organique. Ils offrent de meilleurs potentiels agronomiques que les sols hydromorphes minéraux mais la présence de strates sableuses y est plus fréquente. Ces sols concernent 7% de la superficie de la plaine et près de 20% des rizières.
- ✓ **sols hydromorphes à tourbe résiduelle** : situés dans le prolongement aval des sols précédemment décrits, ces sols présentent un horizon supérieur tourbeux contenant plus de 15% de matière organique. Ils sont le résultat de la récupération (par brûlage et drainage) d'anciennes tourbes flottantes pour la riziculture. Cette zone s'étend sur une vaste surface et représente 35% des rizières (soit 15% de la plaine).
- ✓ **zone de marécage** : il s'agit d'un marais à Cypéracées couvrant 50% de la cuvette. Dans cette zone, l'accumulation de débris issus de la végétation dense de papyrus a généré une épaisse tourbe flottante. Sur le premier mètre sous la surface, se trouve des débris brun-rougeâtre (racines et tiges vivantes et mortes). Sur les 100 cm inférieurs se concentrent des débris végétaux morts et fibreux. Cette tourbe mêlée à l'eau repose sur un substrat alluvial se décomposant en une couche supérieure organominérale grise et une couche inférieure plus claire, totalement minérale.
- ✓ Enfin, dans la partie centrale de la plaine se trouvent **les eaux libres du lac**. Celles-ci recouvrant moins de 15% de la surface totale de la plaine.

→ **Les sols alluviaux (baiboho)** : comme le précise Raunet, ce type de sols ne répond pas à une zonalité comme précédemment décrite mais recoupe transversalement et indifféremment les différentes unités de milieu. Les *baiboho* sont des cônes d'épandage d'alluvions fluviales. Ils coïncident avec l'exutoire aval des bassins versants et recueillent par conséquent les résidus de roches pourries évacués par les *lavaka*. Ces alluvions contiennent de minuscules particules brillantes de micas (résultats de la pourriture des roches). Ces sols ne sont pas homogènes d'un point de vue granulométriques et s'ordonnent dans l'espace selon le tri suivant : sableux en amont, ils deviennent progressivement à dominance limoneuse, puis argileuse en aval. Ainsi, si les propriétés chimiques sont

relativement comparables d'un *baiboho* à un autre, les caractéristiques physiques de ces sols riches permettent de les différencier et offrent une grande diversité :

- ✓ **Les *baiboho* à dominante sableuse** (de structure continue) se trouvent souvent dans les zones à proximité des cours d'eau (l'érosion des bassins versants charge les rivières en sables qui se déposent sur les terrains plats en aval). Les *baiboho* constitués d'un mélange de sables, limons et argiles (en proportion variables) présentent une structure fragmentaire à agrégats nettement anguleux. Ces agrégats peuvent être de tailles très variables (allant de quelques millimètres à plusieurs centimètres). Leur structure anguleuse laisse imaginer la présence d'argiles gonflantes.
- ✓ **Les *baiboho* les plus argileux** sont souvent les plus humides et sont riches en micas. Ils se rencontrent en général dans les zones les plus basses d'un point de vue topographique. En saison humide, ces sols forment des agrégats à faces lisses (structures verticales) très compacts. Dès que le sol s'assèche, des écailles séparées de profondes fissures (plus de 10 cm) apparaissent, il est alors possible de voir une structure en feuillets. Cette alternance entre structure extrêmement compacte et écailles de dessiccation témoigne de la présence d'argiles gonflantes (smectites et en particulier montmorillonites).
- ✓ **Les *baiboho* de fond des vallées**, situés dans les cuvettes entre deux *tanety*, se distinguent des précédents par leur richesse en matière organique (provenant des nombreux arbres fruitiers poussant dans ces zones). Cette matière organique est à l'origine de leur couleur nettement plus sombre que les autres *baiboho* : certains sont complètement noirs alors que les sols précédemment décrits sont de couleur rosâtre, (comparable la couleur de la poudre de cacao). Leur structure est de type arrondie grenue, c'est le résultat de la floculation et de la fissuration des argiles (mécanisme lié à la présence de matière organique et de cations bivalents Ca^{++} et Mg^{++} sur le complexe absorbant). Ces sols constituent des milieux particulièrement accueillants pour les racines : ils sont à la fois poreux, friables et stables (les agrégats résistent à la destruction par l'eau).

Quel que soit le type de *baiboho*, leur couleur et leur structure reste homogène le long du profil, il est quasiment impossible de distinguer des horizons. La seule variation repérable est liée à un gradient d'humidité : la surface étant logiquement plus sèche que le bas du profil proche de la nappe. Une microporosité développée permet à l'eau de remonter par capillarité. Leur pH neutre, ainsi que leur richesse en matière organique les rend chimiquement très fertiles. Leur principal inconvénient tient à l'apparition par endroit de couches purement sableuses, difficile à prévoir et à localiser. Situées entre la surface et la nappe (c'est-à-dire à moins de 2 m de profondeur), ces couches font barrière aux circulations d'eau par capillarité. Malgré cette difficulté, les *baiboho* restent les meilleurs sols de la région d'un point de vue physico-chimique et hydrique.