

THESE

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR de Montpellier SupAgro

**Systemes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosociences
et Environnement**

Filière : Ecosystèmes

Discipline : Agronomie

**Pratiques de gestion de la biomasse au sein des
exploitations familiales d'agriculture-élevage
des hauts plateaux de Madagascar :
conséquences sur la durabilité des systèmes**

Par Stéphanie Alvarez

Thèse dirigée par **François Bocquier** et co-encadrée par **Emmanuel Tillard**

Soutenance : le 17 décembre 2012

Composition du jury :

H. Archimède , Directeur de Recherches, URZ, INRA	Rapporteur
J.M. Paillat , Directeur de l'UR Recyclage & Risque, CIRAD	Rapporteur
A. Capillon , Professeur, Montpellier SupAgro	Examineur
E. Gonzalez-Garcia , Chargé de recherches, UMR SELMET, INRA	Examineur
D. Stilman , Chercheur, Centre Wallon de Recherches agronomiques	Examineur
F. Bocquier , Professeur, Montpellier SupAgro	Directeur de thèse

THESE

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR de Montpellier SupAgro

**Systemes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosiences
et Environnement**

Filière : Ecosystèmes

Discipline : Agronomie

**Pratiques de gestion de la biomasse au sein des
exploitations familiales d'agriculture-élevage
des hauts plateaux de Madagascar :
conséquences sur la durabilité des systèmes**

Par Stéphanie Alvarez

Thèse dirigée par **François Bocquier** et co-encadrée par **Emmanuel Tillard**

A mi querida familia...

Merci !!!

Ce travail de thèse a abouti grâce aux compétences, à l'aide, au soutien et à l'enthousiasme de nombreuses personnes que je tiens à remercier :

Le CIRAD-Persyst, pour avoir financé cette étude de thèse, ainsi que l'UMR SELMET pour m'avoir accueilli à la Réunion.

Mon équipe d'encadrement, François Bocquier, Emmanuel Tillard et Jonathan Vayssières, pour leur orientation, leurs nombreux conseils durant ces années de thèse et pour m'avoir permis de mener à bien cette étude.

Paulo, pour tout ce qu'il a apporté à cette thèse ! Pour ses conseils, sa rigueur, son soutien, et son implication ! Merci d'avoir toujours contribué au bon déroulement des missions à Madagascar et même de nous avoir aidés à prélever du sol malgache ! Muito obrigada, Paulo, por sua simpatia !!

Pablo et Mariana, pour avoir accepté de travailler avec nous et avoir été d'une aide essentielle pour cette étude ! Muchissimas gracias a ustedes por los días de trabajo en Madagascar, y por haber compartido con nosotros su experiencia y ciencia ! Pablo, le soy especialmente agradecida por su ayuda desde el principio y por el gran trabajo que ofreció durante la redacción de los artículos.

Les ciradiens et autres exilés sur les terres malgaches, Julie, Mathilde, Eric S., Jean-Marie, Eric D., Eric P. et Marianne, pour leur accueils chaleureux, leur initiation à Madagascar, leurs appuis logistiques, et leurs conseils de bons bouquins et de jolies guitares !

Jules, Rakoto, William et Rahelisoana !! « Misaotra betsaka », de m'avoir accueilli sur vos exploitations, d'avoir partagé avec moi votre savoir et votre repas, de m'avoir initié à l'*angady* magache, et de m'avoir offert des moments « gasy » inoubliables !

Mlle Constance, pour le travail d'enquête qu'elle a mené à Madagascar, les précieuses données qu'elle a fournies, pour son aide pendant les prélèvements de sol, et pour sa gentillesse !

Gisèle, pour son aide indispensable lors les préparations des missions (car le pôle se paralyse quand elle n'est pas là !), mais surtout pour son grand sourire chaque matin et pour avoir été un peu notre maman au Cirad !

Les thésards, VATs, stagiaires, et autres ciradiens (encore au Cirad ou déjà parti pour de nouvelles aventures) : JC, Aline, Benj, Gilles, Julie, Max, Marie, Gab, Seb moustique, Anna G. Alex T. et tant d'autres !!! Un merci tout particulier aux Vats du pôle élevage, Adolpho, Maeva et nos Matthieu, toujours si sympa et serviables ! Un grand merci à Nathalie, pour m'avoir supporté et encouragé pendant ses deux années de VAT et pour notre escapade au Japon !

Sév et Willy, pour leur gentillesse, leur hospitalité et pour la découverte du poe banane !!! Et le « duo » ne serait pas complet sans ... wait for it... Mr. Kenny ! Merci pour m'avoir accepté parmi vous au Liberty !

Pierre et Daphnée, et l'équipe des « gros » (c'est affectueux !), Jean-Mi, Manu, Nico, Jackypedia et le Chichi... pour tous ces midis passés ensemble, riches en culture générale (politique, vélo, foot, rugby,

histoire, « vrai couscous » et autres lobby) et en kcal de carry – flammekueche-magnum !!! C'était de vraies bonnes pauses !

Et tous ces gens qui me sont chers, restés en métropole, mais qui m'ont soutenu à de nombreuses occasions ! Fanny, Anthony, ma petite Léna, Chloé, Delphine, Amélie, Tomtom, Fred.M, Mylou, Aude, PG et autres Katas ! Et en particulier, un grand merci à Polakinou, pour m'aider à croire qu'un Kata peut y arriver !! Merci à Guy et Marie-Paule, une seconde famille, qui m'ont accompagné et aidé le long de ma scolarité ! Ça y est, normalement le cursus est bouclé !!

Julien et Jery, pour leur amitié pendant ces longues années de thèses !! Pour m'avoir supporté quotidiennement !! Les pauvres ! Mais aussi pour leurs encouragements, pour nos multiples discussions sur la vie, le monde, Madagascar, nos états d'âme ... et les BD !! Merci pour tous ces services que vous m'avez toujours rendu sans la moindre hésitation !

Fred, un très grand merci pour son soutien dans les moments difficiles, sa patience, son aide et ses encouragements au quotidien durant ces deux dernières années !!! Ya casi libre para mas viaje !!!

Mi querida familia, gracias por todo !! Sé que desde lejos siempre tuvieron un pensamiento para mi ! A mi mamita, que me enseñó tanto, le debo mucho de este trabajo y la fuerza de haber llegado al fin ! Gracias por su presencia y ayuda cada día, a pesar de la distancia !

Table des matières

Chapitre 1 : Introduction générale

1	Dégradation de la fertilité des sols en Afrique.....	2
1.1	Concept de fertilité du sol.....	2
1.2	Éléments nutritifs du sol et appauvrissement des sols africains	3
1.3	Carbone organique du sol et évolutions	5
2	Exploitations familiales d'agriculture-élevage en Afrique et place de l'animal dans le cycle des éléments nutritifs	6
3	Pratiques de gestion de la biomasse aux seins des exploitations familiales mixtes d'agriculture-élevage	9
3.1	Pratiques de gestion des effluents d'élevages et impacts sur les pertes d'azote.....	9
3.2	Pratiques de gestion des parcelles ou gestion des apports de biomasses au sol et impacts sur la fertilité des sols.....	13
4	Durabilité.....	17
4.1	Concept de durabilité.....	17
4.2	Indicateurs de durabilité	18
5	Contexte de l'étude.....	20
5.1	Croissance démographique et sécurité alimentaire à Madagascar.....	20
5.2	Contexte géographique des hauts plateaux malgaches.....	21
5.3	Agriculture familiale agriculture-élevage des Hautes Terres Centrales : riz et élevage bovin	22
6	Objectifs de la thèse.....	24
6.1	Thèse, questions de recherche et hypothèses :.....	24
6.2	Méthodologie générale et plan de la thèse	25

Chapitre 2 : Caractérisation des pratiques des systèmes d'agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar

1	Introduction.....	28
2	Matériel et méthodes.....	28
2.1	Sélections des exploitations et immersion.....	28
2.2	Vérification de la représentativité des exploitations	31
3	Résultats et discussion	35
3.1	Typologie pour le Vakinankaratra et vérification de la représentativité des exploitations..	35
3.2	La structure des exploitations d'agriculture-élevage sélectionnées.....	42
3.3	Les pratiques	50
3.4	Conséquences des pratiques sur la gestion de la main d'œuvre et gestion économique....	59
4	Conclusion	68

Chapitre 3 : Variabilité de la fertilité des sols inhérente et induite par les pratiques pour les exploitations d’agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar

1	Introduction.....	74
2	Materials and methods	75
2.1	The study area	75
2.2	Site selection and soil sampling	76
2.3	Soil analysis.....	77
2.4	Categorising variables and factor levels.....	78
2.5	Statistical analysis.....	78
3	Results	79
3.1	Soil diversity and variability at regional scale	79
3.2	Soil variability across the landscape.....	81
3.3	Human-induced soil heterogeneity.....	85
3.4	Modelling of soil variability across scales.....	89
4	Discussion.....	90
5	Conclusions.....	92
	References.....	94

Chapitre 4 : Recyclage de l’azote et intensification des exploitations d’agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar : une application du Network Analysis

1	Introduction.....	101
2	Material and methods.....	102
2.1	Farming systems.....	102
2.2	Integrated Analysis.....	102
2.3	Data collection and N flow calculation.....	104
2.4	Scenarios	106
3	Results	106
3.1	System characterisation and major biomass flows.....	106
3.2	Nitrogen imports, N balances and N use efficiency	109
3.3	Network size, integration, diversity and organisation	110
3.4	System productivity and economic performance	110
3.5	Scenario exploration	111
3.6	Sensitivity analysis.....	114
4	Discussion	117
4.1	N balances as indicators	117
4.2	Network analysis indicators	118
4.3	Impacts of scenarios.....	118

Conclusion	120
References.....	121

Chapitre 5 : Discussion générale

1 Relations entre les pratiques de gestion de la biomasse et la durabilité des exploitations familiales d'agriculture-élevage	127
1.1 Diversité des exploitations d'agriculture-élevage et pratiques de gestion de la biomasse	127
1.2 Pratiques de gestion de la biomasse et durabilité environnementale des exploitations familiales d'agriculture-élevage	128
1.3 Pratiques de gestion de la biomasse et durabilité socio-économique des exploitations familiales d'agriculture-élevage	132
2 Limites méthodologiques	133
2.1 Hypothèses et simplifications	133
2.2 Vulnérabilité des exploitations les plus pauvres, instabilité extérieure et aversion aux risques	135
3 Perspectives.....	137
3.1 Perspectives d'utilisation de l'outil	137
3.2 Perspectives d'amélioration de l'outil.....	138
3.3 Autres développements ultérieurs.....	141

Références bibliographiques

Références.....	142
-----------------	-----

Annexes

Annexes Chapitre 1	158
Annexes Chapitre 2	167
Annexes Chapitre 4	213

Table des illustrations

Chapitre 1

Figure 1 : Relations entre dix propriétés physiques et chimiques du sol (adapté de Gobat et al., 2010)	3
Figure 2 : Niveau de stress azoté au niveau mondial pour les surfaces cultivées. Le niveau de stress donné correspond à une moyenne nationale. (adapté de Liu et al., 2010).....	4
Figure 3 : Distribution du carbone organique du sol (horizon 0-30 cm) en l’Afrique (adapté de Henry et al., 2009).....	6
Figure 4 : Représentation schématique des transferts des éléments nutritifs et des pertes dans une exploitation mixte d’agriculture-élevage.	7
Figure 5 : Etapes du transfert de l’azote au sein d’une exploitation d’agriculture-élevage (d’après Rufino et al., 2006). 1 : La production d’effluents d’élevage. Une fraction de l’azote alimentaire consommée par l’animal est excrétée dans les fèces et urines. Ces effluents peuvent rester dans le parc (flux a) et/ou sur les parcours (flux b) selon le mode de gestion des animaux. 2 : La collecte et la gestion des effluents. Les effluents sont recueillis (flux c) puis appliqués directement sur les terres cultivées (flux d) ou stockés (flux e) 3 : Stockage des effluents ; des résidus de culture peuvent leur être ajoutés (flux f) pendant le stockage. 4 : La minéralisation de l’azote dans le sol, son absorption par la plante et sa conversion en biomasse végétale. Les effluents sont épandus sur les terres cultivées (flux g) ; les plantes absorbent la fraction minéralisée de l’azote rendue disponible (flux h). L’azote assimilé par la plante est reparti dans les grains et dans les parties végétatives (flux i). Les fourrages ou résidus des cultures (non valorisés par l’homme) peuvent être utilisés pour l’alimentation des animaux (flux j).....	8
Figure 6 : Cycle de l’azote dans les systèmes agricoles (d’après McKague et al., 2005).....	11
Figure 7 : Facteurs agissant sur la volatilisation de l’azote (NH ₃) après application des effluents d’élevage sur les parcelles (d’après Sommer et Hutchings, 2001)	12
Figure 8 : Carte des Hautes Terres Centrales de Madagascar et de la région du Vakinankaratra.....	21
Figure 9 : Données climatiques (précipitations et températures moyennes) de la région du Vakinankaratra (moyennes des données climatiques collectées entre 2008 et 2010 par la station météorologique du Cirad-Scrid – Fofifa)	22
Figure 10 : Organisation du paysage agricole (toposéquence) de la région des hauts plateaux de Madagascar	23
Figure 11 : Structure générale de la démarche méthodologique de cette étude	26

Chapitre 2

Figure 1 : Plans factoriels 1-2 et 1-3 de l'ACM ; seules les modalités ayant des contributions deux fois supérieures à la moyenne théorique des contributions sont représentées ; les modalités de couleur rouge sont explicatives de l'axe horizontal, Axe 1 ; celles en bleu sont des modalités explicatives des axes verticaux (Axe 2 ou Axe 3) ; celles en violets contribuent à l'explication de l'Axe 1 et de l'axe vertical.....	36
Figure 2 : Dendrogramme obtenu à partir de la Classification Ascendante Hiérarchique, permettant une classification des 50 exploitations d'agriculture-élevage retenues pour l'analyse typologique ; chaque numéro représente une exploitation d'agriculture-élevage, chaque couleur représente un groupe distinct. Les quatre exploitations choisies pour l'immersion sont numérotées de 1 à 4.	37
Figure 3 : Représentation des cinq types d'exploitations d'agriculture-élevage issus l'ACM dans les plans factoriels définis par les trois premières composantes principales. Les points rouges indiquent l'emplacement dans l'ACM quatre exploitations sélectionnées pour notre étude.....	38
Figure 4 : Carte des sols (A) et transept (B) de la zone d'étude adaptés de la carte des sols de Madagascar (Riquier 1968) avec le système de classification français (CPCS, 1967) et le classement correspondant à FAO-Unesco entre parenthèses.....	43
Figure 5 : Evolution de l'Exploitation 1 depuis l'installation de l'agriculteur, en 1987, jusqu'en 2009 et les principaux objectifs actuels de l'exploitant. L'importance relative des activités agricoles (en jour-homme) a été déterminée sur la base des données obtenues pour 2009 lors de l'immersion.	46
Figure 6 : Evolution de l'Exploitation 2 depuis l'installation de l'agriculteur, en 1985, jusqu'en 2009 et les principaux objectifs actuels de l'exploitant; L'importance relative des activités agricole (en jour-homme) a été déterminée sur la base des données obtenues pour 2009 lors de l'immersion.....	47
Figure 7 : Evolution de l'Exploitation 3 depuis l'installation de l'agriculteur, en 1985, jusqu'en 2009 et les principaux objectifs actuels de l'exploitant. L'importance relative des activités agricole (en jour-homme) a été déterminée sur la base des données obtenues pour 2009 lors de l'immersion.	48
Figure 8 : Evolution de l'Exploitation 4 depuis l'installation de l'agriculteur, en 1997, jusqu'en 2009 et les principaux objectifs actuels de l'exploitant. L'importance relative des activités agricole (en jour-homme) a été déterminée sur la base des données obtenues pour 2009 lors de l'immersion.	49
Figure 9 : Bilan des pratiques de gestion de la biomasse ; principaux flux de biomasses quantifiée pour les quatre exploitations d'agriculture-élevage.....	52
Figure 10 : Calendrier des cultures sur tanety et sur bas-fond ; exemple de l'Exploitation 3	57
Figure 11 : Calendrier des principales cultures sur tanety et sur bas-fond ; exemple de l'Exploitation 4	58
Figure 12 : Distribution de la charge annuelle de travail pour les quatre exploitations d'agriculture-élevage	60
Figure 13 : Charge de travail cumulée au cours d'une année pour les quatre exploitations d'agriculture-élevage	61
Figure 14 : Importance relative des activités dans chaque exploitation en fonction de la part du temps de travail global de l'exploitation pour les quatre exploitations d'agriculture-élevage étudiées.....	63
Figure 15 : Importance relative des différentes sources de recette agricole les quatre exploitations d'agriculture-élevage étudiées.....	64

Chapitre 3

- Figure 1: Soils map (A) and transect (B) of the study area adapted from the Soil Map of Madagascar from Riquier, 1968 with the French Classification system (CPCS, 1967) and the corresponding FAO-Unesco classification in parenthesis..... 75
- Figure 2 : Landscape transects and land uses for a smallholder farm in the highlands of Madagascar. 76
- Figure 3: Relationship between (A) Soil Organic Carbon (SOC), (B) Total Soil Nitrogen (TSN), (C) Extractable Phosphorus and (D) the soil pH, and the amount of Clay and Silt (< 20 μm) for the four study sites (Andranomanelatra, Ambohimiarivo, Manandona and Antsoaso) in the highlands of Madagascar (n=487). The hashed lines in (A) correspond to upper and lower boundaries of an 'envelope' barely delineated to describe the relationship between Clay and Silt and SOC. 81
- Figure 4: Relationship between (A) Extractable Phosphorus and the content of Soil Organic Carbon (SOC), and (B) Clay and Silt (< 20 μm) content, (C) SOC, (D) Extractable Phosphorus and (E) soil pH for the four study sites (Ambohimiarivo, Andranomanelatra, Antsoaso and Manandona) in the highlands of Madagascar according their landscape (Tanety uplands, Lowlands and foothills, and, Baiboho alluvial). 83
- Figure 5: Relationship between the content of Soil Organic Carbon (SOC) and years since vegetation clearance for (A) Rained cropping fields, uncultivated Bozaka and, (B) Fodder fields with a high level of organic fertilization (200-300 kg of manure 100m⁻² year⁻¹), both on Tanety uplands and with Conventional ox-plough tillage. The dotted curve on (A) define the evolution of SOC content with time since conversion as predicted with an asymptotic regression model by Vågen et al, for dryland crop on slash-and-burned fields in the highlands of Madagascar (Vågen et al, 2006a). The dotted line on (B) illustrate the trend for the SOC content for the perennial fodder fields (n = 52, P < 0.001, SE = 0.13 and r² = 0.59). 84
- Figure 6 : Maps of the spatial distribution of tree soil fertility indicators – Soil Organic Carbon (A, D, G, J), Extractable P (B, E, H, K) and pH (C, F, I, L) -- for the sampled fields in the for study sites (Andranomanelatra, Antsoaso, Manandona and Ambohimiarivo) in the highlands of Madagascar. Source of background are respectively GeoEye satellite image, 13/11/2009, Google Earth 2010; DigitalGlobe satellite image, 24/06/2006, Google Earth 2010; GeoEye satellite image, 26/06/2009, Google Earth 2010 and, GeoEye satellite image, 13/11/2009, Google Earth 2010. 85
- Figure 7: Variability at scale fields for Soil Organic Carbon (SOC) content in the four study sites according the landscapes (Tan : Tanety upland, Tf: Terraced Foothills, Fl: Flooded Lowlands and Ba: Baiboho alluvial). Lines represent the fields and each point is an soil sample. 88
- Figure 8: Example of within-field variability for two contiguous fields in the Tanety uplands of Andranomanelatra, indicating the content of Soil Organic Carbon (SOC) for each sampling points within the two fields..... 88

Chapitre 4

Figure 1: Nitrogen balances and losses related to whole farm or cropped area (A), and to livestock (B) observed in the four crop-livestock farms of the Malagasy highlands. 109

Figure 2: Relative changes to baseline of scenarios on productivity, food self-sufficiency, N balance and N losses, and network analysis indicators for the four crop-livestock farms of the Malagasy highlands. The four scenarios were: (+concentrate) increase N inputs as supplementary feeds; (+mineral fertilizer) increase N inputs as mineral fertilizer; (+manure management) improve N conservation during manure storage and manure soil application; and (+{concentrate, manure management}) both improve manure management and increase feed supplementation. Indicator value observed in baseline was the reference value (i.e. baseline = 1) in the four radial diagrams.. 112

Figure 3: Impacts of scenarios on the farm N efficiency, the N network size (TST), the amount of N recycled (TSTc), the agricultural gross margin and its response to incremental N within total system throughflow (TST), and the capacity of soil N stock for the four case studies of Madagascar and according the four scenarios..... 113

Chapitre 5

Figure 1 : Bilans azotés du sol par types de cultures (riz, cultures de contre-saison, cultures sur *tanety*, cultures fourragères sur *tanety*) pour les quatre exploitations d'agriculture-élevage étudiées (Expl. : Exploitation) 131

Figure 2 : Modèle conceptuel du fonctionnement des exploitations d'agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar 140

Tables des tableaux

Chapitre 1

Tableau 1 : Bilans partiels et bilans complets d'azote calculés dans les exploitations familiales de divers pays d'Afrique.....	5
Tableau 2 : Pratiques agricoles ayant des effets positifs sur le stock de carbone organique du sol	16
Tableau 3 : Principes, critères et indicateurs pour l'évaluation de la durabilité des exploitations d'agriculture - élevage des hauts plateaux de Madagascar (adapté de López-Ridaura, 2005)	19
Tableau 4 : Fiche synthétique des principales caractéristiques de Madagascar (Sources : FAO, 2012 et World Bank, 2012).....	20

Chapitre 2

Tableau 1 : Principales caractéristiques des quatre exploitations d'agriculture-élevage sélectionnées sur les hauts plateaux de Madagascar	29
Tableau 2 : Structure générale du questionnaire utilisé lors des enquêtes par immersion	31
Tableau 3 : Descriptifs des variables et modalités retenues pour l'analyse typologique et distributions des exploitations	33
Tableau 4 : Modalités significativement ($p < 0.05$) présentes ou absentes dans chaque type d'exploitation d'agriculture-élevage	40
Tableau 5 : Structure des quatre exploitations d'agriculture-élevage sélectionnées.....	44
Tableau 6 : Surfaces, fertilisation organique, rendements et productions commercialisées pour les principales cultures des quatre exploitations d'agriculture-élevage.....	53
Tableau 7 : Pratiques de gestion de l'élevage bovin laitier pour les quatre exploitations d'agriculture-élevage	55
Tableau 8 : Charges de travail pour les cultures et l'élevage.....	62
Tableau 9 : Ensemble des bilans par activités et autres sources de dépenses ou revenus pour l'obtention du bilan global et de l'efficacité économique globale de l'exploitation pour les quatre exploitations d'agriculture-élevage.....	67

Chapitre 3

Table 1: Performance parameters of the soils properties predictions by MIRS and NIRS technologies	78
Table 2: Correlation (Pearson correlation coefficients) matrix of multivariate soil samples ($n = 487$, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$)	79
Table 3: Average soil fertility indicators (Mean \pm SEM) for the 0-20 cm soil layer across four sites in the Vakinankaratra region, Madagascar highlands ($n = 487$). Averages were calculated per site and per	

classes of major soil types, landscape units, land use types, soil-crop management practices and manure fertilisation intensity. Means were compared with one-way analysis and Tukey multiple comparisons test.	82
Table 4: Average range of within-field variability of soil fertility indicators (minimum, maximum and mean values of the range) averaged over all fields at each location.....	87
Table 5: Coefficient estimates, standard errors and predicted content of Soil Organic Carbon (SOC) from an ordinal least squares regression model including field as a random effect	89
Table 6: Coefficient estimates, standard errors and predicted content of Extractable Phosphorus (P _{Extr}) from an ordinal least squares regression model including field as a random effect	90

Chapitre 4

Table 1: Main biomass flows related to farm activities and the data sources.....	105
Table 2: Main characteristics of the crop-livestock case-study farms from the Malagasy highlands and their major N inflows and soil N stock.....	108
Table 3: Indicators of external N imports, soil N stock, N network analysis, farm productivity and economics.....	111
Table 4: Relative variations of the agricultural gross margin (in % of the reference value) according to the variations of $\pm 20\%$ of product and input prices, across the four farms and for the four scenarios	114
Table 5: Variation of network analysis indicators, total N losses, self-sufficiency and agricultural gross margin (in % of the reference value), across the four farms and the four scenarios with fluctuation of N losses rates and of rice yield	115

Chapitre 5

Tableau 1 : Rappel des principaux objectifs des exploitations familiales d'agriculture-élevage et des pratiques d'alimentation de l'élevage bovin laitier, de gestion des effluents et de fertilisation.	128
Tableau 2 : Comparaison des teneurs de carbone (C) organique et azote (N) total du sol pour les exploitations des hauts plateaux malgaches et celles de certains pays d'Afrique	130

Glossaires

Angady : bêche de jet malgache fréquemment employée pour la plupart des travaux du sol ; outil composé d'une lame en fer (environ 20 à 40 cm) et d'une tige en bois (environ 2 m).

Baiboho : zone alluvionnaire en bordure de cours d'eau ; bourrelet de berge composé essentiellement de sables, micas et limon dont les sols peu hydromorphes permettent des cultures pluviale et maraîchères.

Bozaka : graminée qui recouvre les collines ; couverture spontanée de graminées ; mauvaise herbe ou « fourrage sauvage ».

Kapoaka : unité de mesure correspondant à une boîte de lait concentré ; terme fréquemment utilisé pour le riz (kapoaka \approx 300 g riz).

Mololo : paille de riz, de blé ou d'orge souvent séchée puis utilisée pour l'alimentation des bovins

Sobika : panier ou corbeille artisanal malgache (vannerie), circulaire, et sans anses; le diamètre peut varier d'environ 30 à 40 cm avec une hauteur d'environ 25-30 cm.

Tanety : colline (relief convexe) ; ensemble dominant les bas-fonds composé de hautes collines (collines convexes à fortes dénivelées et à pentes fortes), de surfaces d'aplanissement (plateaux bien conservés ou légèrement ondulés, basses et moyennes collines convexes, basses et moyennes collines convexes aménagées en « pseudo-terrasses »), versants de raccordement.

Tanimbary : « terres de riz », rizières, ensemble des bas-fonds

Chapitre 1 :

Introduction générale

Introduction générale

Le constat de malnutrition est alarmant : près de 925 millions de personnes sont considérées comme sous-alimentées en 2010, c'est-à-dire ayant une consommation d'aliments quotidienne inférieure au minimum énergétique requis, soit 1850 kcal/personne/jour (FAO, 2008 ; FAO, 2010). La quasi-totalité des personnes sous-alimentées (98%) se regroupent dans les pays en développement, avec une prévalence moyenne de la sous-alimentation comprise depuis 1990 entre 15 et 20% de la population (FAO, 2010). L'Afrique subsaharienne compte à elle seule près de 239 millions de personnes sous-alimentées (FAO, 2010), soit une prévalence de la sous-alimentation de 27% (FAO, 2011, Annexe 1). Par ailleurs, alors que le nombre de personnes sous-alimentées tend à diminuer sur l'ensemble de l'Asie, il ne cesse d'augmenter en Afrique, avec une progression de 31% des cas de sous-alimentation entre 1990 et 2008 (FAO, 2011). Le nombre des personnes sous-alimentées pourrait doubler d'ici 2020 en Afrique (Shapouri, 2010). Les facteurs à l'origine de cette augmentation de l'insécurité alimentaire sont multiples : forte croissance démographique, faibles productions agricoles, crises politiques, sécheresses et autres catastrophes naturelles (Sanchez, 2002).

La population mondiale devrait augmenter de 6,9 à 7,5 milliards entre 2010 et 2020 (World Bank, 2012 ; Rosegrant et al., 2001) et atteindre 7,9 à 10,4 milliards en 2050 (Nelson et al., 2010). La croissance démographique est particulièrement forte dans les pays en développement, et en particulier en Afrique subsaharienne où les taux annuels de croissance démographique sont les plus forts (entre 2,5 et 3%) depuis la fin des années 80 (Annexe 2). La croissance de la population mondiale induit une augmentation de la demande alimentaire globale et une aggravation de la pression sur les ressources alimentaires. En Afrique subsaharienne, une augmentation de 50 à 80% de la demande globale en nourriture est attendue entre 2010 et 2050 (Keating et Carberry, 2011). Mais cette augmentation de la demande en nourriture s'accompagne aussi de modifications des habitudes alimentaires et en particulier à l'augmentation de la consommation de produits animaux (Herrero et al., 2010, Annexe 3). La demande en céréale, en viande et en lait de l'Afrique subsaharienne devrait progresser de 97, 104 et 110% respectivement, entre 1997 et 2020 (Rosegrant, 2001).

La croissance démographique induit également une pression accrue sur les ressources foncières (Annexe 4), qui a pour conséquence une diminution drastique voire la disparition des périodes de jachère, une surexploitation des parcelles agricoles et une dégradation de la fertilité des sols (Nandwa et Bekunda, 1998). Cette dégradation de la fertilité des sols se traduit en particulier par un épuisement des éléments nutritifs du sol, la diminution du taux de matière organique du sol, de la biomasse vivante du sol et de l'activité biologique du sol (e.g. Fernandes et al., 1997 ; Palm et al., 1996 ; Pascual et al., 2000 ; Stoovogel et Smaling, 1990 ; Tittonell et al., 2007a). Cette dégradation de la fertilité du sol est une des causes biophysiques majeures des faibles productions agricoles et donc de l'insécurité alimentaire en Afrique (Sachez, 2002).

La pression démographique et l'augmentation de la demande pourraient aussi entraîner des phénomènes d'intensification agricole. Cette intensification serait induite par l'organisation des marchés, l'amélioration de l'accès aux intrants et l'opportunité de les rentabiliser (Bationo et al., 1995 ; Rovere et al., 2008 ; Scoones et Toulmin, 1995 ; Valbuena et al., 2012). Mais cette intensification a classiquement conduit en Afrique à une situation de dégradation de la ressource du sol (Annexe 5). Ainsi, la faible amélioration des rendements des céréales, et du riz en particulier

(Annexe 6), n'ont pas suffi pas à compenser la forte croissance démographique, entraînant alors une diminution globale de quantité de céréales produite par habitants (Annexe 7).

Pour répondre à cette demande accrue en nourriture dans les pays en développement, et en particulier en produits d'origine animale, intensifier durablement la production semble indispensable (Herrero et al., 2009). Une intensification durable implique une croissance de la productivité des systèmes agricoles accompagnée d'une augmentation des services écosystémiques rendus, de l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des intrants, et la protection du sol et de la biodiversité (Dugué et al., 2011 ; Kassam et al., 2011). L'intensification durable mobilise des processus écologiques, et en particulier le recyclage de la biomasse et des éléments nutritifs, présents dans les systèmes d'intégration agriculture-élevage.

Ces systèmes mixtes d'agriculture-élevage sont à la base de l'agriculture dans de nombreux pays en développement. Les exploitations familiales d'agriculture-élevage représentent près de 20% de la population mondiale (McDermott et al., 2010) et produisent près de 50% de la production mondiale de céréales (dont 86% du riz) et, 60% de la viande et 75% du lait dans les pays en développement (Herrero et al., 2010). Ainsi ces exploitations pourraient être la clé de la sécurité alimentaire future via une intensification durable (Herrero et al., 2010).

La première partie de cette introduction est destinée à présenter le concept de fertilité du sol et l'état de dégradation de la fertilité constatée dans les pays africains. Cette introduction fait également le point sur les exploitations familiales d'agriculture-élevage et les pratiques de gestion de la biomasse rencontrées. Nous détaillons ensuite, le concept de durabilité et les indicateurs de durabilité des exploitations. Enfin, le contexte de l'étude et l'objectif de la thèse sont présentés.

1 Dégradation de la fertilité des sols en Afrique

1.1 Concept de fertilité du sol

Le terme « fertilité » peut être défini comme l'aptitude d'un milieu à produire (Gobat et al., 2010). La fertilité du sol résulte de la combinaison de différents types de fertilité :

- la fertilité chimique, qui se caractérise par l'état de la réserve du sol en éléments nutritifs essentiels à la croissance des végétaux et à l'activité biologique du sol (en particulier azote, phosphore, potassium), de la capacité d'échange du sol (CEC) et du pH du sol. Elle prend aussi en compte les éléments polluants et/ou toxiques. Cette fertilité chimique se rapproche du terme anglophone « soil fertility » qui s'intéresse particulièrement aux quantités d'éléments nutritifs du sol (Jhonson, 2009).
- la fertilité physique, qui est déterminée par les propriétés physiques du sol en lien avec la texture (i.e. proportion des particules minérales du sol) et la structure du sol (arrangement macroscopique des agrégats). Ces propriétés physiques sont par exemple la densité apparente du sol, la stabilité structurale, la porosité.
- la fertilité biologique, qui correspond à l'activité des microorganismes (microflore et microfaune) et de la macrofaune du sol, indispensable aux processus de décompositions de la matière organique, à l'humification et à la structuration du sol (aération du sol, formation d'agrégats) (Lavelle et al., 2006, Palm et al., 1996). Les organismes du sol sont donc essentiels à

aux cycles des éléments nutritifs du sol, au renouvellement de la matière organique et au maintien de la structure physique du sol (Bradford et al., 2002)

Il existe donc d'étroites relations entre l'activité biologique du sol et les propriétés physiques et chimiques du sol (en particulier sur la structure, la porosité et la réserve minérale du sol), mais aussi des interactions entre les propriétés physiques et chimiques du sol (Figure 1).

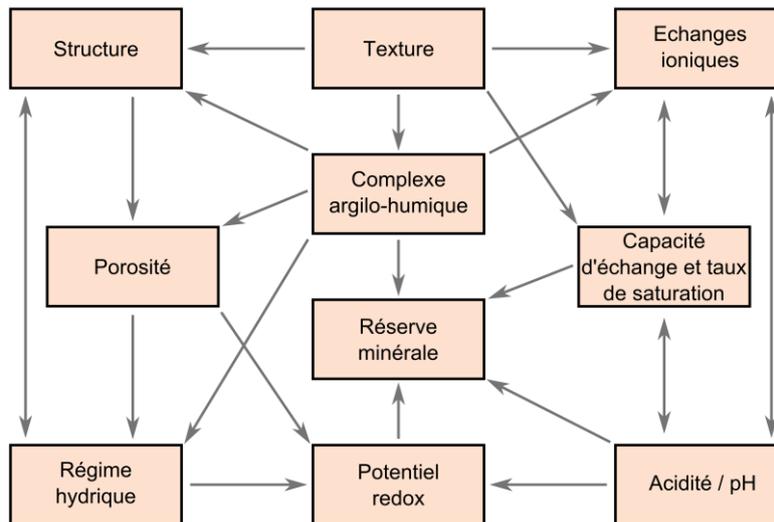


Figure 1 : Relations entre dix propriétés physiques et chimiques du sol (adapté de Gobat et al., 2010)

Les principaux facteurs qui limitent la fertilité des sols tropicaux sont de faibles réserves en éléments nutritifs, des stress hydriques fréquents, une érosion des sols importante, des pH du sol acides, une forte capacité de fixation du phosphore au sol, une toxicité en aluminium élevée, et une faible biodiversité des organismes du sol (Cardoso et Kuyper, 2006).

1.2 Éléments nutritifs du sol et appauvrissement des sols africains

Les teneurs en azote (N), phosphore (P) et potassium (K) du sol indiquent l'état de la fertilité chimique du sol. L'appauvrissement du sol en ces éléments nutritifs traduit une dégradation de la fertilité du sol.

Stoorvogel et Smaling (1990) dressent un constat alarmant pour l'Afrique quant à la dégradation de la fertilité des sols. Les pertes en éléments nutritifs du sol sont élevées et ne cessent d'augmenter : 26, 43 et 23% respectivement pour N, P et K entre 1988 et 1998 (Sheldrick et Lingard, 2004). Ces pertes en éléments nutritifs étaient estimées à 26 kg N/ha/an, 3 kg P/ha/an et 19 kg K/ha/an en 2000 pour l'Afrique subsaharienne (Stoorvogel et al., 1993). Selon Liu et al. (2010), près de 80% des pays africains sont confrontés à des stress ou des déficits azotés des sols (Figure 2).

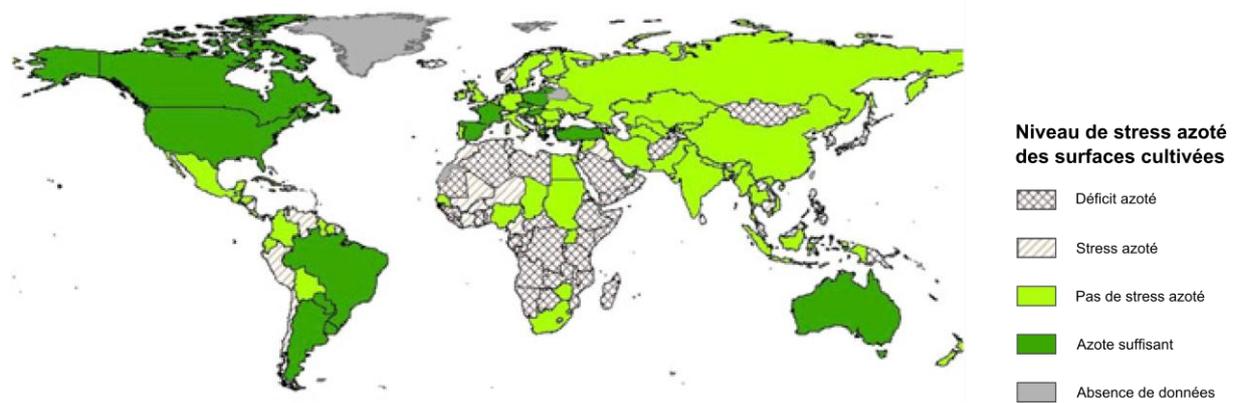


Figure 2 : Niveau de stress azoté au niveau mondial pour les surfaces cultivées. Le niveau de stress donné correspond à une moyenne nationale. (adapté de Liu et al., 2010).

Les bilans azotés sont couramment utilisés comme indicateurs de l'état des pertes de N du sol (Esilaba et al., 2005) ; le bilan partiel et le bilan complet de N sont à distinguer.

Le bilan partiel de N (« partial N balance ») correspond à la différence entre les entrées et les sorties de N du système (territoire, exploitation, parcelle), souvent liées à des transactions économiques. Le système est alors considéré comme une boîte-noire et seules les importations de N (e.g. achat de fourrages ou d'aliments concentrés, achat d'engrais minéral ou de fertilisant organique) et les exportations de N (e.g. vente d'animaux, de produits animaux, de produits vivriers) sont prises en compte.¹ Le bilan complet de N (« full N balance ») prend en compte les importations et les exportations d'azote du système comme le bilan partiel de N, mais comptabilise en plus l'ensemble des entrées de N par sédimentation, déposition, fixation, et des sorties de N par émissions gazeuses, érosion et lixiviation.²

Dans la majorité des pays européens, les bilans azotés (partiels et complets) des exploitations agricoles sont en général largement excédentaires et traduisent un risque potentiel de pollution (e.g. Aarts et al., 2000 ; Bassanino et al., 2007 ; Groot et al., 2006). En Afrique, le constat est radicalement opposé. La plupart des études menées en Afrique indiquent des bilans azotés déficitaires, en particulier pour les bilans complets de N ; seulement 10% des bilans complets azotés observés sont positifs (Cobo et al., 2010). Dans les systèmes africains d'agriculture familiale, les bilans complets d'azote sont presque toujours négatifs à l'échelle de l'exploitation (Tableau 1). A l'échelle des parcelles, les bilans du sol négatifs en éléments nutritifs traduisent une utilisation « minière » des ressources du sol, c'est-à-dire un épuisement de ces ressources du sol. Cette utilisation « minière » des sols s'appuie sur des prélèvements par les cultures et des exportations en éléments nutritifs supérieurs aux retours (e.g. fertilisants, résidus). Les exploitations familiales africaines restent fortement dépendantes de cette agriculture « minière » pour leur subsistance et la constitution d'un revenu agricole (Esilaba et al., 2005 ; Nkonya et al., 2005). Au Kenya, environ 60 à 80% du revenu agricole des exploitations familiales résulte de l'épuisement des ressources en éléments nutritifs du sol (De Jager et al., 2001). Selon Sheldrick et al. (2004), pour remédier à cette exploitation « minière » des éléments nutritifs du sol, il faudrait une augmentation annuelle d'environ 18% de

¹ . Il se rapproche fortement du « bilan apparent d'azote » défini par Simon et al., 2000 ; mais dans ce dernier les entrées par fixation symbiotique d'azote sont comptabilisées. Il est à noter cependant que le terme « bilan apparent d'azote » défini par la Corpen intègre aussi les pertes par volatilisation de l'azote dans les bâtiments d'élevage et lors des épandages (Corpen, 2006).

² A la différence de ce dernier, la « balance globale azotée » prend en compte les fixations symbiotiques d'azote mais pas les pertes gazeuses d'azote (Corpen, 2006).

l'utilisation des engrais minéraux. Cependant, les prix des engrais minéraux en Afrique sont souvent deux à six fois supérieurs à ceux pratiqués dans le reste du monde (Sanchez et Swaminathan, 2005). Ceci limite l'accès des engrais minéraux aux exploitations familiales, et donc ne favorise pas l'amélioration de la fertilité chimique des sols par l'apport d'engrais minéraux. Une autre limite à l'achat des engrais minéraux est une efficacité d'utilisation de ces intrants souvent réduite en lien avec des teneurs faibles en matière organique du sol (Nandwa et Bekunda, 1998).

Enfin, les éléments nutritifs du sol étant rendus disponibles pour des plantes par la décomposition de la matière organique, des apports de matières organiques au sol permettraient de reconstituer les stocks en éléments nutritifs du sol (Palm et al., 1997).

Tableau 1 : Bilans partiels et bilans complets d'azote calculés dans les exploitations familiales de divers pays d'Afrique.

Pays	Bilan partiel d'azote kg N/ha/an	Bilan complet d'azote kg N/ha/an	Références
Ethiopie	4 à 6		Abegaz, 2005
Ethiopie		-122	Hailelassie et al., 2005
Kenya	34	-71	Van den Bosch et al., 1998
Kenya		-9 à -5	Gachimbi et al., 2005
Kenya		-50 à 2,4*	Van Beek et al., 2009
Niger		-20 à -14	Rovere et al., 2008
Uganda		-52	Nkoya et al., 2005
Zimbabwe	-20 à 80		Zingore et al., 2007

* : en kg N/ha/demi an

1.3 Carbone organique du sol et évolutions

La matière organique du sol joue un rôle primordial sur les propriétés chimiques (e.g. réservoir principal et source d'éléments nutritifs après décomposition) et physiques du sol (e.g. amélioration de la structure des sols) (Grosbellet, 2008, Fernandes et al., 1997). La matière organique du sol influence aussi le pH du sol, la capacité d'échange cationique, la capacité d'échange d'anions (Yadvinder et al., 2005). De plus, en particulier grâce au carbone organique du sol (SOC), elle est le moteur des activités biologiques du sol (Gregorich et al., 1994 ; Lavelle et al., 1995 ; Palm et al., 1997). Les teneurs en matière organique du sol ou en SOC sont fréquemment utilisés comme un indicateur général de la fertilité des sols (Yadvinder et al., 2005).

En Afrique, la teneur moyenne en SOC est de 2,4 kg/m² pour l'horizon de sol 0-30 cm. De plus, elle est en moyenne supérieure en Afrique centrale (3,9 kg/m²) à celle qu'on observe en Afrique australe (2,2 kg/m²) (Henry et al., 2009). Les teneurs en SOC les plus faibles ont été observées au Sahara (Figure 3)

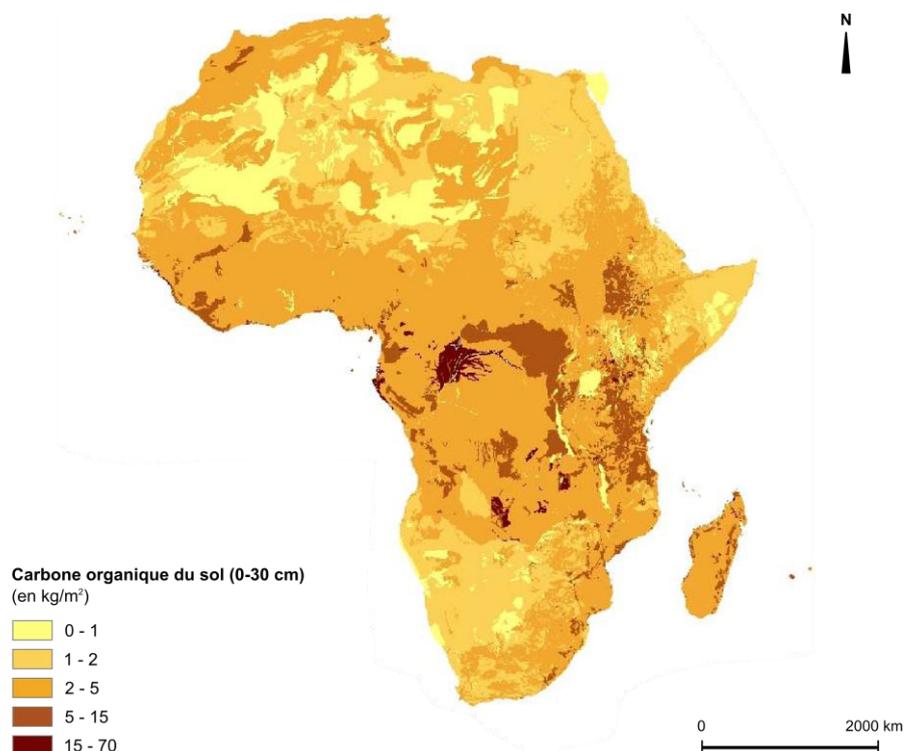


Figure 3 : Distribution du carbone organique du sol (horizon 0-30 cm) en l'Afrique (adapté de Henry et al., 2009)

Le maintien des teneurs en SOC dépend de l'équilibre entre les apports de carbone (C) au sol et le taux de décomposition de la matière organique (Saggar et Hedley, 2001). Et la décomposition de la matière organique du sol résulte de (1) la taille des particules de matière organique qui détermine l'accessibilité aux microorganismes du sol ; (2) les facteurs environnementaux comme la température et l'humidité qui stimulent les activités biologiques ; (3) les propriétés du sol comme la teneur en argile qui protège la matière organique de la décomposition et stabilise ainsi la matière organique du sol ; (4) la disponibilité des éléments nutritifs du sol nécessaires à la décomposition des matières organiques ayant des rapport C/N élevée (≥ 25) ; (5) les pratiques de gestion du sol qui influent sur la quantité et le type d'apport organique, et le degré de perturbation du sol (Yadvinder et al., 2005).

Ainsi, toute modification de l'utilisation ou de la gestion du sol peut induire des variations du stock de SOC, même pour les systèmes agricoles considérés comme stables (Bernoux et al., 2006 ; IPCC, 2006). Le changement d'utilisation du sol (par exemple mise en culture d'une parcelle en jachère), entraîne généralement une forte diminution du stock de SOC durant les 5-10 premières années, puis les pertes en SOC deviennent progressives (IPPC, 2006 ; Tittonell et al., 2007a). Au Zimbabwe, près de 50% du stock initial de SOC disparaît en 10 ans après de la mise en culture en maïs d'une parcelle anciennement non cultivée et boisée (Tittonell et al., 2007a). De même, pour les systèmes de cultures sur brûlis à Madagascar, 10 ans de cultures suffisent à faire disparaître près de 40% du stock initial de SOC (Vågen et al., 2006).

2 Exploitations familiales d'agriculture-élevage en Afrique et place de l'animal dans le cycle des éléments nutritifs

Les exploitations mixtes d'agriculture-élevage sont à la base de l'agriculture en Afrique. D'après Herrero et al. (2009), les exploitations mixtes d'agriculture-élevage peuvent être classées en quatre catégories : systèmes pastoraux ou agropastoraux, systèmes mixtes extensifs, systèmes mixtes

intensifs et systèmes mixtes spécialisés ou industrialisés. De plus, il existe divers états de transition d'une classe à l'autre. Une autre classification des systèmes d'agriculture-élevage est proposée par Schiere et al. (2002) qui détaillent divers degrés d'intégration de l'agriculture et l'élevage dans ces systèmes mixtes, de l'élevage prédominant à l'agriculture prédominante (Annexe 8). Par ailleurs, pour une même classe de système mixte, les exploitations d'agriculture-élevage peuvent aussi varier selon leur contexte agro-écologique, socio-culturel et ainsi avoir des pratiques de gestion des biomasses différentes selon les potentielles offres du marché (Tiftonell, 2008).

Dans les systèmes d'agriculture-élevage, l'animal joue un rôle central dans les transferts et le recyclage de biomasses et d'éléments nutritifs (Figure 4). Les transferts de biomasses et des éléments nutritifs au sein d'une exploitation associant agriculture et élevage s'opèrent entre les différents compartiments du système : animaux, stocks des effluents (fumier, lisier, compost), parcelles de culture (plantes et sol), et la famille (Figure 4). Les animaux accélèrent le cycle des éléments nutritifs directement par la décomposition (digestion) et l'excrétion d'éléments nutritifs d'origine végétale et indirectement par les effets des excréta sur les organismes du sol (Rotz et al., 2005).

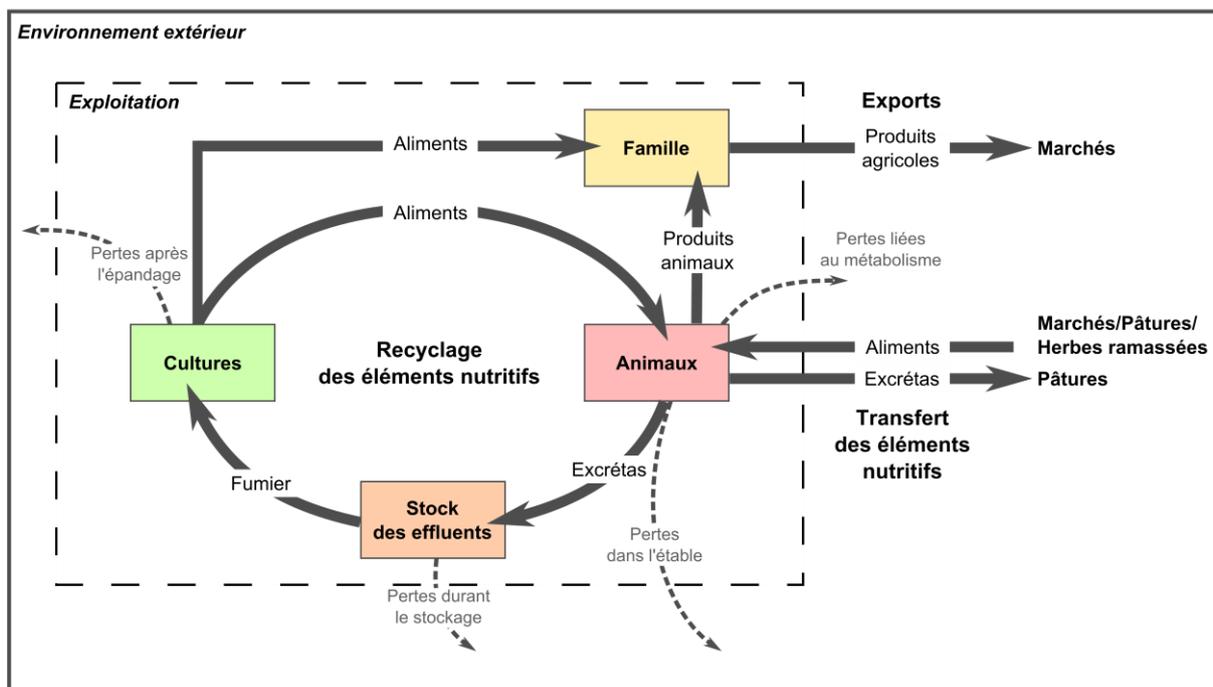


Figure 4 : Représentation schématique des transferts des éléments nutritifs et des pertes dans une exploitation mixte d'agriculture-élevage.

Les animaux, et en particulier les ruminants, ont la capacité de valoriser des ressources végétales non utilisées dans l'alimentation humaines, comme les fourrages (cultivés ou naturels) et les résidus de cultures, pour la production de viande, de lait et de travail (McDermott et al., 2010). Ils produisent également des effluents organiques qui sont utilisés pour fertiliser les sols des cultures, contribuant ainsi au recyclage « plante-animal-sol-plante » des éléments nutritifs, au sein de l'exploitation, et en particulier le N (Figure 5). Quatre étapes majeures dans le transfert et le recyclage des éléments nutritifs peuvent être définis (Rufino et al., 2006) : (1) la production d'effluents d'élevage ; (2) la collecte et la gestion des effluents ; (3) stockage des effluents ; (4) la minéralisation de l'azote dans le sol, son absorption par la plante et sa conversion en biomasse végétale (Figure 5).

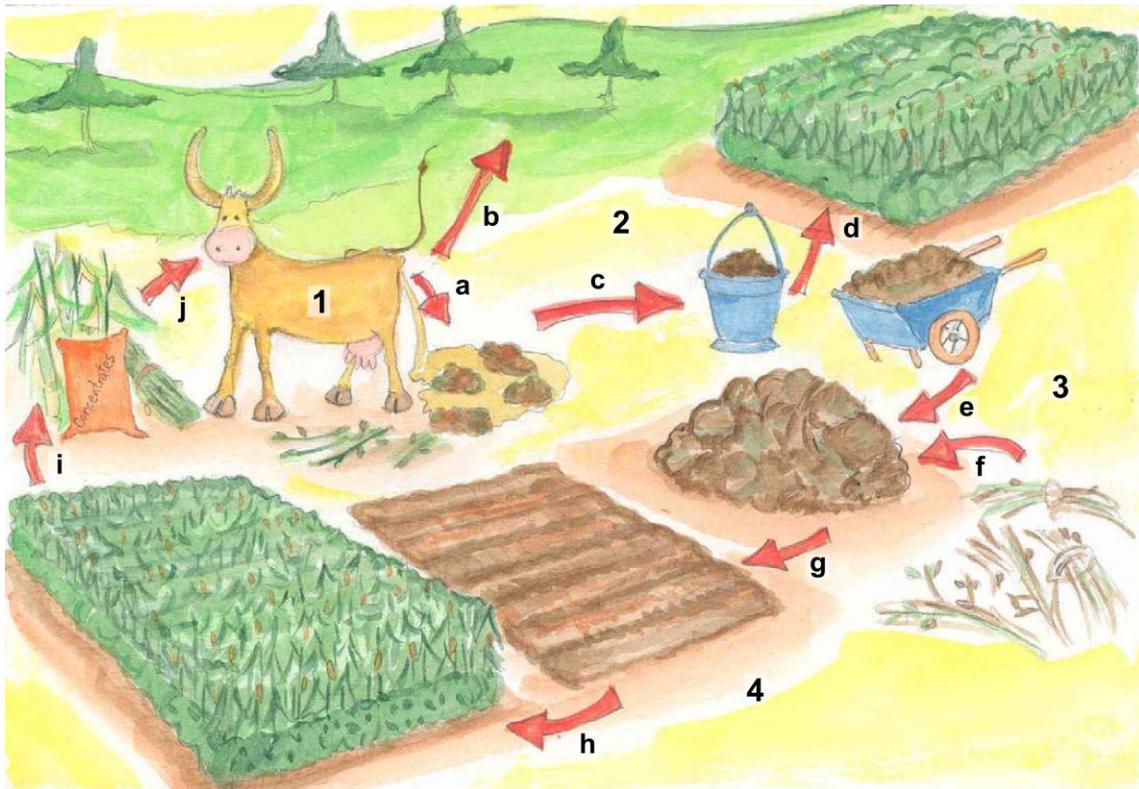


Figure 5 : Etapes du transfert de l'azote au sein d'une exploitation d'agriculture-élevage (d'après Rufino et al., 2006). 1 : La production d'effluents d'élevage. Une fraction de l'azote alimentaire consommée par l'animal est excrétée dans les fèces et urines. Ces effluents peuvent rester dans le parc (flux a) et/ou sur les parcours (flux b) selon le mode de gestion des animaux. 2 : La collecte et la gestion des effluents. Les effluents sont recueillis (flux c) puis appliqués directement sur les terres cultivées (flux d) ou stockés (flux e) 3 : Stockage des effluents ; des résidus de culture peuvent leur être ajoutés (flux f) pendant le stockage. 4 : La minéralisation de l'azote dans le sol, son absorption par la plante et sa conversion en biomasse végétale. Les effluents sont épandus sur les terres cultivées (flux g) ; les plantes absorbent la fraction minéralisée de l'azote rendue disponible (flux h). L'azote assimilé par la plante est reparti dans les grains et dans les parties végétatives (flux i). Les fourrages ou résidus des cultures (non valorisés par l'homme) peuvent être utilisés pour l'alimentation des animaux (flux j).

Les animaux sont d'importants vecteurs de transfert des éléments nutritifs de l'environnement extérieur vers les exploitations (Figure 4). Dans les systèmes d'élevage basés sur la stabulation permanente, les importations d'herbes ramassées à l'extérieur de l'exploitation (« cut-and-carry ») et/ou les achats de fourrages ou d'aliments concentrés sont des pratiques permettant d'ajouter des éléments nutritifs au système (Nandwa et Bekunda, 1998). Les animaux ne quittant pas la stabulation et les effluents n'étant pas épandus sur ces terrains extérieurs, il n'y a donc pas de retours directs en éléments nutritifs vers ces sources. Ces transferts en éléments nutritifs peuvent se faire à une échelle régionale (zone autour de l'exploitation) ou une à échelle beaucoup plus large (nationale ou internationale) selon l'origine des matières premières des aliments concentrés (Galloway et al., 2008). De même, dans les systèmes agropastoraux, les pâtures à l'extérieur de l'exploitation (durant la journée) peuvent être considérées comme un moyen d'intégrer des éléments nutritifs au système d'exploitation (Nandwa et Bekunda, 1998). Durant le pâturage, les animaux peuvent entraîner une redistribution spatiale des éléments nutritifs par des excréments localisés (Powell et al., 1996, Rotz et al., 2005). Dans ces systèmes agropastoraux, le parcage des animaux (la nuit) sur les parcelles de l'exploitation à fertiliser et/ou l'utilisation des effluents récoltés après une nuit en stabulation sont des pratiques de fertilisation qui peuvent induire un transfert de fertilité des pâtures vers les parcelles cultivées (Landais et al., 1991 ; Powell et al., 1996).

L'élevage joue un rôle majeur dans la concentration des éléments nutritifs et la redistribution au sein des exploitations (Giller et al., 2006). En concentrant des éléments nutritifs dans les excréta, l'élevage facilite la gestion et la manipulation des éléments nutritifs par l'exploitant.

La méthode Network Analysis est une méthode qui permet de comptabiliser les flux d'éléments nutritifs au sein de l'exploitation (sous forme de matrices entrées-sorties) et de quantifier le degré de recyclage en éléments nutritifs dans système d'exploitation. Pour cela un ensemble d'indicateurs sont calculés tels que la dépendance de l'exploitation aux intrants extérieurs (D) et le niveau d'intégration des activités (FCI) (Rufino et al., 2009). Les détails sur ces indicateurs et leurs utilisations sont présentés dans le Chapitre 4.

Outre sa capacité à transférer et recycler de la biomasse et des éléments nutritifs, l'élevage constitue (1) une ressource de nourriture, avec l'avantage qu'ont les ruminants de pouvoir produire à partir des fourrages à très faibles valeurs nutritives (McDermott, 2010) ; (2) une source de revenu stable (via la vente de produit animaux) car moins assujettie aux aléas climatiques que les productions agricoles (Ehui et Jabbar, 1995) ; (3) une épargne disponible et facilement mobilisable (Ehui et Jabbar, 1995) ; (4) une force de traction indispensable lors de l'intensification des activités culturales ; (5) un statut social, signe extérieur de richesse (Moll, 2005) ; (6) une réduction des risques par la diversification des activités et ainsi une source de résilience pour les systèmes d'agriculture-élevage (Osbaahr et al., 2008). L'élevage est donc un moteur de développement pour les exploitations familiales d'agriculture-élevage.

D'une exploitation d'agriculture-élevage à l'autre, les pratiques de gestion de la biomasse peuvent varier et induire des conséquences différentes en termes de recyclages des éléments nutritifs et de fertilité du sol.

3 Pratiques de gestion de la biomasse aux seins des exploitations familiales mixtes d'agriculture-élevage

3.1 Pratiques de gestion des effluents d'élevages et impacts sur les pertes d'azote

La qualité des effluents d'élevage (i.e. teneur en N, P, K, ratio C/N) est très variable et résulte des pratiques de conduite des animaux (dont les conditions de logement), d'alimentation des animaux, de stockage des effluents d'élevage, et des pratiques d'épandage (Fernandes et al., 1997 ; Lekasi et al., 2003, Rufino et al., 2006 ; Snijders et al., 2009). Dans les zones tempérées les teneurs en N des effluents d'élevage sont souvent plus élevées que dans les tropiques en lien avec une alimentation souvent plus riche en protéines, des conditions plus favorables à la collecte et au stockage des effluents (e.g. températures ambiantes plus faibles) (Snijders et al., 2009).

3.1.1 Alimentation et mode de conduite

Les différences de digestibilité et de teneur en protéines de la ration des animaux peuvent entraîner des variations importantes des teneurs de N dans les fèces et les urines (Snijders et al., 2009). Par exemple, la pratique de complémentation des animaux avec des aliments concentrés permet d'accroître la teneur en P des fumiers (Lekasi et al., 2003). La teneur en N excrétée dans l'urine des bovins augmente avec la teneur en protéines des aliments (Rotz et al., 2005). La composition des

effluents d'élevage peut donc varier d'une saison à l'autre en raison des variations de la disponibilité des aliments et de leur qualité (Snijders et al., 2009).

Le mode de conduite des animaux (pâtures vs stabulations permanentes) et le temps passé dans le logement sont aussi des facteurs de variation de la qualité des effluents d'élevage (Beauvais, 2010 ; Lekasi et al., 2003 ; Rufino et al., 2006 ; Snijders et al., 2009). En effet, les teneurs en N et en P des fumiers des systèmes en stabulation permanente (qui passent le plus de temps à l'étable) tendent à être supérieures à celles des fumiers issus de systèmes pratiquant le pâturage ou la divagation des animaux (Beauvais, 2010 ; Lekasi et al., 2003).

Les conditions de logement des animaux sont aussi apparues comme un facteur influençant la qualité des effluents d'élevage (Lekasi et al., 2003 ; Rufino et al., 2006 ; Snijders et al., 2009). En effet, Rotz (2004) montre que le pourcentage de N perdu dans les bâtiments d'élevage (Figure 4) dépend du type d'élevage (bovin, porc, volaille) et du type de logement (e.g. volière, stabulation en cage, stabulation entravée, stabulation libre). La présence d'un toit dans le bâtiment d'élevage et d'un sol dallé ou bétonné (avec canaux de drainage des urines) limiteraient les pertes en éléments nutritifs, respectivement, par volatilisation et par lixiviation. Les systèmes d'élevage ayant des bâtiments avec toit présentent des teneurs en P dans effluents d'élevage supérieures à ceux avec des bâtiments à ciel-ouvert (Lekasi et al., 2003). Les effets de la présence d'un toit sur les pertes de N sont probablement à mettre en relation avec des facteurs environnementaux, tels la température ambiante, le rayonnement solaire et les précipitations (Rotz, 2004). L'utilisation d'une litière dans le bâtiment d'élevage permettrait d'absorber les urines (riches en N) et ainsi diminuer les pertes de N par volatilisation (Rufino et al., 2006). La nature et l'épaisseur de la litière sont aussi à prendre en considération ; les apports de matériels végétaux à faible teneur en N et rapport C/N élevé, comme les pailles, peuvent conduire à une diminution (par « dilution ») des teneurs en N et une augmentation du rapport C/N des fumiers (Lekasi et al., 2003). Enfin une collecte fréquente des litières usagées ou des excréta permet de diminuer les pertes d'azote (Rufino et al., 2006).

3.1.2 Stockage des effluents d'élevage

La nature des effluents d'élevage mélangés (e.g. bovin, porc, volaille) et des différents matériaux rajoutés (e.g. cendres, refus alimentaires, pailles, déchets ménagers) pendant le stockage conditionneront la qualité finale du fumier (Rufino et al., 2006). La teneur en matière sèche des effluents est un facteur majeur conditionnant les pertes de N pendant le stockage (Rotz, 2004). Selon l'IPPC (2006), le pourcentage de pertes de N par émissions gazeuses pendant le stockage est fonction du type d'animaux d'élevage (porc, vache laitière, autre bovin, volaille) et du mode de stockage (e.g. liquide, solide, bassin anaérobie couvert). Lors du stockage, les ajouts d'urine aux fèces ou au mélange fèces-refus augmente les pertes de N (Snijders et al., 2009). Au contraire, le conditionnement en tas dense ou la couverture du tas d'effluents créent des conditions en anaérobie ce qui permet de limiter les pertes de N par émissions gazeuses (Rufino et al., 2006 ; Rufino et al., 2007). De plus, l'ajout de matériaux végétaux à rapport C/N élevé (≥ 25), telles des pailles, favorise l'immobilisation du N minéral par les microorganismes (Rufino et al., 2006). Le retournement du tas d'effluents pendant le stockage, en stimulant les activités de décomposition en aérobie, entraîne des pertes de N (Rufino et al., 2006). Cependant, Lekasi et al. (2003) ont mis en évidence des teneurs en N plus importantes et des rapports C/N plus faibles pour les fumiers des exploitations pratiquant le retournement du fumier pendant le stockage. La durée du stockage affecte aussi sur les teneurs de N ; en général, plus la durée du stockage est longue, moins les fumiers contiennent de N (Rufino et al., 2007). Des facteurs environnementaux, tels la température ambiante, la vitesse du vent, le

rayonnement solaire sont aussi à prendre en compte car peuvent influencer les taux de pertes, en particulier par émissions gazeuses (Rotz, 2004)

3.1.3 Application des effluents aux parcelles

Lors de l'application des effluents d'élevage, les pertes en éléments nutritifs, et en particulier le N, peuvent être causées par émissions gazeuses (volatilisation, dénitrification), lixiviation et/ou érosion. Les pertes de N par dénitrification et lixiviation sont liées à l'activité des microorganismes du sol, et en particulier aux processus de nitrification et de dénitrification (Rotz, 2004 ; Figure 6).

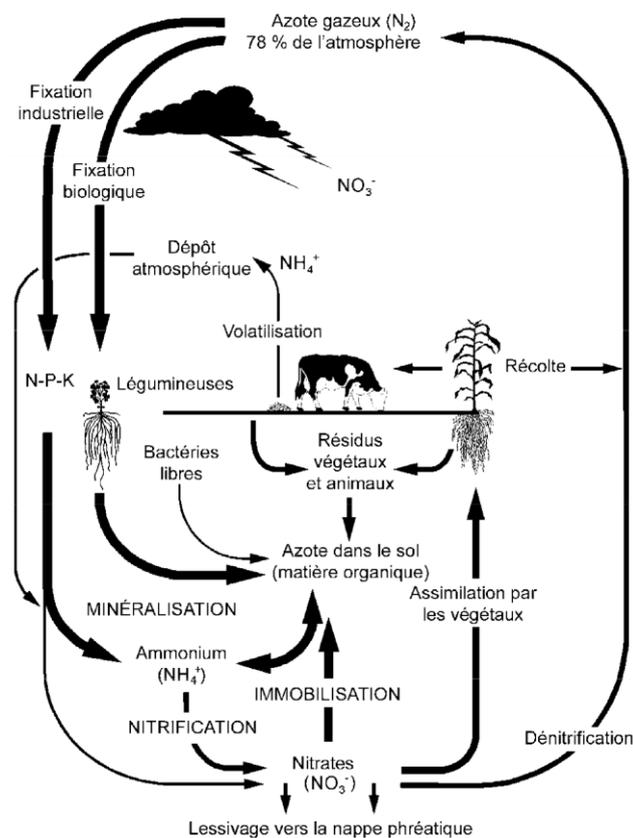


Figure 6 : Cycle de l'azote dans les systèmes agricoles (d'après McKague et al., 2005)

Les facteurs agissant sur les activités biologiques et chimiques, et sur l'érosion des sols influenceront donc les pertes de N. Les pratiques d'application des effluents d'élevage sur les parcelles (surface vs incorporation), le type d'effluent (i.e. teneur en N, rapport C/N, teneur en matière sèche), la quantité utilisée, le moment de l'application (e.g. saison, moment de la journée, synchronisation avec le besoin des cultures) et les facteurs environnementaux (e.g. température, précipitations, vent, pH du sol, structure du sol) agissent sur les taux de pertes de N après l'application des effluents (Meisinger et Jokela, 2000). La majorité des pertes de N ont lieu durant les premières heures après l'application (Meisinger et Jokela, 2000). Le pourcentage de pertes de N lors de l'application des effluents d'élevage diffère selon s'ils sont déposés lors des pâtures, pulvérisés en surface, incorporés au sol, injectés dans le sol en profondeur (Rotz, 2004).

L'incorporation des effluents d'élevage dans le sol permet de diminuer les pertes de N par volatilisation (sous forme d'ammoniac, NH_3) par rapport à une application en surface. Cette diminution est d'autant plus importante que le délai avant incorporation (i.e. temps passé par les effluents en surface avant leur incorporation au sol) est réduit. De plus, la profondeur d'incorporation agit aussi sur les pertes de N ; ces pertes diminuent avec des profondeurs croissantes

(Smith et al., 2009). Par ailleurs, la volatilisation de N est fortement dépendante du pH du sol ; elle est réduite dans des sols à pH acide (Smith et al., 2009, Sommer et al., 2004). Les facteurs théoriques déterminant les pertes de N par volatilisation après épandage des effluents d'élevage ont été résumés par Sommer et Hutchings (2001) (Figure 7).

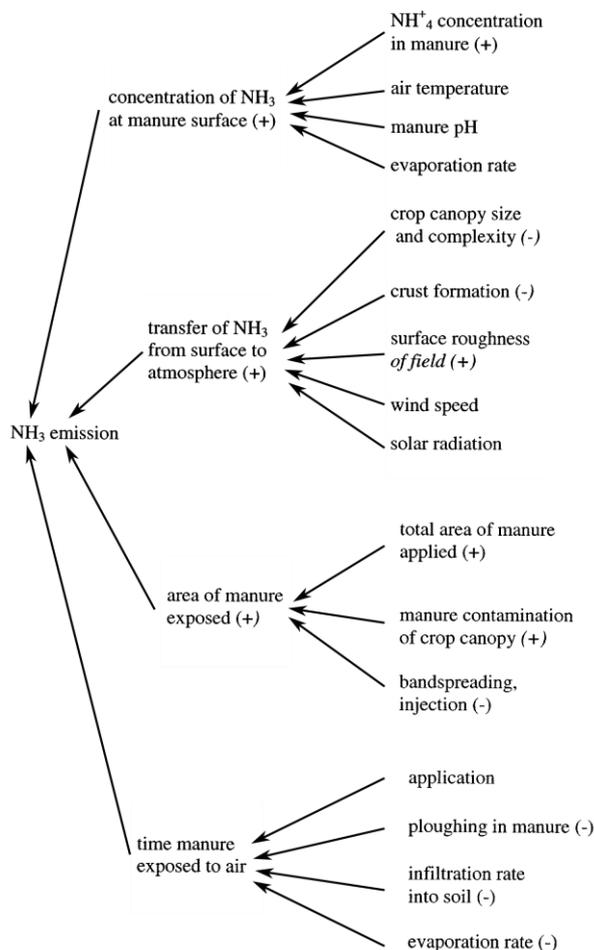


Figure 7 : Facteurs agissant sur la volatilisation de l'azote (NH₃) après application des effluents d'élevage sur les parcelles (d'après Sommer et Hutchings, 2001)

La lixiviation de N (sous forme de nitrate, NO₃⁻) est directement contrôlée par les écoulements d'eau et les teneurs en nitrate (résiduel) du sol, qui dépendent eux de nombreux facteurs tels les conditions climatiques (e.g. précipitations, température), les propriétés du sol (e.g. texture du sol, porosité) et de les pratiques de gestion du sol (e.g. labour, irrigation, la fertilisation minérale ou organique, rotation des cultures) (Li et al., 2006). La synchronisation des applications de fertilisants avec les besoins des cultures est importante car cela permet de réduire les nitrates résiduels dans le sol et donc les risques de lixiviation. Ainsi, les pertes de N par lixiviation sont en général relativement faibles lorsque les effluents d'élevages sont épandus sur une culture en croissance. L'application des effluents d'élevage sur des terres nues peut entraîner des pertes de N par lixiviation importantes (Rotz, 2004).

3.1.4 Efficacités azotées à chaque étape du transfert de N

Le calcul des efficacités (i.e. rapport des sorties en éléments nutritifs sur les entrées) pour les quatre étapes majeures dans le transfert de N (Figure 5) permet de quantifier ces pertes en N et de comparer les exploitations entre elles. En lien avec les facteurs agissant sur les pertes de N décrits précédemment, les efficacités azotées varient fortement au sein des exploitations d'agriculture-

élevage d'Afrique (Rufino et al., 2006) : (1) l'efficacité au niveau de l'animal, définie par le rapport entre la quantité d'éléments nutritifs présente dans les excréta sur celle présente dans les aliments ingérés, peut varier entre 46 et 121% ; (2) l'efficacité au niveau des bâtiments d'élevage (ou collecte des effluents), qui quantifie les pertes d'éléments nutritifs qui s'opèrent entre l'excrétion par l'animal et la collecte des effluents par l'exploitant, oscille entre 6 et 99% ; (3) l'efficacité au niveau du stockage des effluents (tas de fumier), définie par le rapport entre la quantité d'éléments nutritifs présente dans le fumier à la fin du stockage et celle présente en début de stockage, varie de 30 à 87% ; (4) l'efficacité au niveau sol-plante, définie comme la capacité du sol à minéraliser les matières organiques apportées et de la plante à convertir le N disponible (i.e. N apporté moins les pertes de N après application) en biomasse végétale, varie de 3 à 76%.

A cause des nombreuses pertes de N observées à chaque étape du cycle de transfert de N (Figure 5), la restitution au sol de matières organiques par des apports directs de biomasses végétales (i.e. sans passage par l'animal) a été décrite comme plus efficace par rapport à des apports de fumier (Rufino et al., 2006).

3.2 Pratiques de gestion des parcelles ou gestion des apports de biomasses au sol et impacts sur la fertilité des sols

Les exploitations familiales sont constituées de diverses parcelles gérées différemment en raison de la disponibilité limitée des ressources essentielles tels que les biomasses, les éléments nutritifs et le temps travail (Giller et al., 2006). Ces différences de gestion des parcelles peuvent créer de l'hétérogénéité au niveau du sol en modifiant les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (Fernandes et al., 1997), et en particulier les teneurs en matière organique du sol et en éléments nutritifs.

Le stock en matière organique du sol est fortement sensible aux pratiques des agriculteurs, et en particuliers aux pratiques impliquant des transferts de matières organiques au sol (e.g. effluents d'élevage, résidus de cultures, de compost végétal, d'engrais verts, déchets d'élagage) et/ou modifiant le taux de décomposition de la matière organique (e.g. Fernandes et al., 1997 ; McLatchey et Reddy, 1998 ; Nandwa et Bekunda, 1998 ; Palm et al., 1997). Ainsi, les teneurs en matière organique du sol peuvent être affectée par les pratiques qui (Fernandez et al., 1997) :

- modifient l'environnement du sol (e.g. labour, irrigation, mise en place de mulch, utilisation d'engrais organiques ou minéraux, chaulage), ce qui influe sur les processus biologiques de décomposition et la minéralisation ;
- déterminent la quantité et la qualité (composition chimique) des apports organiques au sol, ainsi que la date et l'emplacement (surface ou incorporation) de leur application, ce qui agit sur la synchronisation entre la libération des éléments nutritifs de la matière organique du sol et de la demande des plantes ;
- affectent les macro et microorganismes du sol (agents de décomposition) via le labour, mulch de surface, ou de l'utilisation des pesticides.

3.2.1 Modification de l'environnement par les pratiques

Les pratiques de mulch, de semis direct sous couverture végétale (SCV), d'agroforesterie ou de labour réduit, en maintenant des matières organiques en surface (mulch ou litière de débris végétaux) permettent de réduire l'érosion des sols, le taux d'évaporation de surface et la formation

d'une croûte en surface du sol. De plus, en fonction du taux de recouvrement, le mulch peut limiter la croissance des mauvaises herbes (Douzet et al., 2010 ; Fernandes et al., 1997). Par ailleurs, avec ces pratiques d'accumulation de mulch ou de litière en surface, l'augmentation de la teneur en matière organique du sol se limite souvent à l'horizon de surface du sol. A la différence de ces pratiques, l'incorporation au sol des matières organiques, par des pratiques de labour par exemple, permet de modifier plus en profondeur les teneurs en matière organique du sol et autres propriétés du sol. Par ailleurs, l'incorporation au sol des matières organiques augmente le contact « matières organiques-sol », ce qui facilite leur décomposition et permet alors de libérer plus rapidement les éléments nutritifs (Fernandes et al., 1997).

Les pratiques d'agroforesterie ou de culture de pérennes (e.g. prairies, fourragères pérennes, jachère arborée ou arbustive) permettent de briser les couches compactes de sol ; les racines pivotante peuvent briser les couches compacts en profondeurs et les racines latérales, moins profondes celles proches de la surfaces (Bellows, 2001 ; Young, 1990). Ainsi, les effets des racines permettent de maintenir ou d'améliorer des propriétés physiques du sol tel la structure, la porosité, la capacité de rétention en eau et la perméabilité (Udawatta et Anderson, 2008 ; Young, 1990).

De plus, ces cultures à système racinaire profond, peuvent avoir accès à davantage d'eau et d'éléments nutritifs du sol que les cultures annuelles ; ceci les rend plus résistantes aux variations des conditions environnementales (Nandwa et Bekunda, 1998). La capture des éléments nutritifs du sol en profondeur et leurs transferts vers les parties aériennes de la plante permet d'accéder à ces éléments nutritifs de profondeur qui pourront alors être réutilisés par des transferts des biomasses aériennes (e.g. engrais vert, litière). De même, l'utilisation de légumineuses fixatrices d'azote comme engrais vert ou comme mulch permet apporter de l'azote d'origine atmosphérique au sol (Nandwa et Bekunda, 1998).

Enfin, l'ombre apportée par le feuillage et/ou la couverture du sol par la litière ou le mulch permettent la modification des conditions de température du sol (Young, 1990). Cette modification de la température pourrait agir sur les processus de volatilisation, dénitrification et nitrification. Cependant, certaines études montrent que l'utilisation d'une couverture végétal ou les pratiques de SCV peuvent augmenter les pertes de N par volatilisation, dénitrification et lixiviation ; d'autres rapportent le contraire ou qu'il n'y a aucun effet (e.g. Jian-She et al., 2011;; Mkhabela et al., 2008; Rochette et al., 2009; Yadvinder et al., 2005).

3.2.2 Gestion de la qualité, de la quantité, du moment et de l'emplacement des apports en matières organiques

Les transferts de biomasse au sol peuvent être réalisés sous forme d'effluents d'élevage, de résidus de cultures, de compost végétal (déchets ménagers), d'engrais verts, de litières végétales (feuilles mortes), déchets d'élagage, etc. Ces matériaux ont des formes (e.g. résidus entiers, fragments grossières, lisier) et des compositions chimiques différentes selon leur origine et les traitements reçus (découpe, broyage, compostage). De plus, selon leurs disponibilités, ces transferts de biomasse varient en quantité (Nandwa et Bekunda, 1998).

En fonction de la forme et de la taille des matières organiques incorporées au sol, leur décomposition peut être plus ou moins rapide. Par exemple, de grands fragments de résidus de culture ont généralement un taux de décomposition plus lent que des fumiers ou lisiers (Fernandes et al., 1997 ; Yadvinder et al., 2005).

Les processus de décomposition et d'immobilisation dépendent également de la composition chimique des matières organiques incorporées (i.e. teneurs en N, en lignine, en polyphénol, rapport

C/N). Le choix des variétés végétales utilisées est donc primordial afin de prévoir la composition chimique des biomasses végétales qui seront transférées au sol (Fernandes et al., 1997). La composition chimique des effluents d'élevage est influencée par les pratiques de conduite des animaux, d'alimentation des animaux et de stockage des effluents d'élevage (Fernandes et al., 1997 ; Lekasi et al., 2003). L'incorporation des matières organiques ayant un rapport C/N élevée (≥ 25) tels des résidus de riz, de blé, d'orge ou de maïs peut entraîner, à court terme, l'immobilisation (i.e. absorption par les microorganismes du sol) du N et du P. En utilisant les éléments nutritifs du sol comme source d'énergie pour décomposer les matières organiques, les microorganismes peuvent alors rentrer en compétition avec les cultures. Si l'immobilisation se déroule pendant des phases critiques pour les plante, ceci peut nuire rendement des cultures. L'ajout de N via des pratiques de fertilisations minérales sur ces matières organiques en décomposition permet de compenser une partie du processus d'immobilisation. Les biomasses issues de légumineuses ont généralement une plus forte teneur en N et des rapports C/N plus faibles que les biomasses non-légumineuses, ce qui favorise une rapide minéralisation de l'azote lors de leur incorporation au sol. Cette décomposition rapide pourrait être aussi à l'origine de l'augmentation du pH du sol et d'une diminution de l'adsorption de l'aluminium et des anions (i.e. fixation de ces molécules présentes dans la solution aqueuse du sol sur une surface solide) observées à court terme après l'addition d'importantes quantités de biomasses issues de légumineuses. De même, en plus d'être une source en éléments nutritifs, les effluents d'élevage permettent de réduire l'acidité du sol (Fernades et al., 1997). Des teneurs importantes en lignine et/ou en polyphénol par rapport aux teneurs en N des matières organiques incorporées peuvent diminuer à court terme le taux de décomposition et le N du sol disponible. (Fernandes et al., 1997 ; Yadvinder et al., 2005). Palm et al. (2001) ont développé un outil d'aide à décision afin de déterminer le mode de gestion des apports de biomasses au sol en fonction de leur composition chimique (teneur en N, en lignine et en phénol).

Ainsi selon les disponibilités en matières organiques ou en fertilisants minéraux, les apports en matières organiques ou fertilisants peuvent être « ciblés », c'est-à-dire que l'agriculteur concentre préférentiellement ces apports sur certaines parcelles (e.g. des parcelles proches de l'habitation) ou cultures (e.g. cultures maraîchères, culture de rentes). Le choix des parcelles ou cultures à fertiliser en préférence est motivé généralement par la conviction que ces sites peuvent offrir un retour sur investissement supérieur aux autres en termes financier (cultures à forte valeur ajoutée), de temps de travail (parcelles proches) et/ou de rendement (parcelles considérées comme fertiles) (Fernandes et al., 1997). Cette pratique de fertilisation ciblée peut induire de l'hétérogénéité dans la fertilité du sol et par exemple créer des gradients de fertilité du sol (Giller et al., 2006, Tittonell et al., 2005 ; Tittonell et al., 2007b ; Zingore et al., 2007).

3.2.3 Pratiques impactant les activités biologiques du sol

La macrofaune du sol (e.g. termites, vers de terre) est sensible aux perturbations du sol et à l'utilisation de pesticide. Ainsi il a été noté une diminution de la macrofaune du sol dans les systèmes agricoles mécanisés, à fort niveau d'intrants (Fernandes et al., 1997). De même, les pratiques de cultures sur brûlis entraînent une importante réduction de la macrofaune du sol (Omotayo et Chukwuka, 2009 ; Palm et al., 1996). Les populations de vers de terre diminuent aussi dans les systèmes pastoraux surexploités où la densité du sol augmente (Fernandes et al., 1997).

Au contraire, l'accumulation de matière organique en surface par les pratiques de mulch, de labour réduit, de SCV ou d'agroforesterie favorisent l'activité et la sélection de macro et microorganismes adaptés à des milieux riches en matières organiques (Fernandes et al., 1997). Pour les pratiques d'agroforesterie ou d'engrais vert, l'utilisation de plantes mycorhiziennes (i.e. en association avec des

mycorhizes) telles *Cajanus cajan* ou *Tithonia diversifolia* permet d'accroître la disponibilité en P du sol (Cardoso et Kuyper, 2006).

3.2.4 Conséquences des pratiques en termes de teneur en SOC et en rendement

Les effets des pratiques sur l'augmentation des teneurs en SOC ont fait l'objet de nombreuses études (Tableau 2).

Tableau 2 : Pratiques agricoles ayant des effets positifs sur le stock de carbone organique du sol

Pratiques favorables à l'augmentation du stock de SOC	Références*
Cultures pérennes / Pâtures	Conant and Paustian, 2002 Feller, 1995 IPPC, 2006 Lal, 2008 Li et al., 1997
Bois / Agroforesterie / Jachères	Albrecht et Kandji, 2003 Manlay et al., 2002
Zéro-labour / Labour réduit / Mulch / SCV	Bernoux et al., 2006 Carvalho et al., 2010 Farage et al., 2007 Lal et al., 2007 Scopel et al., 2005 Razafimbelo et al., 2008
Fertilisation organique / Apport fumier	Ammann et al., 2009 Lal, 2008 Palm et al., 1997

SOC : carbone organique du sol ; SCV : Semis direct sous couverture végétales ;

* : liste non exhaustive

Grâce aux multiples interactions entre les propriétés biologiques physiques et chimiques du sol (Figure 1), l'augmentation des teneurs en SOC peut s'accompagner de (1) une amélioration de la structure et du régime hydrique du sol ; (2) une augmentation des organismes du sol et de l'activité biologique du sol ; (3) une augmentation de la libération des éléments nutritifs par décomposition. Ceci pourrait expliquer en partie l'augmentation de la productivité des cultures observée (surtout à long terme) pour les systèmes d'agroforesterie (e.g. Bationo et al., 1998 ; Glover et al., 2012) ; de SCV (e.g. Djigal et al., 2012 ; Giller et al., 2006 ; Scopel et al., 2005) ; l'utilisation d'engrais vert (e.g. Giller et al., 1997 ; Omotayo et Chukwuka, 2009 ; Sanchez et al., 1997 ; Tejada et al., 2008) ; l'utilisation de résidus de cultures (e.g. Bationo et Buerkert, 2001 ; Bekunda et al., 1997 ; Yadvinder et al., 2005) ; l'application de fumier (Bationo et al., 1998 ; Bationo et Buerkert, 2001 ; Bekunda et al., 1997 ; Mando et al., 2005). Cependant, ces améliorations des conditions de sol n'entraînent pas systématiquement une augmentation des rendements car d'autres facteurs peuvent intervenir tels l'immobilisation du N par les microorganismes du sol, la libération de composés toxiques, le développement de maladies fongiques (Fernandes et al., 1997 ; Yadvinder et al., 2005).

3.2.5 Conséquences des pratiques en termes socio-économiques

Les pratiques de SCV ont largement été adoptées par des exploitations agricoles intensives et mécanisées en Amérique du Nord, en Australie et au Brésil, en particulier grâce aux économies en carburant et en temps de travail engendrées par l'arrêt du travail du sol (FAO, 2001). Toutefois, la

rentabilité financière de ces pratiques reste incertaine et est susceptible de varier considérablement d'un site à l'autre (FAO, 2001).

Ainsi, ces pratiques ont rarement été adoptées par les exploitations familiales des pays en développement (Affholder et al., 2010). Dans les systèmes agricoles familiaux, l'augmentation des coûts et les charges de travail générés par les systèmes SVC sont présentées comme des contraintes majeures à leur adoption (Erenstein, 2003 ; Giller et al., 2009). Les agriculteurs des exploitations familiales doivent faire face à des contraintes de sécurité alimentaire et de production à court terme. Pour cela, ils accordent souvent plus d'importance aux coûts et bénéfices réalisés à très court terme au détriment des bénéfices qui pourraient être engendrés à long terme par des pratiques de SCV (Giller et al., 2009).

Au Vietnam, l'adoption des systèmes SCV est principalement freinée par des contraintes économiques (l'achat d'intrants) et de temps de travail (mise en place du mulch). Par rapport aux systèmes conventionnels, les besoins de travail et de liquidités supplémentaires rendent les systèmes SCV souvent moins économiquement intéressants pour les exploitants (au moins la première année). La mise en place de subventions encouragerait les exploitants vietnamiens à l'adoption des systèmes SCV, à condition qu'elles s'élèvent à 10-40% de la marge brute moyenne de ces exploitations (Affholder et al., 2010). En Afrique, où la disponibilité en biomasses est souvent limitée, un mulch ayant un taux de recouvrement du sol trop faible peut mettre en cause l'effet de lutte contrôle des mauvaises herbes présenté avec des systèmes SCV. Ceci entraîne fréquemment une augmentation de la main-d'œuvre (féminine) nécessaire au désherbage. A court terme et sans l'utilisation d'herbicides (le cas dans des systèmes d'agriculture familiale), les pratiques de SCV ne parviendraient donc pas à entraîner des diminutions de la charge totale de travail. A long terme, et avec l'utilisation d'herbicides une diminution de la charge totale de travail semblerait possible (Giller et al., 2009). Dans des exploitations familiales d'agriculture-élevage du Brésil, Alary et al. (2010), soulignent que l'adoption des pratiques de SCV serait principalement due à la mécanisation du semis de maïs (semoirs à traction animale) proposée avec les systèmes SCV. Ces semoirs à traction animale permettent des économies de main-d'œuvre par rapport au semis manuel en système conventionnel.

En raison de l'augmentation de la charge de travail pour la coupe et le transport de la biomasse sur les parcelles, l'utilisation des déchets de l'élagage des arbres (systèmes d'agroforesterie) ou d'engrais verts en tant que sources d'éléments nutritifs ne seraient rentables qu'avec des cultures à forte valeur ajoutée (Sanchez, 2002). En agroforesterie, l'association d'une culture de maïs avec des haies arborées (légumineuses utilisées comme fourrage ou engrais vert) nécessitent 22 à 31% de plus de main d'œuvre que les systèmes de maïs en monoculture sans fertilisation. Cette augmentation de la main d'œuvre est principalement due à la gestion des haies arborées et à l'élagage et/ou l'application de fumier. Seul le système où la biomasse produite par les haies était à but fourrager a présenté un intérêt économique par rapport à la monoculture de maïs (Mathuva et al., 1998).

4 Durabilité

4.1 Concept de durabilité

La durabilité est généralement associée à la définition du développement durable fournie par la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement (WCED) en 1987 : « an approach to progress which meets the needs of the present without compromising the ability of future

generations to meet their own needs » (WCED, 1987). Kates et al. (2001) précisent dans leur définition de la durabilité l'importance de la préservation des ressources naturelles : « meeting fundamental human needs while preserving the life-support systems of planet Earth ». Brown et al. (1987) énumèrent les éléments communs à diverses définitions de la durabilité :

- le soutien continu de la vie humaine sur terre ;
- le maintien à long terme du stock de ressources biologiques et la productivité des systèmes agricoles ;
- le maintien de la qualité de l'environnement et des écosystèmes ;
- des populations humaines stables ;
- des croissances économiques limitées ;
- mettre l'accent sur les échelles locales et l'autonomie.

Ainsi les trois piliers de la durabilité sont la croissance économique, la protection environnementale et le progrès social (Adams, 2006, Todorov and Marinova, 2011). La durabilité fait donc appel à une recherche « interdisciplinaire » (Kates et al., 2001). Cependant pour Adams (2006) la définition proposée par la WCED n'est pas suffisamment précise. Ainsi, selon López-Ridaura et al. (2005), ce concept « vague » de durabilité nécessite d'être redéfini de façon opérationnelle pour des cas spécifiques, en prenant compte des objectifs économiques, environnementaux et sociaux des différents acteurs.

4.2 Indicateurs de durabilité

L'utilisation d'indicateurs est l'une des façons les plus répandues de définir et mesurer la durabilité des systèmes (Kates et al., 2005). Les indicateurs peuvent être définis comme « des grandeurs de nature diverse (données, calculs, observations, mesures), qui fournissent des informations au sujet de variables plus difficiles d'accès ou de systèmes plus complexes » (Bockstaller et al., 2008). Selon Bockstaller et al. (2008) les indicateurs peuvent être classés en trois classes : (i) les indicateurs simples reposant sur des variables ou leur combinaison (e.g. bilan, ratio) ; (ii) les indicateurs prenant en compte des variables du milieu et les pratiques à partir d'un ensemble fonctions mathématiques ou expressions de type « si ... alors » (e.g. indicateurs issus de modèles de simulation tels MELODIE (Chardon, 2008) ou GAMEDE (Vayssières et al., 2009)) ; (iii) les indicateurs issus de mesures estimant les impacts (e.g. mesures de terrain). Ainsi, des bilans en éléments nutritifs (e.g., De Koning et al., 1997 ; Dechert et al., 2005 ; Van Calker et al., 2004 ; Wijnhoud et al., 2003), des indicateurs composites ou index globaux (e.g., Castoldi and Bechini, 2010 ; Nambiar et al., 2001 ; Reig-Martínez et al., 2011) et autres émergie (Campbell and Garmestani, 2012) et exergie (Hoang, 2011) ont été calculés pour caractériser la durabilité. Divers outils ou cadres ont été développés afin d'évaluer la durabilité des systèmes, tels l'Analyse du Cycle de Vie, l'Analyse Coût-Bénéfice, l'étude d'impacts environnementaux et le cadre Principes, Critères et Indicateurs (Van Cauwenbergh et al., 2007). Ainsi, depuis une vingtaine d'années, de nombreuses méthodes basées sur le calcul d'indicateurs ont ainsi été développées pour d'évaluer la durabilité des systèmes agricoles à l'échelle régional, de l'exploitation, de la parcelle ou de la filière (Bockstaller et al., 2009). Certaines de ces méthodes (majoritairement françaises), telles IDEA (Indicateur de Durabilité des Exploitations Agricoles), DAEG (Diagnostic Agri-Environnemental Géographique), MASC (Multi attribute decision model for ex ante Assessment of the Sustainability of Cropping systems), DIAGE (Diagnostic Global d'Exploitation), DIALOGUE (Diagnostic agri-environnemental global d'exploitation), INDIGO (Indicateurs de Diagnostic Global à la parcelle), bilan énergétique PLANETE ou SALCA (Swiss Agricultural Life Cycle Assessment), ont été présentées et évaluées par Bockstaller et al. (2008 et 2009). Par ailleurs, le

cadre Principes, Critères et Indicateurs serait l'outil le plus polyvalent puisqu'il s'agit d'une liste thématique et structurée de principes, de critères et d'indicateurs correspondants (Van Cauwenbergh et al., 2007). Ce cadre Principes, Critères et Indicateurs a été utilisé à différentes échelles d'étude pour l'évaluation de la durabilité des systèmes (e.g., Ayantunde et al., 2011 ; Justin, 2004 ; Lefroy et al., 2000 ; López-Ridaura et al., 2005 ; Van Cauwenbergh et al., 2007).

Tableau 3 : Principes, critères et indicateurs pour l'évaluation de la durabilité des exploitations d'agriculture - élevage des hauts plateaux de Madagascar (adapté de López-Ridaura, 2005)

Principes de durabilité	Critères	Indicateurs	Domaine d'évaluation
Productivité et stabilité			
Production de l'exploitation		Rendements (kg/ha ou kg lait/vache)	Env
		Ecart des rendements (kg/ha ou kg lait/vache)	Env
Profitabilité de l'exploitation		Revenus (\$)	Eco
		Coût production (\$/kg)	Eco
		Bénéfices/coûts	Eco
Autosuffisante alimentaire		Kcal produits/kcal nécessaire au ménage (FSS)	So
Retour sur le travail		Revenus/unités de travail (\$/jour-homme)	Eco
Indépendance par rapport aux intrants extérieurs (engrais, aliments concentrés, etc.)		Dépendance (D)*	Eco/So
		Fourrages importés/total fourrages consommés	
Dégradation du sol		Bilan azoté (kg N/ha)	Env
		Perte N au niveau du sol (kg N/ha)	Env
		Apports de matières organiques au sol (kg/ha)	Env
Résilience, Fiabilité et Adaptabilité			
Revenus off-farm		Revenus agricoles/revenus total de la famille	Eco/So
		Valeur ajoutée par la transformation (\$/kg)	Eco
Risque liés aux pertes de productions		Rendements minimum liés aux années de sécheresse (kg/ha)	Env
Temps nécessaire pour se remettre d'une perte de production		Temps (mois ou années) nécessaire pour se remettre d'un évènement catastrophique (perte d'une récolte, mort d'animaux, crise économique)	Eco/So
Variabilité des rendements liée aux variations climatiques		Variation des rendements en fonction des variations de température (kg/C°)	Env
		Variation des rendements en fonction des variations de précipitation (kg/mm)	Env
Diversité des activités		Niveau d'intégration des activités (FCI)*	Env
		Diversité des activités (H _R) et degrés d'organisation (AMI)*	Env
Investissement initial		Coût de l'investissement (\$)	Eco

* : indicateurs définis dans Rufino et al., 2009 (cf. Chapitre 4) ; FCI : Finn's cycling index ; H_R : statistical uncertainty ; AMI : average mutual information ; Env : Environnemental ; Eco : Economique ; So : Social

L'évaluation de la durabilité des exploitations agricoles par López-Ridaura et al. (2005) est basée sur les principes suivant :

- Productivité : capacité de produire une combinaison spécifique de biens et de services afin de réaliser les objectifs de l'exploitant

- Stabilité : conservation des ressources de bases (ressources naturelles, humaines et économiques)
- Résilience : capacité d'un système à produire à nouveau les biens nécessaires après un « choc » ou « stress »
- Fiabilité : capacité d'un système de produire dans un intervalle de confiance
- Adaptabilité : capacité d'un système à continuer de produire des biens et des services lorsqu'il doit faire face à un changement (interne et/ou extérieur) à long terme ou permanent

Un certain nombre de critères et indicateurs peuvent être déterminés à partir de ces principes pour la caractérisation des exploitations d'agriculture - élevage d'Afrique (Tableau 3).

5 Contexte de l'étude

5.1 Croissance démographique et sécurité alimentaire à Madagascar

Madagascar, présente l'un des plus forts taux annuel de croissance démographique avec un taux moyen de 3,0% entre 1990 et 2010 (World Bank, 2012). Ainsi la population malgache est passée de près de 11,3 millions en 1990 à 20,7 millions en 2010 (Annexe 9). Il s'agit d'une population à majorité rurale, jeune et qui vit en grande majorité sous le seuil de pauvreté défini par la FAO (Tableau 4). Comme dans de nombreux pays en développement, le pourcentage de population rurale est très important (70%) mais tend à diminuer progressivement (Annexe 9).

Tableau 4 : Fiche synthétique des principales caractéristiques de Madagascar (Sources : FAO, 2012 et World Bank, 2012)

Madagascar	
Surface du pays	587 040 km ² dont 70% de surface agricole
Population totale	20 714 000 habitants en 2010 dont 70% de population rurale
Densité moyenne	36 personnes/km ²
Croissance démographique	2,9% de croissance démographique annuelle en 2010
Age de la population	43% de la population entre 0 et 14 ans 54% de la population entre 15 et 64 ans
Pauvreté	81% de la population sous le seuil de 1,25\$/jour/personne 93% de la population sous le seuil de 2,00\$/jour/personne
Alimentation	environ 2120 kcal/personne/jour d'apports énergétiques alimentaires en moyenne (en 2006-2008) environ 1700 kcal/personne/jour de besoin énergétique alimentaire minimum (en 2006 2008) en moyenne 50 g protéines/personne/jour dont 11,4 g d'origine animale

Entre 2000 et 2008, 25 à 28% de la population malgache était considérée comme sous-alimentée. A Madagascar la production alimentaire par personne a baissé globalement de 22, 23 et 20% pour la nourriture de base, le riz et les tubercules, respectivement (Annexe 10). De même l'accès aux denrées alimentaire (riz, lait et viande) pour la population malgache tend à diminuer, avec une baisse de 45 et 36 % pour les offres en lait et viande observée depuis 1980 (Annexe 10).

Madagascar est un des rares pays d’Afrique dont la totalité du sol est décrit comme étant un sol fortement dégradée (Banwart, 2011 ; Annexe 11). Stoorgovel et Smaling (1990) ont calculé pour 2000 une perte annuelle d’éléments nutritifs d’environ 22 kg N/ha, 12 kg P₂O₅/ha et 3 kg K₂O/ha pour l’ensemble de Madagascar.

5.2 Contexte géographique et physique des hauts plateaux malgaches

Les hauts plateaux malgaches représentent 11% de la surface totale du pays et environ 37% de la population. Sur les 64 869 km² de hauts plateaux, près de 93% sont compris entre 1200 et 1800 m d’altitude (Braun et al., 1997). Les principaux sols présents dans la zone des hauts plateaux sont les ferralsols (65%), lithosols (18%) et les cambisols (10%) (Braun et al., 1997).

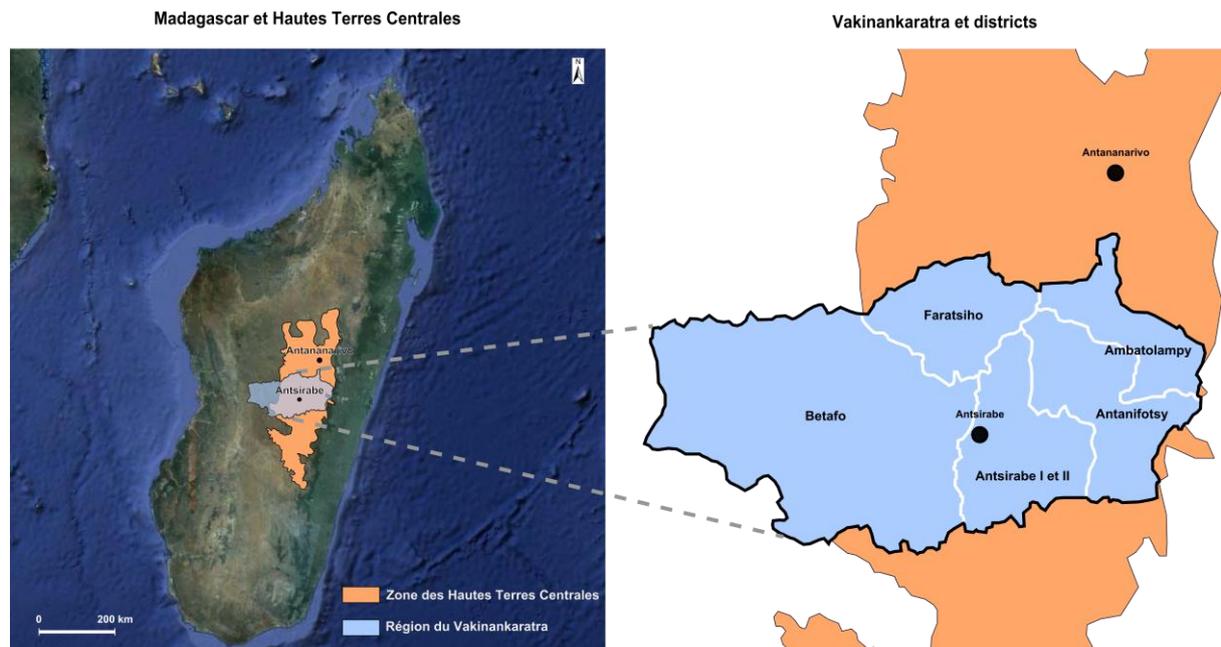


Figure 8 : Carte des Hautes Terres Centrales de Madagascar et de la région du Vakinankaratra

La région du Vakinankaratra, au cœur des Hautes Terres Centrales de Madagascar, a une superficie d’environ 16 599 km², elle est densément peuplée (Annexe 12) et est subdivisée en districts (Figure 8). La densité moyenne du Vakinankaratra est de 103 personnes/km² et la plupart de la population de la région est concentrée dans la ville de Antsirabe, environ 225 965 habitants (INSTAT, 2012).

La région du Vakinankaratra est caractérisée par un climat tropical d’altitude, avec des « étés » (mi-octobre à mi-avril) chauds et humide et des « hivers » (mi-avril à mi-octobre) froids et secs (Figure 9). Dans la classification bioclimatique, la zone du Vakinankaratra appartient à l’étage « subhumide avec des saisons sèches pouvant être atténuées par les brouillards » (Annexe 13).

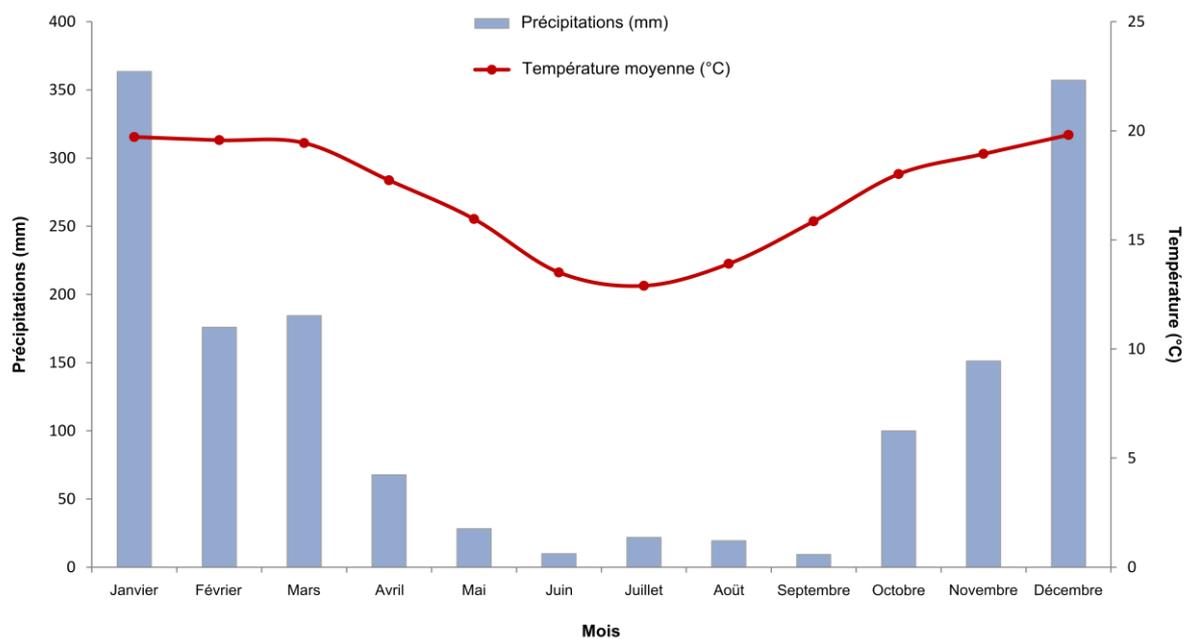


Figure 9 : Données climatiques (précipitations et températures moyennes) de la région du Vakinankaratra (moyennes des données climatiques collectées entre 2008 et 2010 par la station météorologique du Cirad-Scrid – Fofifa)

Les hauts plateaux malgaches ont été décrits comme un hotspot en ce qui concerne la dégradation des sols. Ils sont exposés à de forts niveaux d'érosion hydrique, de dégradation physique et de dégradation chimique (Nyssen et al., 2009). Les ferralsols, majoritaires sur les hauts plateaux, ont été classifiés comme ayant une érodabilité élevée (Braun et al., 1997). L'érosion par ruissellement a été quantifiée à proximité d'Antsirabe, en moyenne à 8-10 t MS de sol/ha/an (Douzet et al., 2008).

5.3 Agriculture familiale agriculture-élevage des Hautes Terres Centrales : riz et élevage bovin

Les exploitations familiales d'agriculture-élevage des hauts plateaux malgaches sont essentiellement basées sur une association riz et élevage bovin laitier. Le paysage agricole de la région distingue les zones de colline (*tanety*) et les zones de bas-fond ; les cultures et l'utilisation des terres varient selon le paysage (Figure 10).

5.3.1 Riz et autoconsommation

La culture du riz est la plus importante : culturellement à base de l'alimentation malgache (Rakoto Ramiarantsoa, 1995), elle assure à elle seule la majorité des apports énergétiques journaliers de la population et elle représente en moyenne 64% de la surface cultivée nationale (FAO, 2005). Le riz est au premier rang des produits agricoles et alimentaires du pays ; il représente près de 30 % des biomasses agricoles produites et 32 % du poids économique total des productions agricoles. Il est traditionnellement consommé matin, midi et soir ; en 2007, près de 420 g/personne/jour étaient consommés en moyenne. Il couvre alors plus de 48% des apports en calories journaliers de la population malgache (FAO, 2012). Dans les zones rurales (zones de production du riz), les apports énergétiques fournis par le riz peuvent dépasser les 70% des apports énergétiques journaliers (FAO, 2005). En moyenne 10% du riz consommé provient d'importations entre 2000 et 2009 (FAO, 2012). La majeure partie du riz malgache provient de rizicultures irriguées de bas-fonds (Figure 10). En contre saison, des fourrages tempérés, des cultures de rentes (*Solanum tuberosum*, *Triticum aestivum*, *Hordeum vulgare*) ou des cultures maraîchères peuvent être mises en place dans les bas-fonds (Figure 10).

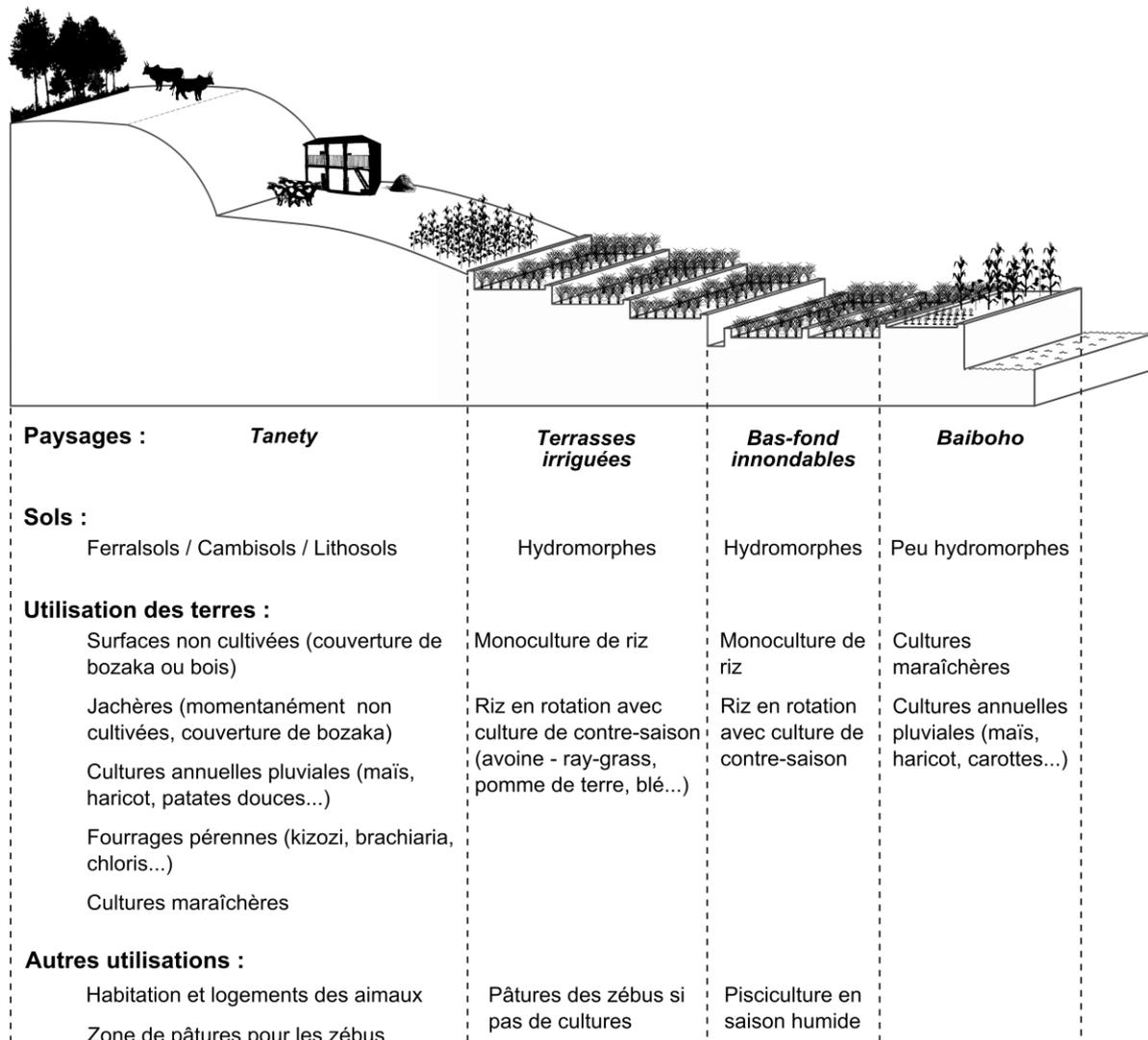


Figure 10 : Organisation du paysage agricole (toposéquence) de la région des hauts plateaux de Madagascar

5.3.2 Élevage bovins laitiers et élevage zébu

La région du Vakinankaratra, située au cœur du « Triangle Laitier » de Madagascar, pourvoit 90 % de la production nationale de lait (Andriamanalina, 2007). Le lait est la quatrième production agricole de Madagascar en termes de quantité, derrière le riz, la viande de zébu et le manioc. Cette production laitière, environ 555 000 tonnes de lait/an en 2009 (FAOSTAT, 2012), est assurée par de nombreuses exploitations familiales d'agriculture-élevage ayant généralement moins de cinq vaches laitières. L'élevage laitier couvre un large panel de systèmes plus ou moins intensifiés, allant d'élevages d'animaux à dominance zébu, peu productifs, nourris essentiellement au pâturage à des élevages d'animaux de race européenne améliorée (Holstein, Pie Rouge Norvégienne), à fort potentiel de production laitière et complémentés (concentrés, drèches). De nombreuses plantes fourragères sont mises en culture pour l'alimentation des bovins laitiers : fourrages pérennes (e.g. *Pennisetum purpureum* Schumach. Cv. Kizozi, *Brachiaria* spp.) cultivés sur les *tanety* et/ou des fourrages tempérés (e.g. *Avena sativa* L., *Lolium multiflorum* Lam.) semés sur les bas-fond en hiver. Par ailleurs, les résidus de cultures (e.g. paille de riz, paille d'orge, paille de blé, rafle de maïs) et la végétation spontanée ou mauvaises herbes (*bozaka*) sont fortement sollicités pour l'élevage bovin (alimentation et litière).

L'élevage de zébus, tout comme le riz, occupe une place essentielle dans la culture et l'économie malgache. En effet, en plus de constituer une force de traction essentielle aux activités agricoles, il est un signe de richesse extérieure. Le zébu malgache joue un rôle important dans les cérémonies traditionnelles (e.g. retournement des morts, mariages). Enfin, la viande de zébu est au rang de seconde production agricole de Madagascar, bien que la consommation en viande de la population reste faible ; en moyenne 20 g viande bovine/personne/jour soit 48% de la quantité de viande consommée quotidiennement (FAO, 2012). Les zébus sont essentiellement nourris de pâtures de *bozaka* dans les zones de *tanety* (Figure 10) et de résidus de cultures sur l'exploitation. Sur les *tanety*, les *bozaka* sont principalement composés de *Heteropogon contortus*, *Aristida multicaulis*, *Imperata cylindrica* (Rakoto Ramiarantsoa, 1995).

5.3.3 Problématique générale pour les exploitations d'agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar

Dans les exploitations d'agriculture-élevage malgaches, il existe une forte pression sur les ressources végétales venant s'ajouter à celle s'exerçant sur les terres agricoles. En effet, ces exploitations sont des systèmes où l'animal a une place très importante : source principale de revenu pour l'élevage laitier, force de traction et rôle social pour l'élevage de zébus. Afin d'assurer l'alimentation de l'élevage bovin, la majorité de la biomasse végétale disponible (fourrages, résidus de cultures, *bozaka*) est exportée des parcelles vers l'animal. Cette pression sur les ressources végétales, et en particulier sur les résidus de cultures, a fortement limité l'adoption des systèmes SCV dans le Vakinankaratra. De plus, dans ces systèmes d'agriculture-élevage où l'autosuffisance en riz est primordiale, la pression sur les bas-fonds est accrue par des cultures successives, riz/fourrages tempérés ou riz/cultures de rente. Les retours de biomasses végétales sur les parcelles sont rares et les apports de matière organique et d'éléments nutritifs sont principalement effectués via le fumier ou les engrais minéraux. Selon la disponibilité en fertilisants, ces apports peuvent être ciblés par les agriculteurs, c'est-à-dire appliqués préférentiellement sur certaines cultures ou parcelles. Ces pratiques (exportation des biomasses végétale, double culture sur bas-fond, fertilisation ciblée) et les différentes utilisations des terres (e.g. cultures annuelles, pérennes, jachères ; Figure 10) peuvent contribuer à accentuer l'hétérogénéité de la fertilité des sols au sein des exploitations. De plus, les ventes des produits agricoles (grains et produit animaux) qui ouvrent le cycle des éléments nutritif (i.e. induisent des sorties d'éléments nutritifs du système, éléments nutritifs qui ne seront donc pas recyclés au sein du système ; Figure 4) peuvent entraîner des bilans déficitaires en éléments nutritifs à l'échelle de l'exploitation si ces exportations ne sont pas compensées par des entrées d'éléments nutritifs en provenance du milieu extérieur (e.g. achats d'engrais, fixation par les légumineuses). L'utilisation des ressources peut alors être de type « minière », entraînant une aggravation de la dégradation des sols (épuisement des sols) au sein de l'exploitation. Cette diminution de la fertilité des sols peut induire une forte baisse de la productivité agricole et ainsi une aggravation de l'insécurité alimentaire.

6 Objectifs de la thèse

6.1 Thèse, questions de recherche et hypothèses :

A partir de cette problématique générale l'objectif de cette thèse est de montrer que la diversité des pratiques de gestion des biomasses (végétale et animale) au sein des exploitations familiales d'agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar conditionne la durabilité des systèmes en

termes de fertilité des sols, de recyclage des éléments nutritifs, de revenus et de sécurité alimentaire.

De cet objectif général découlent quatre sous-questions de recherche :

- Quelles sont les pratiques et les flux de biomasses au sein des exploitations ?
- Quel est l'état et la variabilité de la fertilité des sols au sein des exploitations ?
- Comment évaluer de manière globale les flux d'azote et l'efficacité azotée au sein des exploitations ?
- Quelles options explorer afin d'améliorer l'efficacité des exploitations, les revenus et l'autonomie alimentaire ?

Cette étude s'appuie sur plusieurs hypothèses :

(i) les objectifs de production et les stratégies des exploitants du Vakinankaratra induisent la diversité des pratiques de gestion de la biomasse au sein des exploitations d'agriculture-élevage ;

(ii) l'accès aux intrants, tels que les engrais minéraux, étant généralement limité, l'élevage bovin joue un rôle primordial dans le maintien ou la restauration de la fertilité des sols par le recyclage des fumiers. Toutefois, les pratiques de gestion de ces matières organiques peuvent accentuer l'hétérogénéité de la fertilité des sols;

(iii) l'analyse des flux d'azote et du bilan azoté au sein de l'exploitation génèrent des indicateurs utiles pour évaluer le rôle de l'élevage dans le recyclage des éléments nutritifs ;

(iv) la méthode du « Network Analysis » (Rufino et al., 2009) permet d'évaluer l'impact de changements dans la gestion de la biomasse sur l'efficacité azotée, la productivité et la rentabilité économique de l'exploitation.

6.2 Méthodologie générale et plan de la thèse

La méthodologie générale de ce travail de thèse est illustrée dans le schéma en Figure 11.

Afin de répondre à la question de recherche, nous nous sommes attachés dans une première partie à caractériser la diversité des exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra grâce à une étude typologique basée sur la structure des exploitations, leurs activités culturales et d'élevage, puis à détailler les pratiques observées dans quatre exploitations d'agriculture-élevage suivies (Chapitre 2).

La variabilité de la fertilité des sols au sein des quatre exploitations d'agriculture-élevage a ensuite été analysée en fonction de la place des parcelles dans la toposéquence, du mode d'utilisation des terres et des pratiques de fertilisation organique (Chapitre 3).

Les flux d'azote au sein des exploitations et l'efficacité globale des exploitations ont été déterminés et l'impact de différentes options dans la gestion des intrants et du recyclage de l'azote a été évalué (Chapitre 4).

Enfin une dernière partie traitera de la durabilité des systèmes au vu des résultats des parties précédentes. Cette partie permettra également de discuter de la méthodologie mise en place, des résultats obtenus, et des perspectives de cette étude (Chapitre 5).

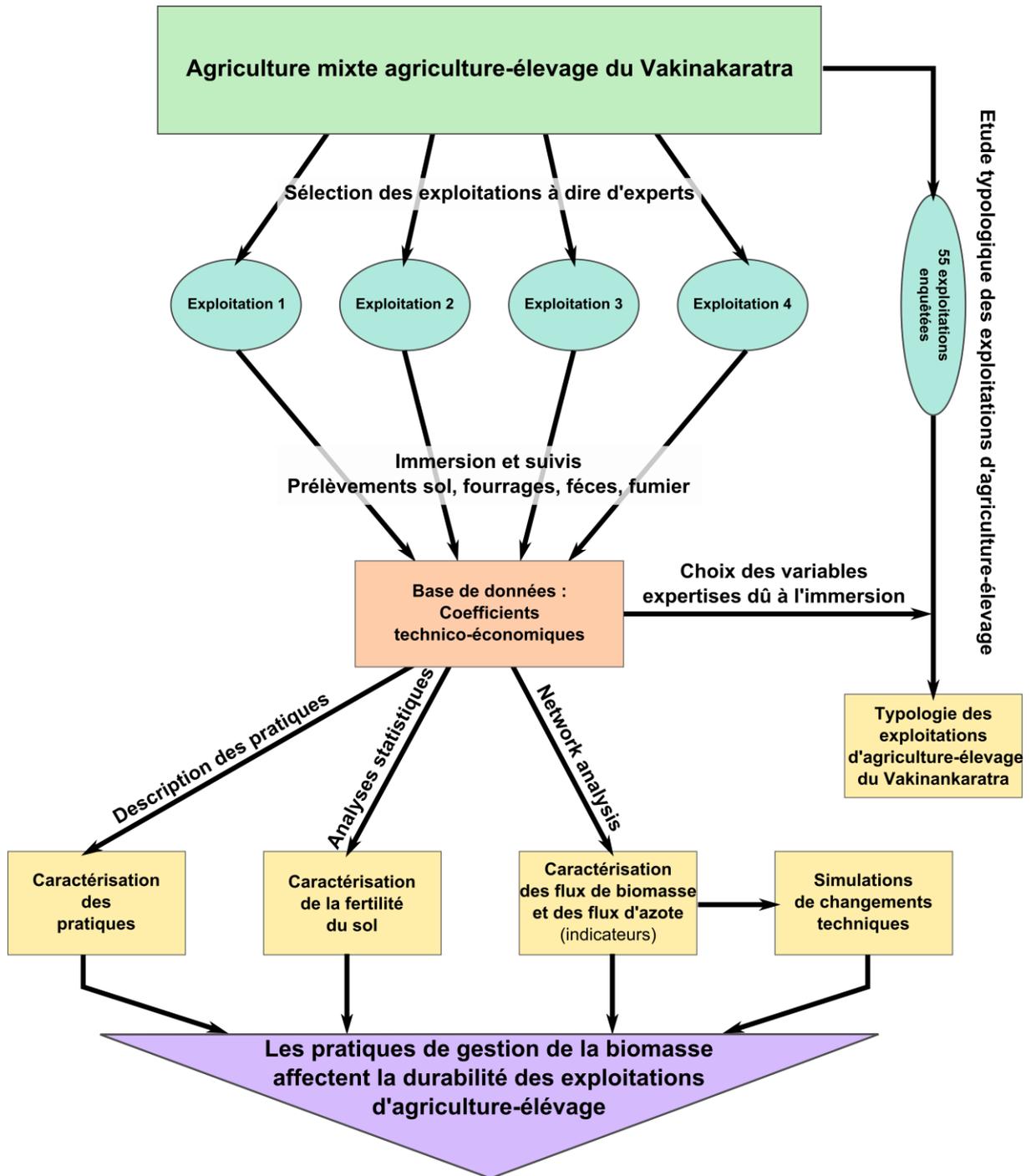


Figure 11 : Structure générale de la démarche méthodologique de cette étude

Chapitre 2 :

Caractérisation des pratiques des systèmes d'agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar

L'évaluation de la durabilité des exploitations familiales d'agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar (Vakinankaratra) nécessite au préalable la connaissance du fonctionnement de ces systèmes d'exploitation, de leur structure et des ressources disponibles en termes d'espace, de temps et de trésorerie.

Objectifs de ce chapitre

Ce chapitre vise à caractériser la diversité des exploitations familiales d'agriculture-élevage du Vakinankaratra et à comprendre le fonctionnement de ces systèmes mixtes.

Méthodologie

Quatre exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra ont été sélectionnées à dire d'experts. Le choix des exploitations s'est appuyé sur des critères de sélection définis par les experts locaux afin d'identifier des exploitations contrastées. Les quatre exploitations d'agriculture-élevage retenues ont été enquêtées par immersion. Une étude typologique (Analyse des Correspondances Multiples) sur une cinquantaine d'exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra a été effectuée afin de caractériser la diversité des systèmes mixtes et de vérifier a posteriori la représentativité des quatre exploitations sélectionnées.

Principaux résultats

L'étude typologique menée dans ce chapitre a révélé l'existence de six types d'exploitations distincts par leurs pratiques d'élevage, de cultures, et/ou leur structure. Les exploitations enquêtées par immersion sont représentatives d'un type d'exploitations et représentatives de l'ensemble des exploitations d'agriculture-élevage ayant une orientation laitière marquée. Les enquêtes par immersion dans les quatre exploitations sélectionnées ont facilité l'accès à l'information et une meilleure interprétation des dires des exploitants et des résultats des enquêtes. Ces enquêtes ont fourni un grand nombre d'informations détaillées sur la structure, l'historique et les pratiques des exploitations. Ceci a permis d'explicitier les flux des biomasses au sein des exploitations, les besoins en main d'œuvre, les périodes de surcharge de travail et les flux financiers des exploitations.

Conclusion

Une grande variabilité des pratiques a été observée en termes d'alimentation du troupeau laitier, de gestion des effluents d'élevage et de fertilisation des cultures. La variabilité des systèmes d'exploitation et des pratiques décrites dans ce chapitre sont susceptibles d'induire des différences en termes de durabilité environnementale (fertilité du sol, recyclage des éléments nutritifs) et de durabilité socio-économique (sécurité alimentaire, marge brute agricole).

Caractérisation des pratiques des systèmes d'agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar

1 Introduction

La population mondiale devrait augmenter de 6,9 milliards de personnes en 2010 (World Bank, 2012) à 7,5 milliards en 2020 (Rosegrant et al., 2001). Cette croissance démographique est accentuée dans les pays en développement où le taux annuel de croissance de la population est de 1,9% entre 1961 et 2010 (World Bank, 2012). En Afrique sub-saharienne ce taux de croissance démographique se maintient depuis 2000 autour de 2,5% (World Bank, 2012).

Madagascar, comme de nombreux pays en Afrique, présente l'un des plus forts taux annuel de croissance démographique (en moyenne 2,4% depuis 2000) accompagné de l'augmentation d'environ 84% de la population totale entre 1990 et 2010 (World Bank, 2012). Cette croissance rapide de la population a eu comme conséquences l'augmentation de la demande alimentaire locale et la diminution de la superficie des terres arables disponibles, qui est passée de 0,29 ha à 0,19 ha par habitant entre 1990 et 2008 (FAO, 2012). Dans les années 2000, la prévalence de la malnutrition à Madagascar était estimée à 38% (Liu, 2010). En effet, depuis 1980, l'offre (production et importation) alimentaire par habitant a diminué de 18, 36 et 45% respectivement pour le riz, la viande et le lait (FAO, 2012).

Pour répondre à cette demande accrue en nourriture dans les pays en développement, et en particulier en produits d'origine animale, intensifier durablement la production est indispensable (Herrero et al., 2009). Une intensification durable implique une croissance de la productivité des systèmes agricoles accompagnée d'une augmentation des services écosystémiques rendus (i.e. services dont les humains bénéficient des écosystèmes, par exemple production alimentaire, séquestration du carbone, production d'oxygène), de l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des intrants, du travail, de la protection du sol et de la biodiversité (Kassam et al., 2011). La conceptualisation de projets d'intensification des exploitations familiales nécessite au préalable de connaître le fonctionnement des systèmes d'exploitation, leur structure et les ressources disponibles (espace, temps et trésorerie). L'objectif de cette étude est donc de comprendre le fonctionnement de ces systèmes mixte d'agriculture-élevage au travers de la caractérisation des pratiques. Pour cela quatre exploitations d'agriculture-élevage ont été sélectionnées ; la structure et l'historique de chaque exploitation sont décrits; les pratiques culturales et d'élevage sont détaillées et l'état des ressources en main d'œuvre et en trésorerie sont étudiés.

2 Matériel et méthodes

2.1 Sélections des exploitations et immersion

2.1.1 *Sélections d'exploitations d'agriculture-élevage représentatives à dire d'experts*

A Madagascar, plus de 90% de la production nationale de lait est fournie par l'ensemble des exploitations d'agriculture-élevage des hauts plateaux (Andriamanalina, 2007). Ces exploitations d'agriculture-élevage sont basées sur l'association de systèmes rizicoles et d'élevage bovin laitiers. Afin de s'assurer de couvrir la diversité de ces systèmes d'agriculture-élevage dans la région du Vakinankaratra, il a été nécessaire de déterminer des critères de sélections avec des experts locaux de compétences diverses (agroéconomiste, agronome, zootechnicien, chargé de développement, acteur de la filière lait) ; il s'agit donc d'une diversité « à dire d'experts ». Lors de la première mission

à Madagascar (mai 2009), la détermination de ces critères a été réalisée à l'aide des partenaires et acteurs locaux : Cirad-Scrid, Fifamanor, BVPI, Roava et ONG Tafa. Les principaux critères retenus pour la sélection de ces quatre exploitations d'agriculture-élevage étaient :

- la localisation géographique ;
- l'effectif bovin ;
- la proportion relative des surfaces de bas-fond et de colline (*tanety*) ;
- l'existence de cultures fourragères de contre-saison ;
- la diversification du revenu agricole par des cultures de rente ;
- l'activité off-farm ;
- la pratique des systèmes de culture sous couvert végétal (SCV) ;
- la réceptivité aux enquêtes et à l'accueil de deux étudiants (français et malgache) pendant une semaine d'immersion sur leur exploitation.

Le contexte de crise politique, économique et en particulier de déstructuration de la filière lait (fermeture de Tiko, principale entreprise de transformation laitière) qui prévalait au démarrage du travail de thèse n'a pas permis d'envisager une étude de terrain à plus grande échelle (50-60 exploitations).

Avec l'aide des techniciens de terrain de BVPI et du Fifamanor, une dizaine d'agriculteurs susceptibles de correspondre aux critères de sélection ont été identifiés et visités. A la suite d'un entretien préliminaire avec ces agriculteurs (juin-juillet 2009), quatre exploitations ont finalement été retenues autour de la ville d'Antsirabe (Tableau 1).

Tableau 1 : Principales caractéristiques des quatre exploitations d'agriculture-élevage sélectionnées sur les hauts plateaux de Madagascar

Expl.	Commune	Surface totale cultivée	Rapport <i>tanety</i> / bas-fond ⁽¹⁾	Taille troupeau bovin	Culture fourragère de contre-saison	Devenir du lait	Diversification du revenu agricole	SCV	Activités ext. ⁽²⁾
		ha	ha/ha	UGB	O/N			O/N	Y/N
1	Andranomanelatra	13.6	2.0	34	O	transformation	porcs, œufs	N	N*
2	Antsoso	6.9	1.3	7	O	vente	blé, porcs	O	O**
3	Manandona	4.8	0.2	12	O	vente	orge, porcs	N	N
4	Ambohimiarivo	2.7	1.2	3	N	auto-consommation	porc	O	N

Expl. : numéro de l'exploitation ; SCV : Système de culture sous couvert végétale ; (1) : rapport des surfaces cultivées de *tanety* et de bas-fond ; (2) : activité extérieure non agricole de l'exploitant ; * : épouse de l'exploitant institutrice ; ** : exploitant avec activité de boucher et négociant de zébu

2.1.2 Immersion : choix méthodologique de pratique du terrain et l'enquêtes

Description de la méthode

La méthodologie d'enquête adoptée est l'immersion aussi appelée observation-participante. Cette méthode, employée fréquemment en ethnologie, anthropologie ou sociologie, a été définie comme le fait de s'efforcer à vivre comme le groupe social étudié dans « le but de saisir son point de vue et son rapport avec la vie » (Malinowski, 2003). Les principes de la méthodologie d'enquête par immersion furent initialement décrits par l'ethnographe B. Malinowski (1884-1942) (Malinowski, 2003) :

- Se couper de sa société d'origine et parvenir à vivre avec le groupe social étudié ;

- Abandonner ses « opinions fausses » et ses « préjugés » ;
- Adopter « les conditions de vie » et participer au quotidien du groupe social étudié (« travailler avec lui », « regarder comment il cultive ses jardins », « écouter le récit de quelques faits folkloriques », « discuter de ses coutumes ») ;
- Acquérir le « sens des bonnes et des mauvaises manières propres » au groupe ;
- Apprendre le langage du groupe, « véhicule même de la pensée » et « s'en servir comme instrument d'enquête ».

L'intégration au groupe social permise par l'immersion facilite la contextualisation des discours et ainsi le travail d'enquête et son interprétation (Gallenga, 2008).

La durée de l'immersion pour les études sociologique ou ethnographique peut être de quelques mois à plusieurs années. Dans notre cas l'immersion s'est limitée à un mois (juillet-août 2009), soit une semaine vivant au sein de chaque exploitation. Cette courte période n'a pas suffi à l'apprentissage de la langue mais a permis d'accéder rapidement au champ lexical malgache de l'exploitation agricole ce qui a facilité les échanges avec les agriculteurs.

Cas d'études

Durant cette période d'immersion dans les quatre exploitations malgaches, nous avons participé activement aux activités quotidiennes de l'exploitant. Il nous a ainsi été permis par exemple de labourer à l'aide de l'*angady* (bêche malgache), semer des fourrages de contre-saison, récolter des pommes de terre, préparer un mulch avec des résidus de cultures de maïs, récolter du fourrage, piler le riz, nettoyer des étables de bovin et de porcs, remplir des charrettes de fumier, etc. Cette implication dans les travaux quotidiens a contribué à l'installation d'un climat de confiance avec l'exploitant.

Un questionnaire détaillé a servi de support lors d'un dernier entretien en fin d'immersion afin de compléter les informations recueillies durant la semaine (questionnaire placé en Annexe 1). Ce questionnaire aborde les thèmes suivant : structure familiale, activités culturelles, activités d'élevage, activités extérieures et flux monétaires (Tableau 2).

La quantification des éléments (rendement de récoltes, fourrages distribués, fumier épandu, etc) s'est avérée délicate car les exploitants pèsent rarement eux même ces éléments. Les indications de mesures étaient souvent formulées en nombre de charrettes, de brouettes, de sacs, de *sobika* (panier en osier) ou en *kapoaka* (équivalent au volume d'une boîte de lait concentré). Il a donc été nécessaire de trouver des équivalents ou procéder à des mesures et pesées afin d'avoir le même référentiel.

Un suivi des agriculteurs a été réalisé à l'occasion des diverses missions qui se sont déroulées entre octobre 2009 et février 2011. La surface de chaque parcelle a été estimée à l'aide d'un GPS (Garmin eTrex Vista®) et d'un logiciel de cartographie (ArcMap 9.3), des prélèvements de sols ont été réalisés et des données manquantes ou complémentaires collectées (e.g. culture par parcelle, précédents culturels, fertilisation par parcelle, âge des parcelles). Un stage a par ailleurs été initié avec un étudiant malgache pour évaluer les rendements en riz et en maïs dans les quatre exploitations de l'étude. Les estimations de rendements fournies par les agriculteurs ont été comparées, quand cela était possible, avec des références bibliographiques locales. Ces références ont constitué les seules données de base lorsqu'aucune estimation ou aucune mesure directe des rendements n'a pu être effectuée. (e.g. GSDM, 2008 ; MAEP, 2012).

Tableau 2 : Structure générale du questionnaire utilisé lors des enquêtes par immersion

Thèmes généraux	Données recueillies
Caractéristiques générales de l'exploitation et de la famille	- Histoire de la famille depuis l'installation - Composition de la famille et de la force de travail familiale et permanente
Activités culturelles	- Surface totale de l'exploitation et type du sol (<i>tanety</i> , bas-fond) - Distribution des cultures (types de cultures, par type de sol, surfaces par cultures) - Productivité agricole (estimation rendements, parties vendues et autoconsommées) - Gestion de la main d'œuvre (permanente et extérieure) - Nature et quantité des intrants - Itinéraires techniques pour les principales cultures
Activités d'élevage	- Effectifs des bovins par race, sexe, stade physiologique - Effectifs des autres animaux (volailles et porc) - Variation des stocks d'animaux (achats et ventes) depuis 12 mois - Temps de travail pour l'activité élevage - Nature de l'alimentation et quantités distribuées - Production laitière journalière moyenne - Produits laitiers commercialisés (quantité et prix) - Gestion des effluents d'élevages - Charges non alimentaires liées à l'élevage
Activités extérieures	- Types d'activité - Temps consacré à ces activités - Coûts et/ou ressources engendrés - Autres sources de revenus
Flux monétaires	- Dépenses pour l'éducation - Dépenses pour l'alimentation et l'entretien du foyer - Dépenses exceptionnelles depuis un an - Crédits (montants et modalité de remboursement) - Epargne

2.2 Vérification de la représentativité des exploitations

Afin de vérifier la représentativité des exploitations sélectionnées à dire d'expert, une typologie a été réalisée *a posteriori* pour caractériser la diversité des pratiques et des modes de fonctionnement des exploitations d'agriculture-élevage dans la région du Vakinankaratra. Cette typologie a été élaborée à partir d'enquêtes menées auprès de 55 exploitations d'agriculture-élevage (Beauvais, 2010).

Le choix des variables retenues pour l'analyse typologique a été guidé par l'expertise et la connaissance des systèmes acquises lors des immersions en exploitation. De plus, l'un des objectifs de cette étude typologique est la production d'un outil de classification des exploitations d'agriculture-élevage accessible à partir d'enquêtes relativement simples. Les variables retenues (27 variables, Tableau 3) abordent les thèmes suivants :

- localisation géographique des exploitations ;
- structure de l'exploitation (surfaces et élevages) ;
- caractéristiques de l'élevage laitier ;
- type de cultures sur *tanety* et sur bas-fond ;
- utilisation de fumier et des engrais minéraux pour la fertilisation des cultures.

Chaque variable quantitative a été transformée en variable qualitative après un examen attentif de la distribution des élevages. Les exploitations ayant des valeurs manquantes pour l'une des variables (i.e. 5 agriculteurs) ont été écartées de l'analyse. Le tableau final obtenu (i.e. tableau disjonctif) croise 50 agriculteurs (en ligne) et 79 modalités issues de 27 variables (en colonnes). Chaque intersection d'une ligne et d'une colonne a été codée « 1 » si la modalité est présente chez l'agriculteur, « 0 » sinon. Ce codage est un moyen de transcrire les différentes réponses faites par l'agriculteur aux questions de l'enquête.

Une Analyse des Correspondances Multiples (ACM) a été effectuée afin d'analyser les corrélations entre les modalités, et les relations entre les exploitations sur un plan défini par les composantes principales (i.e. plan factoriel). L'ACM est une AFC (Analyse Factorielle des Correspondances) sur le tableau disjonctif (variables disjointes en modalités, tableau ne contenant que des « 0 » et des « 1 »). L'analyse consiste à rechercher une première combinaison linéaire des modalités initiales (un axe) qui passe au plus près possible de tous les points du « nuage », c'est-à-dire qui maximise la variance totale des projections sur cet axe ; puis une seconde combinaison linéaire, orthogonale à la première, maximisant la variance totale des projections sur cet axe (Lebart et al., 2006) ; ainsi de suite. L'ACM vise à mettre en évidence les relations entre les modalités des différentes variables et les relations entre les individus statistiques (i.e. les exploitations). Elle permet d'identifier les caractéristiques (i.e. modalités) qui sont fréquemment associées dans une même exploitation. L'ensemble des modalités et les 50 exploitations sont alors représentées sur les différents plans factoriels (Figure 1 et 3). Plusieurs exploitations seront d'autant plus proches qu'elles auront un grand nombre de modalités de variables en commun. Deux modalités seront d'autant plus proches (i.e. corrélées) que le nombre d'exploitation chez lesquelles ces modalités sont associées est élevé. L'examen des contributions des modalités à chaque axe (i.e. fraction de la variance associée à un axe liée à une modalité donnée) constitue un moyen d'aide à l'interprétation. Pour faciliter le travail d'interprétation des axes de l'ACM, pour chaque axe, seulement les modalités dont la contribution absolue est supérieure à 2 fois la contribution moyenne ont été prises en compte. Cette étape a permis d'identifier et de hiérarchiser les variables-clés, c'est-à-dire celles qui discriminent le plus les exploitations entre-elles.

Par la suite, les exploitations ont été regroupées en différents types d'exploitations d'agriculture-élevage à l'aide d'une Classification Ascendance Hiérarchique (CAH). La CAH réalisée sur les coordonnées factorielles de l'ACM permet de classer les individus en groupes homogènes par rapport à un critère de similarité donné. La CAH procède à des regroupements par étapes successives. Les regroupements successifs sont schématisés sous forme d'un dendrogramme (Figure 2), où la hauteur d'un palier reflète une mesure de dissemblance entre les classes (ou distance entre les regroupements). La coupure du dendrogramme à un niveau de hauteur donné permet d'obtenir des partitions des exploitations en différentes classes ou groupes. La méthode de Ward, méthode de variance minimale, a été utilisée pour la classification. Cette méthode vise à trouver des agrégats sphériques en minimisant l'augmentation de l'inertie totale intra-groupe. Ainsi, en utilisant le critère de Ward, les groupes obtenus sont ceux qui ont à la fois la variance intra-groupe la plus faible et la variance inter-groupes la plus élevée (Lebart et al., 2006). L'interprétation des classes obtenue par l'ACM a été réalisée grâce à la description des composantes principales par les modalités ayant les plus fortes contributions, ainsi que par le test statistique « Vtest » fournissant les modalités significativement ($p < 0.05$) présentes ou absentes dans chaque classe. Toutes les analyses statistiques ont été effectuées sur le logiciel R (R Development Core Team, 2012).

Tableau 3 : Descriptifs des variables et modalités retenues pour l'analyse typologique et distributions des exploitations

Variables	Code variable	N° modalité	Description de la modalité	Nombre d'expl.*
Localisation géographique				
District	disQ	1	Antsirabe	23
		2	Faratsiho	4
		3	Betafo	23
Structure et dimensions				
Surface cultivable sur <i>tanety</i> (are)	sctQ	1	<= 30	12
		2	]30-60]	10
		3	]60-150]	13
		4	>150	15
Surface cultivable en bas-fond (are)	scbQ	1	<= 20	14
		2	]20-40]	10
		3	]40-120]	17
		4	>120	9
Effectif bovin laitier (nombre d'animaux)	effQ	1	<= 2	21
		2	3-4	17
		3	5-8	10
		4	>8	2
Effectif vache laitière (nombre d'animaux)	nvlQ	1	1	25
		2	2	17
		3	3-4	6
		4	>=5	2
Effectif porcin (nombre d'animaux)	epoQ	1	Aucun	19
		2	1	14
		3	]2-4]	11
		4	>4	6
Effectif volaille (nombre d'animaux)	evoQ	1	0	6
		2	]0-20[	31
		3	]20-60[	10
		4	>=60	3
Type d'élevage laitier et conduite				
Race bovine dominante	racQ	1	Pie Rouge Norvégienne (PRN)	19
		2	Holstein, croisés Holstein, croisés PRN	9
		3	Zébus et croisés zébu (Rana)	22
Production laitière au pic (litres / jour)	picQ	1	<= 7	12
		2	]7-15]	19
		3	]15-20]	12
		4	>20	7
Fourrage principal de la ration (hiver)	fprQ	1	Paille de riz	13
		2	<i>Bozaka</i>	23
		3	Tige et feuille de patate douce	6
		4	Divers dont fourrages cultivés	8
Distribution des fourrages à volonté	volQ	0	Non	42
		1	Oui	8
Distribution de concentré	conQ	0	Non	21
		1	Oui	29
Pratique du pâturage	patQ	0	Non	29
		1	Oui	21
Conduite / logement de jour	tloQ	1	Etable permanente	38
		2	Divagation ou attache au piquet	12
Type de sol étable	solQ	1	Sol nu	29
		2	Dalle, pierre	12
		3	Sol bétonné	9

Variables	Code variable	N° modalité	Description de la modalité	Nombre d'expl.*
Gestion des effluents d'élevage	effl	1	Retrait litière fréquent Ajout effluent volaille Pas d'ajout de végétaux au tas de fumier	20
		2	Litière de <i>bozaka</i> ou résidus Ajout et retrait de litière peu fréquent Pas d'ajout de cendre ou d'effluent de volaille au fumier	8
		3	Litière de résidus de culture Ajout de litière très fréquent (tous les jours) Pas d'ajout de cendre ou d'effluent de volaille	16
		4	Pas d'ajout de litière mais retrait très fréquent Ajout de végétaux au tas de fumier	6
Types de cultures sur <i>tanety</i> et sur bas-fond				
Type de cultures sur <i>tanety</i>	cult	1	Sans spécificité / Absence haricot-maïs	6
		2	Riz <i>tanety</i> / Tubercules (Pomme de terre) / Brachiaria	16
		3	Fourrages (Kizozhi-Chloris) Absence de maraîchage et de tubercules	14
		4	Tubercules-maraîchage / Absence de fourrage	14
Cultures principales sur <i>tanety</i>	sdtQ	1	Maïs-haricot	27
		2	Plantes fourragères	8
		3	Autres	15
Fourrage sur <i>tanety</i>	ftaQ	0	non	10
		1	oui	40
Type de cultures en bas-fond	culb	1	Riz / Fourrage de contre-saison Absence de culture de rente en contre saison	22
		2	Riz / Culture de rente possible diversification dont fourrages	21
		3	Riz Absence ou peu de culture de contre-saison	7
Fourrages de contre-saison sur bas-fond	fcsQ	0	non	9
		1	oui	41
Culture de rente sur bas-fond	ccbQ	0	non	16
		1	oui	34
Fertilisation organique et minérale				
Epannage en bas-fond**	epbQ	0	non	7
		1	oui	43
Achat fumier	afuQ	0	non	31
		1	oui	19
Vente fumier	vfuQ	0	non	37
		1	oui	13
Achat engrais minéral NPK	anpQ	0	non	11
		1	oui	39
Achat Urée	aurQ	0	non	5
		1	oui	45

* : nombre d'exploitation par modalité ; ** tous les 50 agriculteurs retenus avait indiqué utiliser du fumier pour fertiliser des cultures en *tanety*. La variable a donc été écartée

Les variables « Gestion des effluents d'élevage », « Type de cultures sur *tanety* », « Type de cultures en bas-fond » sont elles-mêmes issues de sous-typologies élaborées, respectivement, à partir des pratiques de gestions des effluents d'élevage, des cultures cultivées sur *tanety* et des cultures cultivées sur bas-fond.

3 Résultats et discussion

3.1 Typologie pour le Vakinankaratra et vérification de la représentativité des exploitations

3.1.1 *Caractéristiques de la typologie des exploitations agriculture-élevage*

L'Analyse des Correspondances Multiples (ACM) a permis de sélectionner les cinq premières composantes principales (Annexe 2) grâce auxquelles est expliquée 72 % de la variabilité totale. Le plan factoriel défini par les deux premières composantes principales permet à lui seul d'expliquer 36% de la variabilité des exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra (Figure 1 et 3).

Les valeurs positivement élevées sur le premier axe (Axe 1) représentent les exploitations d'agriculture-élevage ayant des troupeaux bovins laitiers importants : nombre de vaches laitières supérieur à 8 (effQ.4, nvlQ.4), vaches de race Pie Rouge Norvégienne (racQ.1), à forte productivité laitière (picQ.4), nourries avec des fourrages apportés à volonté (volQ.1), en étables sur sol bétonné (solQ.3), diversification de l'élevage vers le petit élevage (epoQ.4, evoQ.4), et absence de culture de maïs grain-haricot sur *tanety* (cult.1) (Figure 1). Ces exploitations s'opposent sur l'Axe 1 à des exploitations pratiquant le pâturage (patQ.1). L'Axe 2 met principalement en opposition les exploitations avec des troupeaux moyens (effQ.2, nvlQ.2) sans emploi de litière pour l'étable (efflQ.4), et les exploitations ayant les plus petites surfaces en bas-fond (scbQ.1), sans culture de contre-saison (culb.3, fcs.0) et des ajoutant fréquemment des résidus de culture pour composer la litière animale. L'Axe 3 quant à lui sépare principalement les exploitations qui ne font pas de cultures de contre-saison sur bas-fond, qui n'achètent pas d'engrais minéral mais vendent du fumier, et les exploitations qui cultivent des fourrages et des cultures de rentes en contre-saison sur bas-fond et qui achètent du fumier (Figure 1).

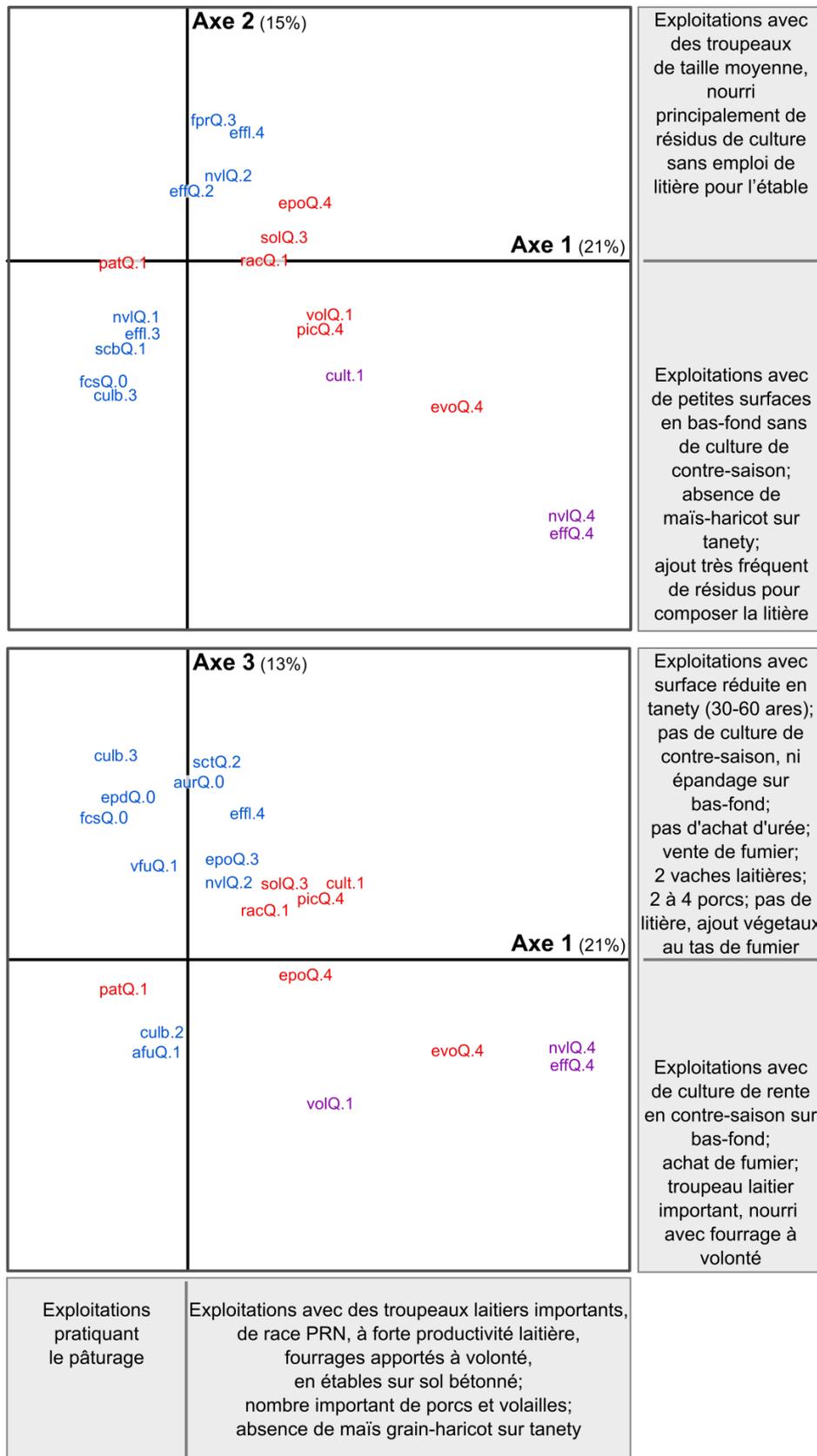


Figure 1 : Plans factoriels 1-2 et 1-3 de l'ACM ; seules les modalités ayant des contributions deux fois supérieures à la moyenne théorique des contributions sont représentées ; les modalités de couleur rouge sont explicatives de l'axe horizontal, Axe 1 ; celles en bleu sont des modalités explicatives des axes verticaux (Axe 2 ou Axe 3) ; celles en violets contribuent à l'explication de l'Axe 1 et de l'axe vertical.

La CAH permet de séparer les 50 exploitations en six classes d'exploitation d'agriculture-élevage (Figure 2). Une classe avec seulement deux exploitations (1 et 55) est créée très tôt dans la partition.

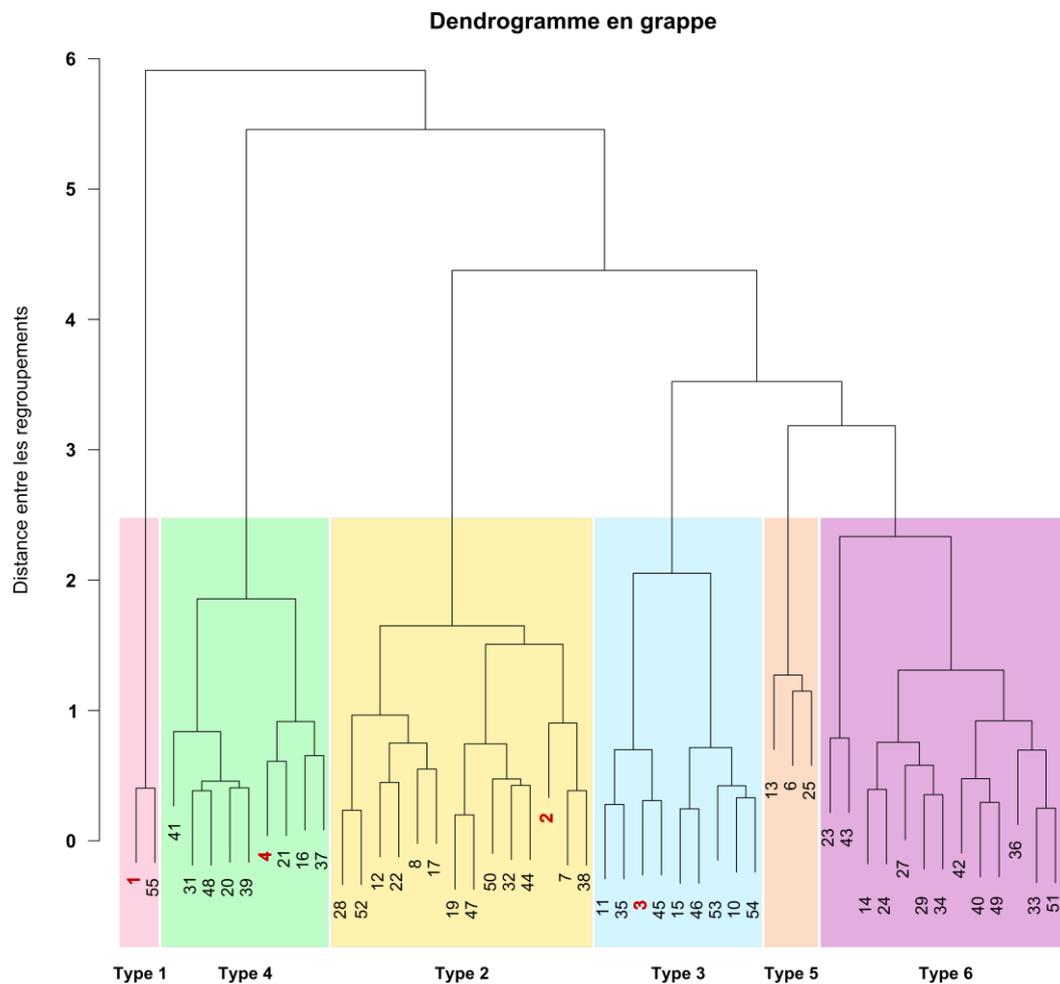


Figure 2 : Dendrogramme obtenu à partir de la Classification Ascendante Hiérarchique, permettant une classification des 50 exploitations d'agriculture-élevage retenues pour l'analyse typologique ; chaque numéro représente une exploitation d'agriculture-élevage, chaque couleur représente un groupe distinct. Les quatre exploitations choisies pour l'immersion sont numérotées de 1 à 4.

3.1.2 Caractéristiques des différents types d'exploitations agriculture-élevage dans le Vakinkaratra

Six types d'exploitations d'agriculture-élevage ont été déterminés grâce à l'ACM couplée avec la CAH (Figure 3). Le type 1 et le type 4 se distinguent clairement des autres types. De plus ils s'opposent sur l'axe 1. Les types 2, 3, 5 et 6 restent cependant assez regroupés au centre des plans factoriels. Néanmoins les projections des types 5 et 2 ont tendance à s'opposer à celles des types 6 et 3 sur l'axe 3. Les projections des types 2 et 6 se superposent légèrement sur les plans Axe 1–Axe 2 et Axe 1–Axe 3. Mais ces deux types sont bien disjoints sur le plan factoriel Axe 1–Axe 4 ; ils s'opposent sur l'axe 4 qui distingue principalement les troupeaux de race PRN (valeurs positives) des troupeaux de race à dominante zébu (rac.3) et à faible productivité (pic.1) (Annexe 3).

La caractérisation des types fournis par l'ACM a été réalisée à l'aide de l'interprétation des axes par les modalités et des projections des types sur les axes (Figure 1 et Figure 3), ainsi que grâce aux résultats du « Vtest » sur l'ACM (Tableau 4) et à la répartition des modalités dans chaque groupe typologique (Annexe 4). Dans l'ensemble, les caractéristiques et pratiques liées aux activités d'élevage (laitier, porcin et/ou volailles) se révèlent être les variables principalement discriminantes

dans cette étude typologique. Peu de variables liées aux activités culturelles caractérisent les types d'exploitations d'agriculture-élevage obtenus ; c'est le cas par exemple pour les surfaces culturelles de *tanety*, le type de cultures sur *tanety* ou la culture de fourrages de contre-saison sur bas-fond.

Type 1 : Exploitations avec grands élevages intensifs hors-sol, race Pie Rouge Norvégienne (PRN), importante diversification avec volailles et porcs, cultures fourragères. Les exploitations du type 1 (n = 2) sont majoritairement dans le district d'Antsirabe. Elles sont caractérisées par un important troupeau laitier (> 5 vaches laitières), de race PRN avec une forte productivité (production au pic de lait ≥ 20 L/j/vache). Les animaux sont en stabulation permanente (étables « en dur » sur sol bétonné), nourris à volonté avec des fourrages divers cultivés sur l'exploitation (bas-fond et *tanety*) et complétés avec des concentrés (provende et drèche de brasserie). Ces exploitations possèdent les plus grandes surfaces cultivables en bas-fond (riz et fourrages en contre-saison) et en *tanety* (cultures diverses dont les cultures fourragères, mais sans les cultures de haricot et de maïs-grain associées). Ces exploitations présentent une importante diversification de l'élevage par le petit-élevage, avec un nombre important de porcs (> 4) et de volailles (> 60).

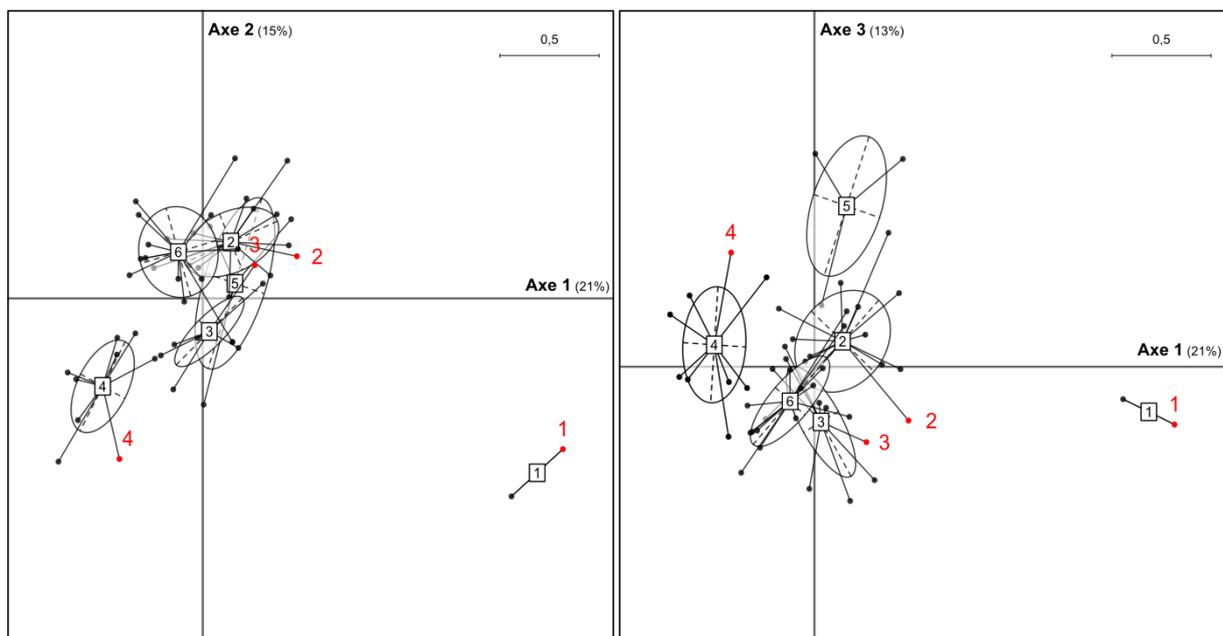


Figure 3 : Représentation des cinq types d'exploitations d'agriculture-élevage issues de l'ACM dans les plans factoriels définis par les trois premières composantes principales. Les points rouges indiquent l'emplacement dans l'ACM quatre exploitations sélectionnées pour notre étude.

Type 2 : Exploitations avec peu de vaches laitières, race européenne, importante diversification avec porcs. Les exploitations du type 2 (n = 14) ont des troupeaux laitiers de petite taille (environ 2 vaches laitières par exploitation) avec des animaux de type européen (PRN ou Holstein, avec un pic de production d'au moins 7 L/j/vache). Les surfaces cultivées sur *tanety* sont assez étendues (≥ 60 ares) et principalement cultivées en association maïs grain - haricot. Tous les agriculteurs possèdent des cultures fourragères sur *tanety* et sur bas-fond. Ces exploitations présentent une diversification vers l'élevage porcin (plus de quatre animaux).

Type 3 : Exploitations de petite surface de tanety, troupeau laitier nourri avec des fourrages à volonté, sans pâture. Les exploitations du type 3 (n = 9) sont caractérisées par des surfaces de *tanety* réduites, ≤ 60 ares, voire même ≤ 30 ares pour plus de la moitié des agriculteurs (5 sur 9). Les troupeaux laitiers sont généralement de un ou deux animaux (7 sur 9) mais peuvent aussi atteindre

exceptionnellement cinq à huit animaux (1 sur 9). Ils peuvent être alimentés avec des fourrages distribués à volonté (4 sur 9) mais aucun bovin laitier n'est conduit au pâturage. Ces exploitations se rencontrent principalement (8 sur 9) dans le district de Antsirabe.

Type 4 : Exploitation avec troupeau laitier très réduit, race croisée européenne avec zébu, faible production laitière, possibilité de pâturage, diversification avec volaille, sans culture fourragère de contre-saison. Ces exploitations (n = 9) possèdent des troupeaux laitiers de taille réduite, limités à une seule vache laitière pour la majorité d'entre eux. Les animaux sont issus de croisements entre races européennes et zébus. La production laitière est généralement faible ayant une production au pic de lactation ≤ 7 L/j/vache (5 sur 9). Le fourrage principal est en général composé de *bozaka* (6 sur 9), ou de fourrage divers cultivés. La gestion des effluents dans ces exploitations est principalement basée sur un ajout très fréquent (au moins une fois tous les jours) de litière végétale essentiellement composée de résidus de culture, et l'absence d'ajout au tas de fumier de cendre ou d'effluents de volaille. Les surfaces de bas-fond sont généralement inférieures à 20 ares (7 sur 9) et sont principalement utilisées en contre-saison pour des cultures de rente (peu ou pas de fourrage). Un élevage de volailles compris entre 20 et 60 têtes est fréquent dans ce groupe d'exploitations.

Type 5 : Exploitation avec troupeau laitier de taille moyenne, avec pratique de la divagation, cultures fourragères essentiellement sur tanety et aucun achat d'engrais minéraux. Les exploitations du type 5 (n = 3) sont caractérisées par la présence d'un troupeau laitier de taille moyenne (entre 3 et 8 animaux), avec un effectif de vaches laitières compris entre 2 et 4. Les animaux ne sont pas en stabulation permanente mais conduits en divagation ou attachés à l'extérieur. Les étables ont généralement un sol dallé (2 sur 3). Sur une surface de *tanety* inférieure à 60 ares sont cultivés majoritairement des fourrages. La plupart des exploitations n'ont aucune culture fourragère de contre-saison sur bas-fond (2 sur 3). Les fourrages principalement utilisés en saison sèche sont les *bozaka* et pailles de riz ; aucune exploitation ne distribue les fourrages à volonté. L'élevage de volailles est limité à moins de 20 têtes permanentes. Les exploitations n'achètent généralement pas d'engrais minéraux tel NPK ou urée (2 sur 3).

Type 6 : Exploitation avec troupeau laitier de race majoritairement zébu, avec divagation des animaux. Les exploitations du type 6 (n = 13) ont des troupeaux laitiers avec généralement une ou deux vaches laitières (10 sur 13) et de race à dominante zébu. Les animaux sont majoritairement conduits hors de l'étable durant la journée (en divagation ou attachés à un piquet) et sont emmenés aux pâturages (10 sur 13). Aucune exploitation ne distribue les fourrages à volonté ; les fourrages généralement distribués sont les *bozaka* et paille de riz (9 sur 13).

Les principales distinctions entre le type 5 et le type 6 sont liées à l'absence d'achat d'engrais minéraux et l'absence de cultures fourragères de contre-saison pour le type 5 (2 sur 3). Cependant ces deux derniers groupes typologiques pourraient être unifiés au sein d'un seul type possédant des animaux majoritairement zébu (type 5b). Cette fusion est envisageable par le fait que le type 5 ne comporte que trois exploitations, que la séparation entre le type 5 et le type 6 est « tardive » dans la partition (Figure 2) et qu'il y a des modalités communes, caractérisant à la fois ces deux types par leur présence (effQ.2, effQ.3, racQ.3, evoQ.2, volQ.0, tloQ.2, ftaQ.1) ou leur absence (fprQ.4, volQ.1, solQ.3). Ainsi ce nouveau groupe (type 5b) pourrait alors être caractérisé par des exploitations ayant des troupeaux laitiers de taille moyenne (généralement entre 3 et 8 animaux) de race majoritairement zébu (13 sur 16), ne pratiquant pas la stabulation permanente (10 sur 16), et des

fourrages non distribués à volonté (16 sur 16). La typologie des exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra pourrait donc se résumer à cinq groupes typologiques.

3.1.3 Vérification de la représentativité des exploitations sélectionnées

Les exploitations sélectionnées pour notre étude, exploitations 1, 2, 3 et 4 dans l'ACM, appartiennent à des types d'agriculture-élevage différents, respectivement les types 1, 2, 3 et 4 (Figure 3). Les exploitations choisies pour l'immersion sont donc représentatives et couvrent bien une large partie de la variabilité des exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra : quatre groupes sur cinq, soit 68% des 50 exploitations enquêtées. La sélection des exploitations d'agriculture-élevage à dire d'experts a donc bien permis de couvrir la plus grande part de la variabilité de la région. La zone d'étude étant dans le « Triangle Laitier » de Madagascar, centre de production laitière du pays, l'étude s'oriente délibérément vers les exploitations d'agriculture-élevage ayant une orientation laitière marquée. Ainsi lors de la définition des critères de sélection des exploitations à dire d'experts, cela s'est traduit par la participation des experts locaux de l'élevage laitier qui accompagnent des troupeaux laitiers « améliorés », c'est-à-dire montrant des signes d'intensification de la production laitière. Ainsi le groupe des exploitations ayant des troupeaux laitiers à dominante zébu et ne pratiquant pas la stabulation permanente (animaux en divagation et/ou animaux attachés à l'extérieur et/ou pratique du pâturage), c'est-à-dire le type 5b, n'est pas représenté dans notre étude. La représentativité de notre étude se limite davantage aux exploitations d'agriculture-élevage présentant des signes d'intensification de l'activité lait : animaux de race à dominante européenne (croisés à purs) et la stabulation permanente.

Tableau 4 : Modalités significativement ($p < 0.05$) présentes ou absentes dans chaque type d'exploitation d'agriculture-élevage

Type	Modalité représentée dans le type	Modalité absente dans le type
Type 1	Exploitations avec grands élevages intensifs hors-sol, race PRN, importante diversification avec volailles et porcs, cultures fourragères	
<i>disQ.1</i>	Antsirabe	<i>nvIQ.1</i> Effectif vache laitière : 1
<i>effQ.4</i>	Effectif bovin laitier > 8	<i>volQ.0</i> Fourrage non distribué à volonté
<i>nvIQ.4</i>	Effectif vache laitière ≥ 5	<i>solQ.1</i> Sol de l'étable nu
<i>racQ.1</i>	Pie Rouge Norvégienne (PRN)	<i>evoQ.2</i> Effectif volaille ≤ 20
<i>picQ.4</i>	Production au pic de lactation > 20 L/j	<i>sdtQ.1</i> Culture principale sur <i>tanety</i> (en surface) : maïs grain-haricot
<i>fprQ.4</i>	Fourrage principale : divers dont fourrages cultivés	<i>ccbQ.1</i> Culture de rente sur bas-fond
<i>volQ.1</i>	Fourrage distribué à volonté	<i>anpQ.1</i> Achat de NPK
<i>solQ.3</i>	Sol de l'étable bétonné	
<i>evoQ.4</i>	Effectif volaille ≥ 60	
<i>epoQ.4</i>	Effectif porcin > 4	
<i>sctQ.4</i>	Surface cultivable sur <i>tanety</i> > 150 ares	
<i>cult.1</i>	Sans spécificité / Absence haricot-maïs grain	
<i>sdtQ.3</i>	Culture principale sur <i>tanety</i> (en surface) : autres	
<i>scbQ.4</i>	Surface cultivable sur bas-fond > 120 ares	
<i>culb.1</i>	Riz / Fourrage de contre-saison	
<i>ccbQ.0</i>	Pas de culture de rente sur bas-fond	
<i>anpQ.0</i>	Pas d'achat de NPK	

Type	Modalité représentée dans le type	Modalité absente dans le type
Type 2	Exploitations avec peu de vache laitière, race non zébu, importante diversification avec porcs	
	<i>nvQ.2</i> Effectif vache laitière : 2	<i>racQ.3</i> Zébus et croisés zébu (Rana)
	<i>sctQ.3</i> Surface cultivable sur <i>tanety</i> de 60 à 150 ares	<i>effl.3</i> Ajout litière très fréquent (au moins tous les jours) / Litière principale de résidus de culture / Absence d'ajout de cendre et d'effluent volaille
	<i>epoQ.4</i> Effectif porcin > 4	
Type 3	Exploitations de petite surface de <i>tanety</i>, troupeau laitier nourri avec des fourrages à volonté, sans pâture	
	<i>disQ.1</i> Antsirabe (8 agriculteurs sur 9)	<i>volQ.0</i> Fourrage non distribué à volonté
	<i>volQ.1</i> Fourrage distribué à volonté	<i>patQ.1</i> Pratique de pâture
	<i>patQ.0</i> Pas de pratique de pâture	
	<i>sctQ.1</i> Surface cultivable sur <i>tanety</i> ≤ 30 ares	
Type 4	Exploitations avec troupeau laitier très réduit, race croisée européenne, faible production laitière, diversification avec volaille, pas de culture fourragère de contre-saison	
	<i>nvQ.1</i> Effectif vache laitière : 1	<i>effl.1</i> Litière / Retrait fréquent / Ajout effluent volaille / Absence d'ajout végétaux au tas de fumier
	<i>racQ.2</i> Holstein, croisés Holstein, croisé PRN	<i>evoQ.2</i> Effectif volaille ≤ 20
	<i>picQ.1</i> Production au pic de lactation ≤ 7 L/j	<i>fcsQ.1</i> Fourrage de contre-saison sur bas-fond
	<i>effl.3</i> Ajout litière très fréquent (au moins tous les jours) / Litière principale de résidus de culture / Absence d'ajout de cendre et d'effluent volaille	
	<i>evoQ.3</i> Effectif volaille de 20 à 60	
	<i>culb.3</i> Riz / Absence ou peu de culture de contre-saison	
	<i>scbQ.1</i> Surface cultivable sur bas-fond ≤ 20 ares	
	<i>fcsQ.0</i> Pas de fourrage de contre-saison sur bas-fond	
Type 5	Exploitations avec troupeau laitier de taille moyenne, pratique de la divagation, cultures fourragères essentiellement sur <i>tanety</i> et pas d'achat d'engrais minéraux	
	<i>effQ.3</i> Effectif bovin laitier de 5 à 8	<i>nvQ.1</i> Effectif vache laitière de 1
	<i>nvQ.3</i> Effectif vache laitière de 3 à 4	<i>tloQ.1</i> Etable permanente
	<i>tloQ.2</i> Divagation ou attache au piquet	<i>solQ.1</i> Etable avec sol nu
	<i>solQ.2</i> Sol étable avec dalle, pierre	<i>sdtQ.1</i> Cultures principales sur <i>tanety</i> : maïs-haricot
	<i>effl.2</i> Ajout litière peu fréquente (tous les 2 à 10 j) / Litière principalement de <i>bozaka</i> ou résidus / Retrait litière peu fréquent / Absence d'ajout de cendre et d'effluent volaille	<i>fcsQ.1</i> Fourrages de contre-saison sur bas-fond
	<i>effl.4</i> Pas d'ajout de litière / Retrait litière usagée très fréquent / Ajout de végétaux au tas de fumier	<i>anpQ.1</i> Achat d'engrais minéral NPK
	<i>evoQ.1</i> Peu ou pas de volaille (effectif ≤ 20)	<i>aurQ.1</i> Achat d'urée
	<i>sctQ.2</i> Surface cultivable sur <i>tanety</i> de 30 à 60 ares	
	<i>cult.1</i> Cultures sur <i>tanety</i> sans spécificité et absence d'haricot	
	<i>sdtQ.2</i> Cultures principales sur <i>tanety</i> : plantes fourragères	
	<i>fcsQ.0</i> Pas de fourrages de contre-saison sur bas-fond	
	<i>anpQ.0</i> Pas d'achat engrais minéral NPK	
	<i>aurQ.0</i> Pas achat urée	
Type 6	Exploitations avec troupeau laitier à dominante zébu, pratique de la divagation	
	<i>racQ.3</i> Zébus et croisés zébu (Rana)	<i>tloQ.1</i> Etable permanente
	<i>tloQ.2</i> Divagation ou attache au piquet	

Certaines variables ont eu un rôle peu discriminant dans cette étude typologique des exploitations d'agriculture-élevage; c'est le cas pour l'utilisation de concentré (*conQ*), le fait d'apporter du fumier sur les parcelles de bas-fond (*epbQ*) ou d'acheter des engrais minéraux (*anpQ* et *aurQ*). Cependant la quantification des aliments concentrés et des engrais organiques ou minéraux employés pourrait

permettre de faire apparaître des différences dans les pratiques de supplémentation et de fertilisation entre les types d'exploitations. En effet, la structure de l'élevage laitier (taille du cheptel) ségrègue fortement les groupes typologiques ce qui induirait une différence de disponibilité du fumier entre les groupes, et par conséquent des pratiques de fertilisation.

Ainsi, des différences *a priori* « invisibles » dans cette étude typologique pourraient être révélées lors de la quantification des flux de biomasses au sein des exploitations. Cette quantification a été possible grâce aux enquêtes détaillées menées par immersion. Ces enquêtes par immersion et les suivis d'exploitation ont permis d'apporter des connaissances fines sur :

- la structure des exploitations ;
- l'historique des exploitations ;
- le fonctionnement des exploitations et leurs pratiques ;
- les conséquences de ces pratiques en termes de flux de biomasses ;
- la gestion de la main d'œuvre ;
- les flux économiques.

Après une description de la structure et du fonctionnement des exploitations, les conséquences des pratiques seront traduites en termes de flux de biomasse, de temps de travail et de flux économiques.

3.2 La structure des exploitations d'agriculture-élevage sélectionnées

3.2.1 Positions géographiques des exploitations

Les quatre exploitations sélectionnées pour cette étude sont situées dans un rayon d'environ 25 km autour de la ville d'Antsirabe, dans les communes d'Andranomanelatra (Exploitation 1), Antsoho (Exploitation 2), Manandona (Exploitation 3) et Ambohimiarivo (Exploitation 4). Ces exploitations se trouvent dans des contextes géomorphologiques contrastés (Figure 4). Les sols majoritaires de la zone d'étude sont des sols ferrallitiques ; cependant la présence de sols volcaniques et de dômes témoignent d'une activité volcanique récente (Zebrowski and Ratsimbazafy, 1979). Les exploitations sont dispersées principalement sur trois couches géologiques : sols ferrallitiques lessivés en colloïdes jaunes (Exploitation 1 et Exploitation 4), sols ferrallitiques typiques rouges (Exploitation 3 et Exploitation 4) et sols eutrophes bruns sur cendres volcaniques (Exploitation 2). Les quatre exploitations se situent dans une gamme d'altitudes comprises entre environ 1350 et 1650 m. La géographie des quatre exploitations varient de vallée (Exploitation 3), à relief collinaire (Exploitation 2), en passant par des plateaux (Exploitation 1 et Exploitation 4).

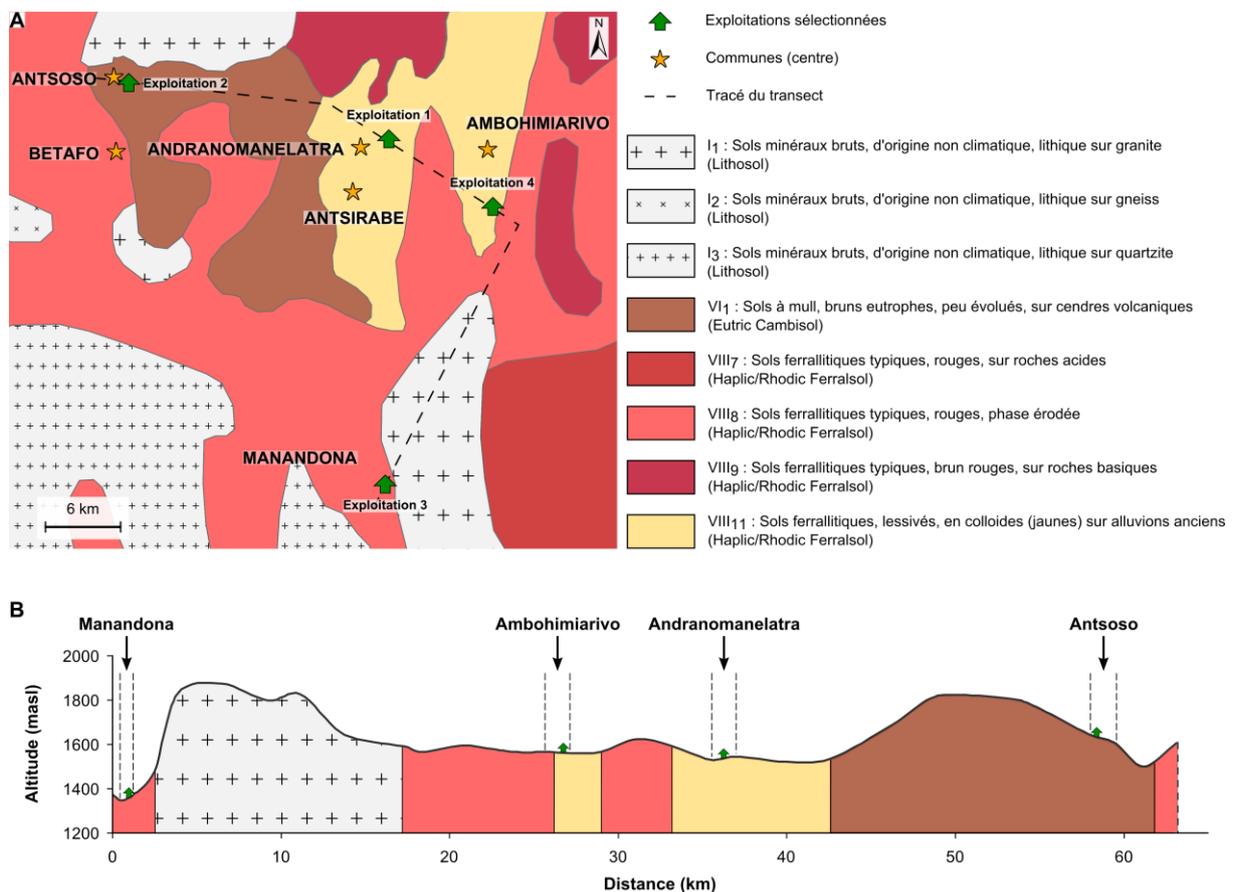


Figure 4 : Carte des sols (A) et transect (B) de la zone d'étude adaptés de la carte des sols de Madagascar (Riquier 1968) avec le système de classification français (CPCS, 1967) et le classement correspondant à FAO-Unesco entre parenthèses.

3.2.2 Structure des exploitations

Les exploitations ont été qualifiées de « grande », « intermédiaire » ou « petite » exploitation selon leur structure (Tableau 5). Comparée aux trois autres exploitations, l'Exploitation 1 possède les plus grandes surfaces cultivées, les plus grands troupeaux de bovins, de porcs et de volailles, les bâtiments agricoles les plus nombreux et un camion ; elle est donc qualifiée de « grande exploitation ». L'Exploitation 4 présente quant à elle les plus petites surfaces cultivées, le plus petit troupeau de bovin, aucun ouvrier permanent et peu de matériel agricole (ni charrette, ni outil de traction) ; elle est alors qualifiée de « petite exploitation ». Les deux autres exploitations (2 et 3) possèdent des troupeaux et des surfaces cultivables de tailles intermédiaires. Cependant, l'Exploitation 2 présente des surfaces cultivées plus étendues et l'Exploitation 3, un troupeau bovin de plus grande taille, avec une densité animale deux fois plus importante que celle de l'Exploitation 2.

Tableau 5 : Structure des quatre exploitations d'agriculture-élevage sélectionnées

Structures		Exploitation 1	Exploitation 2	Exploitation 3	Exploitation 4
		Grande	Intermédiaire	Intermédiaire	Petite
Ménage et travail					
Taille moyenne du ménage durant une année	<i>nombre de personne</i>	17	12	9	9
Membres dans la famille	<i>nombre de personne</i>	8	10	5	9
Enfants scolarisés dans la famille	<i>nombre de personne</i>	5	5*	0	7**
Employés permanents	<i>nombre de personne</i>	8-11	4	4	0
Main-d'œuvre extérieure	<i>jour-homme /an</i>	1315	1000	1535	385
Potentiel de travail humain	<i>ha cultivé /homme</i>	0,8	0,6	0,5	0,3
Surfaces					
Surface totale	<i>ha</i>	22,0	7,0	3,5	6,0
Surface totale cultivée***	<i>ha</i>	13,6	6,9	4,8	2,7
Surface de <i>tanety</i>	<i>ha</i>	18	5,3	0,7	4,9
Surface de bas-fond	<i>ha</i>	4	1,7	2,8	1,1
Elevages					
Troupeau bovin laitier	<i>UGB</i>	34	7	12	3
Vaches laitières	<i>nombre d'animaux</i>	21	4	6	2
Troupeau zébu	<i>nombre d'animaux</i>	6	4	6	0
Porcs	<i>nombre d'animaux</i>	5-20	4-5	1-2	1
Volailles	<i>nombre d'animaux</i>	30-530	50	30-70	20
Taille totale de l'activité élevage	<i>UGB</i>	40	8	12	3
Densité animale moyenne	<i>UGB /ha cultivé</i>	2,9	1,2	2,5	1,1
Bâtiments et matériel					
Bâtiments		3 lots d'étables pour bovins; bâtiments porcs; bâtiment fermé poules pondeuses; bâtiment stockage du concentré et bâtiment stockage paille de riz; fosses à ensilage; fromagerie	Bâtiment avec séparations entre vaches laitières, zébus et porcs	Bâtiment pour vaches laitières; bâtiment pour zébu; bâtiments pour veaux; bâtiment pour vache laitière, porcs, et stockage matériel; stockage des récoltes dans l'habitation	Rez-de-chaussée de l'habitation avec un lot bovins laitier, lot porc, et stockage récolte de riz
Matériel		1 camion ; 2 charrettes + instruments aratoires à traction; brouettes; petit matériel de culture	1 charrette + instruments aratoires à traction; 2 brouettes; petit matériel de culture	1 charrette + instruments aratoires à traction; brouette; pulvérisateur; petit matériel pour culture	petit matériel de culture (<i>angady</i> , pelles, etc)

* : les enfants scolarisés vivent hors de l'exploitation, mais participent aux travaux de l'exploitation pendant les week-ends et les vacances scolaires ; ** : un enfant sur les 7 est scolarisé hors de l'exploitation, participe aux travaux de l'exploitation pendant les week-ends et les vacances scolaires ; *** : prise en compte des surfaces de bas-fond cultivées en contre-saison

La structure des exploitations observées lors des immersions est le résultat des évolutions passées (croissance, décroissance et/ou réorientation). Pendant l'immersion et lors des suivis il a été constaté que les exploitations étaient très dynamiques. En effet, lors des immersions diverses opportunités ou certains changements avaient été présentés par l'agriculteur comme envisageables à moyen ou long termes, mais à chaque visite des légers ou d'importants changements étaient constatés ; changements pouvant directement affecter la structure et/ou les pratiques et/ou la gestion des ressources des exploitations (sol, main d'œuvre). Par exemple, nous avons assisté en l'espace de quelques mois ou en moins de trois ans à la création d'une épicerie, la vente de vaches laitières, l'augmentation des surfaces en *tanety*, la constitution d'un élevage intensif de poules pondeuses ou la construction d'une habitation à la place d'une des étables. Ces exploitations ont évolué rapidement et continuent à évoluer ; elles semblent saisir rapidement les opportunités qui se présentent à elles. Ainsi, pour saisir une image plus complète de ces exploitations en évolution il a été utile de connaître les trajectoires évolutives de ces exploitations. En effet, la prise en compte des trajectoires évolutives permet de redonner un aspect dynamique à l'état des structures présenté précédemment. De plus, la connaissance de l'historique des exploitations permet d'identifier les compétences acquises par l'exploitant (études, formations ou expériences passées) et de mieux comprendre le fonctionnement actuel et les structures observées qui en résultent. Enfin, la détermination des tendances évolutives et des objectifs des agriculteurs renseigne sur les évolutions futures de ces exploitations.

3.2.3 Historique et objectifs des exploitations

Exploitation 1

L'exploitant, est né dans les années soixante dans la région des hauts plateaux malgaches. En 1987, il s'installe sur l'exploitation (Figure 5) avec son épouse dans la commune d'Andranomanelatra. A cette époque, ils sont tous les deux dans la fonction publique : lui professeur au collège CEG d'Andranomanelatra et son épouse institutrice. A son installation, l'exploitant achète une « petite maison » et une parcelle de 0,80 ha de *tanety* autour de l'habitation. Cet achat a été financé grâce aux postes d'instituteur du couple. L'exploitant démissionne de ses fonctions en 1988 afin de se consacrer pleinement à l'activité agricole.

Les premières cultures mises en place sont le maïs, le haricot et la patate douce. De 1987 à 1992, l'exploitant développe une activité porc « naisseur-engraisseur » avec des animaux de type Large White (en moyenne deux truies reproductrices, 10 à 15 porcelets par cycle et 2 à 3 cycles par an). Cette première activité d'élevage porcin a financé l'achat des premières vaches laitières en 1992 (Figure 5) ainsi que de nouvelles parcelles de terrains. Puis, l'agriculteur augmente progressivement la taille de son troupeau bovin-lait en achetant des vaches laitières et des bœufs reproducteurs de race PRN ou Normande au Fifamanor. L'agriculteur commercialise le lait à l'entreprise Tiko dès le début de la production : au début environ 6 L/j puis plus de 100 L/j en 2000. En 2006, avec l'installation sur l'exploitation d'un fromager, l'exploitant diminue le volume de lait vendu à Tiko et commence une activité de fromagerie.

Fin 2008, l'exploitant arrête la vente de lait à l'entreprise Tiko, et ce quelques mois avant sa fermeture. Grâce à son autonomie par rapport à Tiko et à son atelier de transformation, l'Exploitation 1 a mieux supporté la déstructuration que le secteur laitier a connu en 2009 et qui obligea de nombreux exploitants à diminuer la production de lait (arrêt ou réduction de la complémentation des animaux) ou à vendre une partie du cheptel.

La croissance de l'exploitation (surfaces et troupeaux) et de son activité de transformation du lait est l'objectif principal explicité par l'agriculteur (Figure 5)

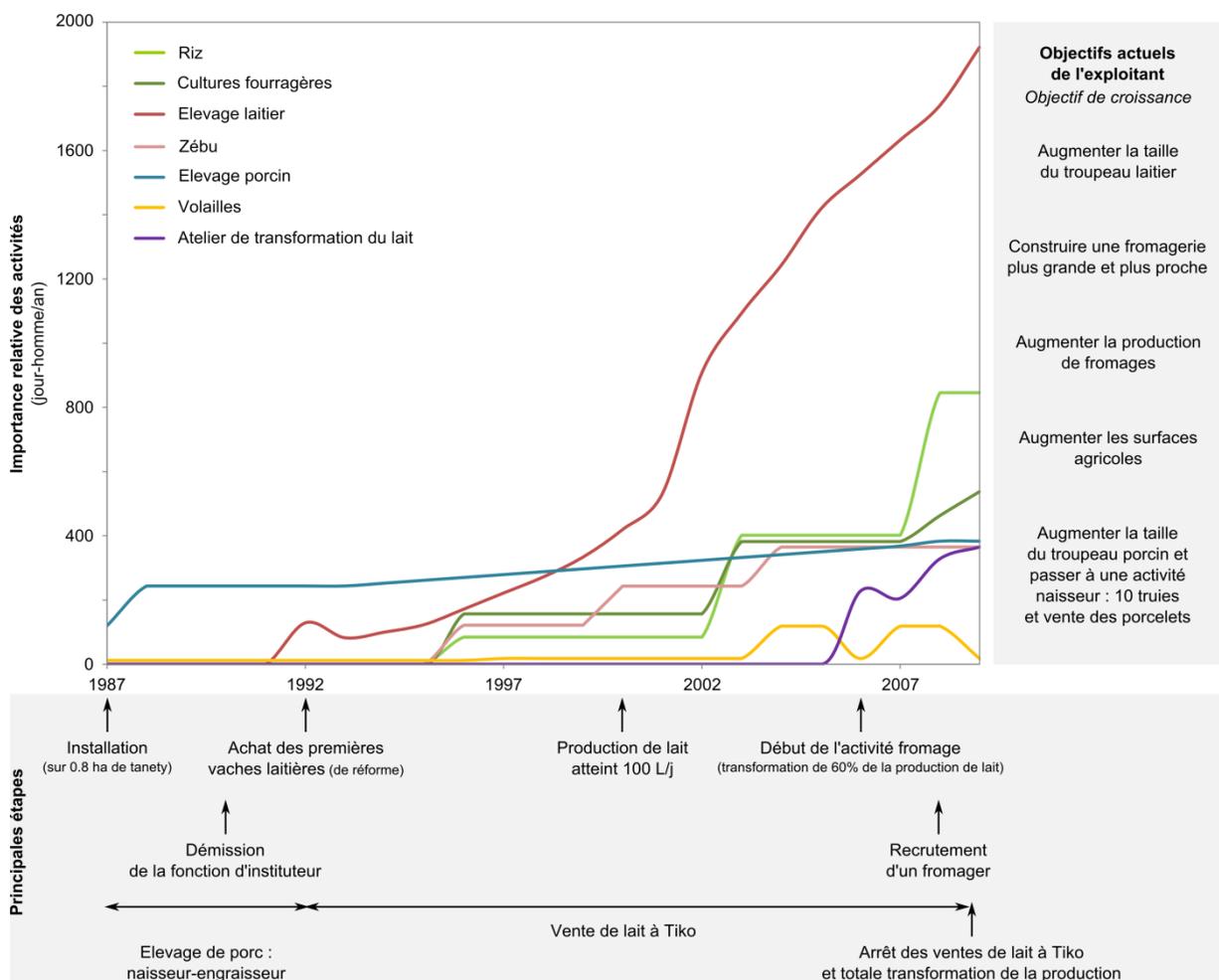


Figure 5 : Evolution de l'Exploitation 1 depuis l'installation de l'agriculteur, en 1987, jusqu'en 2009 et les principaux objectifs actuels de l'exploitant. L'importance relative des activités agricoles (en jour-homme) a été déterminée sur la base des données obtenues pour 2009 lors de l'immersion.

Exploitation 2

L'exploitant 2 est né en 1962 dans la région de Betafo, à l'ouest d'Antsirabe. En 1983, il arrête les études et s'installe dans l'exploitation familiale située à Antsoaso.

Lors de son installation, l'exploitation agricole est davantage tournée vers les cultures et ne possède qu'une vache laitière, de type métisse PRN (Figure 6). L'exploitant améliore la qualité de son troupeau laitier en vendant les animaux croisés PRN pour l'achat d'une vache laitière PRN pure. La production moyenne de lait par vache passe alors d'environ 8 L/j/vache à près de 13 L/j/vache avec des animaux pouvant atteindre jusqu'à 16-18 L/j/vache au pic de production. Le lait est collecté par l'entreprise Tiko. Lorsque l'effectif bovin dépasse les capacités d'accueil de l'exploitation, l'exploitant place les jeunes animaux en gardiennage sur une autre exploitation.

En 2005, l'agriculteur adopte les pratiques de semis-direct sous couverture végétale (SCV). En 2009, les surfaces totales en SCV sont d'environ 0,40 ha et sont cultivées en rotation riz - brachiaria, maïs-haricot - avoine ou haricot - brachiaria. L'exploitant déclare souhaiter atteindre 1 ha en SCV. Il diversifie depuis 2006 des activités non agricoles extérieures à l'exploitation (boucherie, négoce de zébus, ouverture d'une épicerie sur l'habitation) et transfère progressivement à son fils et son épouse la responsabilité de l'ensemble des activités agricoles.

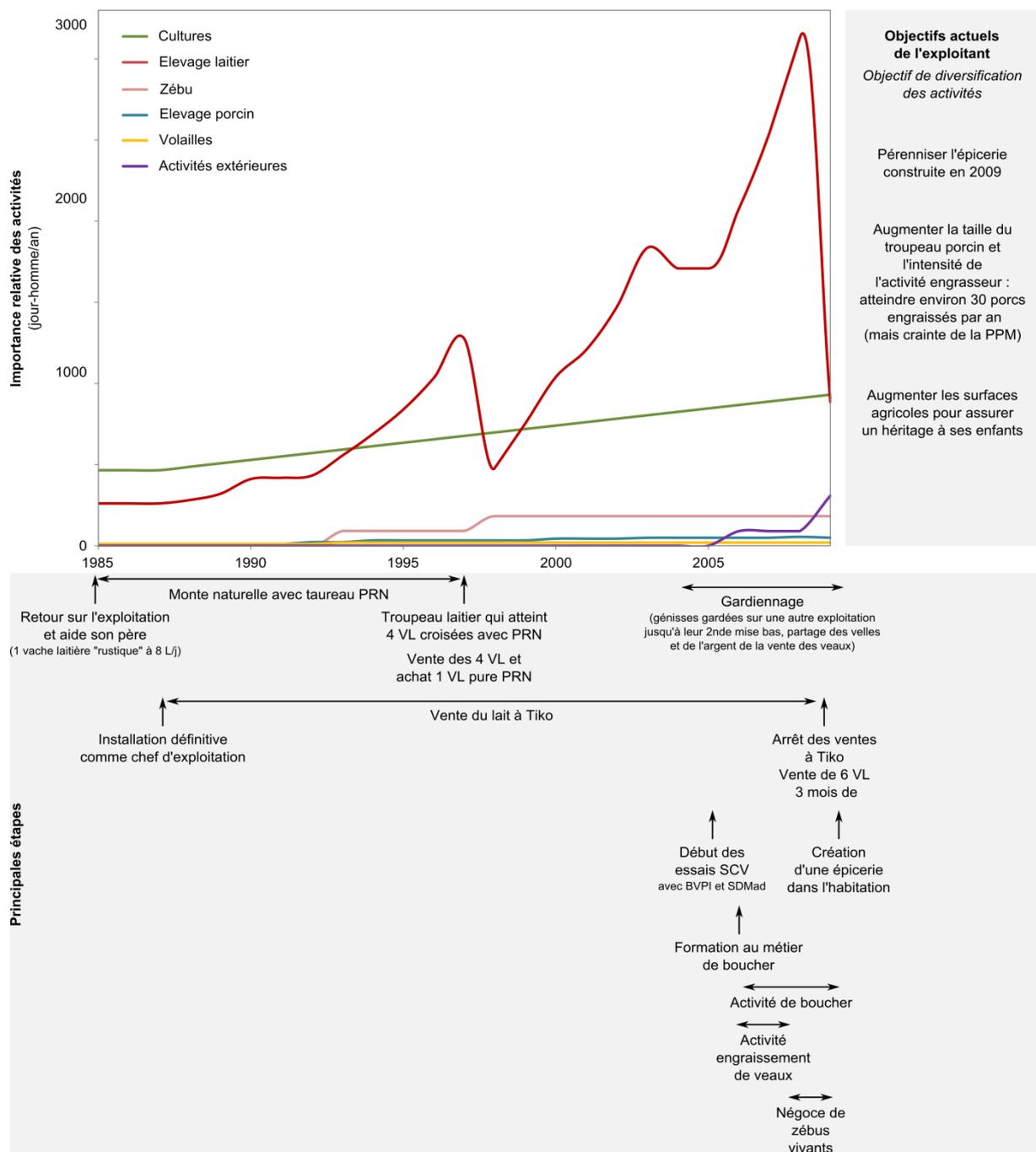


Figure 6 : Evolution de l'Exploitation 2 depuis l'installation de l'agriculteur, en 1985, jusqu'en 2009 et les principaux objectifs actuels de l'exploitant; L'importance relative des activités agricole (en jour-homme) a été déterminée sur la base des données obtenues pour 2009 lors de l'immersion.

A la fermeture de l'entreprise Tiko, l'exploitant a mis environ trois mois avant de reconstituer une clientèle stable pour la vente du lait. Durant cette période de crise, l'agriculteur a dû vendre deux de ses vaches laitières pour compenser les pertes occasionnées par le lait invendu et la chute des prix sur les marchés locaux (où le litre de lait est passé de 550 Ar/L à 150-300 Ar/L en quelques semaines suite à l'arrêt des activités de Tiko).

Depuis, la production quotidienne est vendue à Betafo à des particuliers qui le transforment en yaourt et fromage. Les objectifs de l'exploitant concernent, à court terme, le développement de l'épicerie, et à plus long terme, la croissance de l'élevage porcin et des surfaces agricoles.

Exploitation 3

L'exploitant 3 est né en 1950 dans la ville même de Manandona, de parents agriculteurs. En 1985, il hérite de l'exploitation, sur laquelle il fera construire la maison familiale.

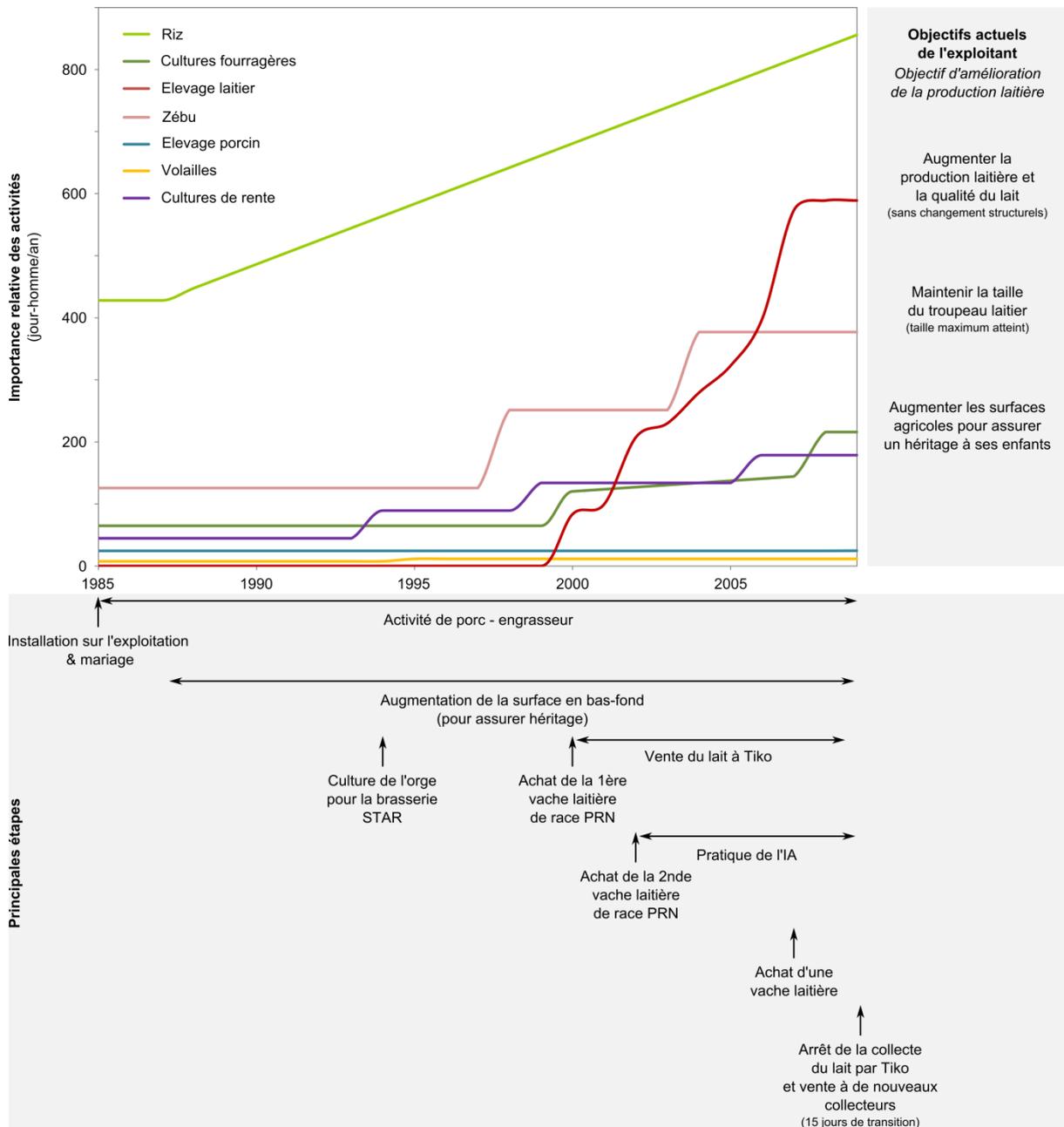


Figure 7 : Evolution de l'Exploitation 3 depuis l'installation de l'agriculteur, en 1985, jusqu'en 2009 et les principaux objectifs actuels de l'exploitant. L'importance relative des activités agricoles (en jour-homme) a été déterminée sur la base des données obtenues pour 2009 lors de l'immersion.

En 2000, avec le développement régional de l'élevage laitier, l'exploitant investit les bénéfices des activités agricoles dans l'achat de sa première vache laitière, de race pure PRN, puis en acquiert une seconde en 2002 (Figure 7). L'exploitant opte dès le départ pour l'insémination artificielle (IA) comme mode de reproduction. La croissance du cheptel s'est traduite par un agrandissement des bâtiments de stabulation situés autour de l'habitation. L'exploitant considérait en 2009 avoir atteint la taille de cheptel maximale compte tenu de la structure de l'élevage et du niveau de rentabilité atteint.

Environ deux semaines après l'arrêt de la collecte par Tiko (début 2009), l'exploitant stabilise de nouveau ses ventes de lait (à un fromager artisanal et à une coopérative de Manandona). Le contexte socio-économique de l'Exploitation 3 (exploitation non enclavée, proximité de la route nationale en direction de la capitale, présence d'une coopérative) a permis à l'exploitant une adaptation plus rapide face à la crise de 2009, causant moins de restrictions sur l'activité laitière (aucune vente d'animaux) que chez la plupart des éleveurs fournissant du lait à Tiko. Les objectifs de l'exploitant concernent moins la croissance de la taille du troupeau qu'une amélioration de la qualité de la production.

Exploitation 4

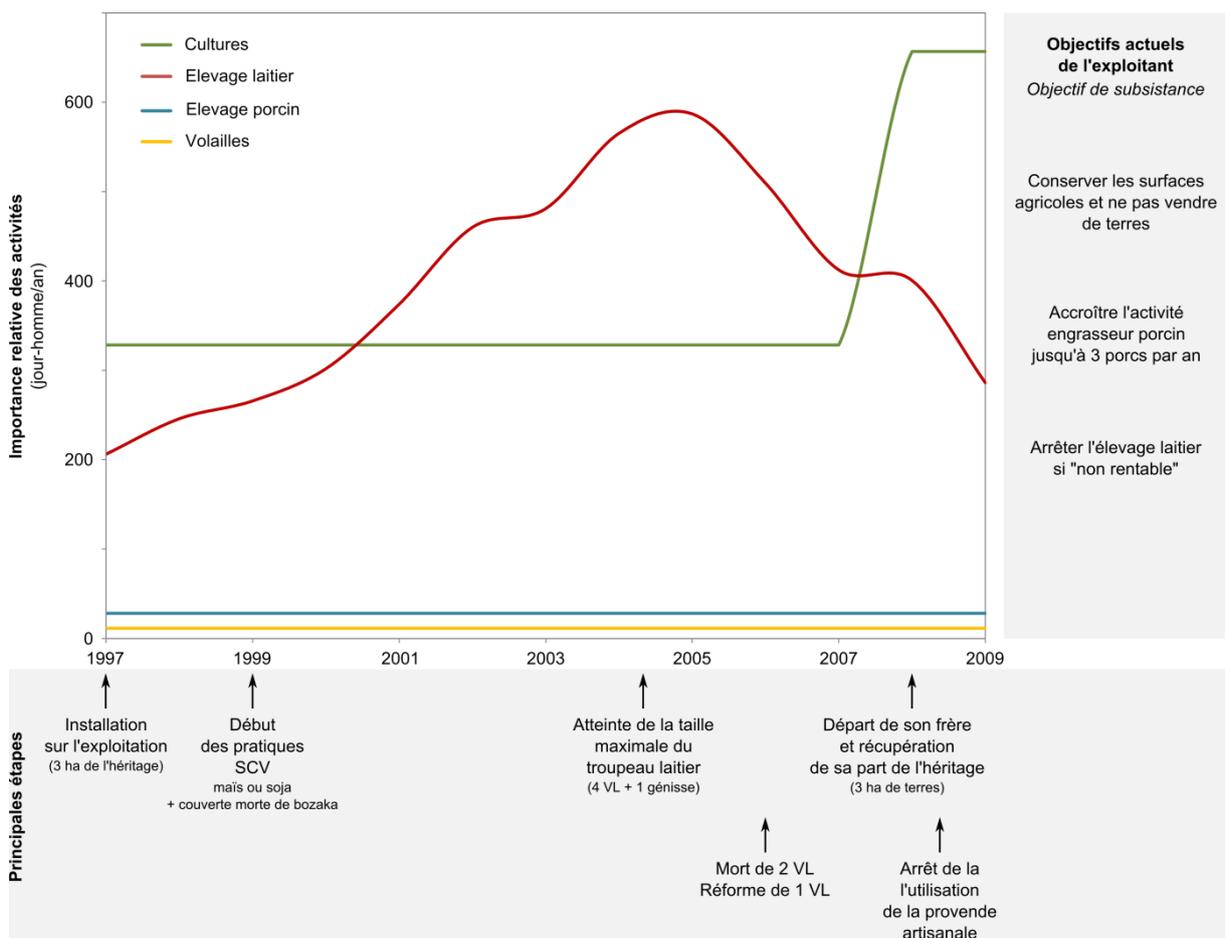


Figure 8 : Evolution de l'Exploitation 4 depuis l'installation de l'agriculteur, en 1997, jusqu'en 2009 et les principaux objectifs actuels de l'exploitant. L'importance relative des activités agricoles (en jour-homme) a été déterminée sur la base des données obtenues pour 2009 lors de l'immersion.

L'exploitant est né en 1965 à Fianarantsoa et s'installe définitivement en 1997 avec son épouse sur l'exploitation familiale d'Ambohimiarivo. Lui et son frère se partagent la totalité des terres reçues en héritage, soit environ 3,0 ha chacun. L'exploitant continue les activités culturelles initiées par ses parents (Figure 8) et met en place quelques parcelles de SCV sur les conseils du Fifamanor. En 2008, son frère lui confie ses parcelles de terrain ; l'exploitant est alors contraint de prêter une partie de la surface agricole qu'il ne parvient plus à cultiver seul.

La vente de lait à Tiko avait commencé dès le début de l'activité laitière (1990) avec l'acquisition de deux vaches laitières de race PRN. Une vingtaine de litres de lait par jour était alors vendue à environ 470 Ar/L. Mais depuis 2006, le troupeau laitier n'a cessé de diminuer, suite à les mortalités ou des

ventes d'animaux. Avec l'arrêt des activités de Tiko, l'exploitant s'est vu obligé de vendre des animaux et d'arrêter les achats d'aliments concentrés pour ses vaches laitières, entraînant un arrêt de la vente de lait et l'autoconsommation de la production laitière résiduelle. Dans ce contexte de crise, l'agriculteur a envisagé une possible réorientation des activités d'élevage vers un élevage porcin plus important, jusqu'à lors réduit à un porc par an.

En résumé, les tendances évolutives montrent que :

- l'Exploitation 1 a connu une croissance rapide depuis son installation et continue sur une trajectoire de croissance ;
- l'Exploitation 2 a fortement ralenti sa croissance à cause de la crise, et consacre de plus en plus de temps à des activités extra-agricoles ;
- l'Exploitation 3, après une période de croissance rapide, a atteint les limites de sa capacité d'accueil pour l'élevage bovin ;
- l'Exploitation 4 connaît une décroissance de l'activité bovin-lait et envisage une possible réorientation vers l'élevage porcin.

Ces tendances évolutives inscrivent dans la durée les pratiques. Ainsi une exploitation qui présente une tendance à la croissance des activités d'élevage (cas de l'Exploitation 1), s'accompagne d'une augmentation de la production d'effluent d'élevage. Une augmentation des surfaces agricoles pourrait se traduire par une diminution de la disponibilité de fumier par unité de surface et/ou par la pratique d'application d'engrais ciblée (i.e. certaines cultures ou parcelle plutôt que d'autres). Une tendance à l'amélioration de la qualité de la production laitière (à cheptel constant) s'accompagnerait d'une modification des pratiques d'alimentation, et en particulier de l'augmentation des quantités de concentrés distribués. La diminution de l'activité laitière diminuerait aussi la production d'effluent d'élevage. Mais elle diminuerait aussi l'utilisation de résidus de culture qui serait alors disponibles pour constituer un paillage, et libérerait de la main d'œuvre disponible pour les cultures.

Enfin, chacune de ces évolutions dans les pratiques peut s'accompagner alors de modifications de la ressource sol (retour au sol des éléments nutritifs), de la ressource en main d'œuvre et de la ressource financière.

3.3 Les pratiques

Les enquêtes par immersion et les suivis d'exploitation ont permis d'apporter des connaissances fines sur le fonctionnement de ces exploitations ainsi que les conséquences des pratiques de gestion de la biomasse en termes de flux de biomasse (Figure 9). Pour les quatre exploitations suivies, la description détaillée des activités de cultures et des pratiques de fertilisation, ainsi que des activités d'élevage et les pratiques d'alimentation et de gestion des effluents d'élevage sont placées en Annexe 5. Les détails méthodologiques (hypothèses, équations) sur la quantification des flux de biomasses seront décrits au Chapitre 4.

Pratiques de fertilisations

Les pratiques de fertilisations au sein de quatre exploitations se distinguent par la disponibilité en fumier par unité de surface, par les quantités engrais minéraux employées et le choix des cultures à fertiliser. Les calendriers culturaux des principales cultures de *tanety* et de bas-fond (et les doses de fertilisant apportées) sont illustrés par la Figure 10 et Figure 11.

Ainsi, l'Exploitation 1 est l'exploitation qui dispose du plus de fumier par unité d'hectare, environ 5,6 t MS/ha (Figure 9). Le fumier est essentiellement épandu sur les cultures fourragères de *tanety* (maïs-ensilage, kizozzi) et sur les cultures fourragères de contre-saison (avoine – ray-grass) sur bas-fond (Tableau 6). Les applications d'engrais minéral (urée, 0,4 t MS/an) sont destinées aux cultures fourragères de contre-saison après chaque coupe (Figure 9). La culture de riz, unique culture vivrière de l'exploitation, ne reçoit directement aucune fertilisation organique, ni minérale, à l'exception de la pépinière à riz. De manière générale, beaucoup de soins sont apportés à la préparation des plants de riz dans les pépinières des quatre exploitations.

L'Exploitation 2 et l'Exploitation 3 produisent annuellement une quantité de fumier six à sept fois inférieure à celle de l'Exploitation 1 (Figure 9). Cependant la densité animale étant plus importante sur l'Exploitation 3 que sur l'Exploitation 2 (Tableau 5), la disponibilité du fumier par unité y est environ 21% supérieure (2,3 vs 1,9 t MS/ha). Pour ces deux exploitations, la fertilisation organique et minérale est majoritairement concentrée sur les cultures de rentes (blé, orge pomme de terre) et sur les cultures fourragères de contre-saison (Tableau 6) ; toutes ces cultures sont mises en place sur les bas-fonds en saison sèche. Contrairement à l'Exploitation 2, l'Exploitation 3 épand peu de fumier sur ses cultures vivrières de maïs (Tableau 6). De plus, des contraintes d'éloignement de certaines parcelles de maïs (transport du fumier) limitent la fertilisation de l'Exploitation 3 à la pratique de l'écobuage. L'Exploitation 3 est la seule exploitation des quatre étudiées à appliquer du fumier directement pour la culture de riz de bas-fond (Figure 10). L'Exploitation 2, tout comme l'Exploitation 4 possède quelques dizaines d'ares implantés en système de semis sous couverture végétales (SCV), systèmes de SCV avec plantes de couverture ou avec mulch, respectivement pour les exploitations 2 et 4.

L'Exploitation 4, exploitation tournée vers un système de subsistance, produit environ 15 fois moins de fumier que l'Exploitation 1, pour une surface cultivée cinq fois inférieure. Dans l'Exploitation 4 la fertilisation est destinée aux cultures vivrières (Figure 11), à l'exception du riz de bas-fond. La quantité d'engrais minéral achetée est presque négligeable (0,003 t MS/an, Figure 9) et est destinée à la pépinière des plants de riz.

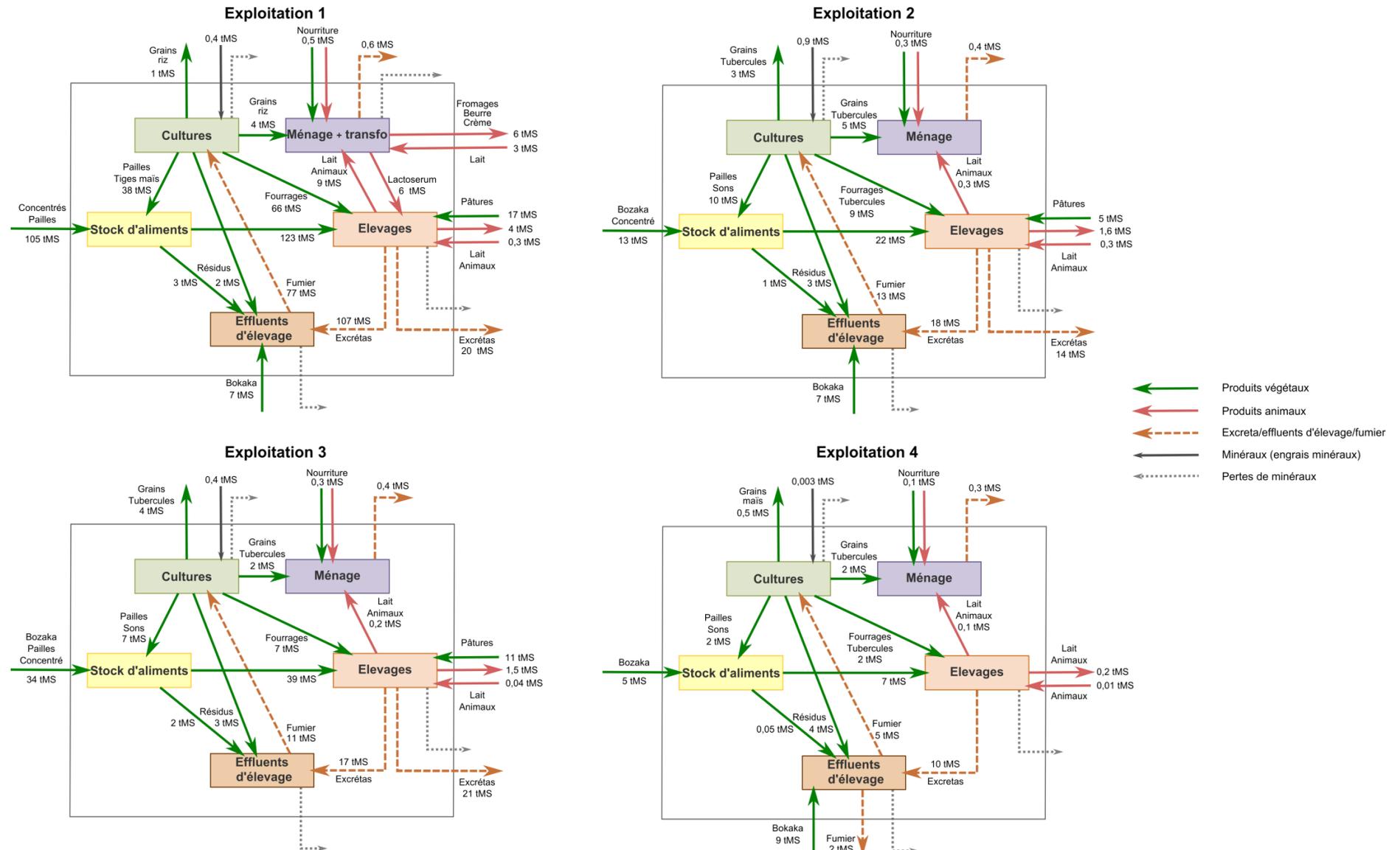


Figure 9 : Bilan des pratiques de gestion de la biomasse ; principaux flux annuels de biomasses quantifiés pour les quatre exploitations d'agriculture-élevage

Pratiques d'alimentation

Les pratiques d'alimentation des élevages au sein de quatre exploitations se différencient essentiellement par la nature des aliments employés (fourrages cultivés, fourrages sauvages, résidus de cultures et aliments concentrés), et par les quantités distribuées. De manière générale, les pailles de riz (mololo) sont utilisées pour l'alimentation des bovins, mais dans des proportions différentes selon les exploitations (Tableau 7). Les pratiques d'alimentation des troupeaux de zébu sont similaires dans les cas d'études : alimentation à base de fourrages sauvages (*bozaka*) consommés à l'extérieur de l'exploitation lors de pâtures et de *mololo*. Certains agriculteurs complètent l'alimentation des zébus avec des drèches (cas de l'Exploitation 1) ou des fourrages verts cultivés (cas de l'Exploitation 2).

Tableau 6 : Surfaces, fertilisation organique, rendements et productions commercialisées pour les principales cultures des quatre exploitations d'agriculture-élevage

Principales cultures			Exploitation 1	Exploitation 2	Exploitation 3	Exploitation 4
Riz	Surface cultivée	ha	4,0	2,2	2,8	1,2
	Fertilisation organique moyenne	t MS/ha	0,1 ⁽¹⁾	1,0 ⁽²⁾	0,9	0,3 ⁽³⁾
	Rendement (grains)	t MS/ha	1,7	2,3	2,0	1,9
	Quantité vendue (grains)	t MS/an	1,2	0,6	1,8	/
Maïs	Surface cultivée	ha	4,0	0,4	0,3	1,0
	Fertilisation organique	t MS/ha	7,6	2,7	0,5	3,9
	Rendement (grains, sauf Expl. 1)	t MS/ha	7,3 ⁽⁴⁾	2,3	2,3	2,0
Avoine et Ray-grass	Surface cultivée	ha	1,6	0,4	0,7	/
	Fertilisation organique moyenne	t MS/ha	19,7	3,1	2,7	/
	Rendement (fourrage)	t MS/ha	4,3	3,7	4,2	/
Kizosi	Surface cultivée	ha	3,0	0,9	0,3	/
	Fertilisation organique moyenne	t MS/ha	4,5	/	10,8	/
	Rendement (fourrage)	t MS/ha	19,0	3,0 ⁽²⁾	11,0	/
Brachiaria	Surface cultivée	ha	/	0,5	/	0,04
	Fertilisation organique moyenne	t MS/ha	/	0,8	/	/
	Rendement (fourrage)	t MS/ha	/	2,6 ⁽⁵⁾	/	3,0 ⁽⁶⁾
Radis fourrager	Surface cultivée	ha	1,0	/	/	/
	Fertilisation organique moyenne	t MS/ha	1,2	/	/	/
	Rendement (tubercules + feuilles)	t MS/ha	8,4	/	/	/
Patate douce	Surface cultivée	ha	/	1,0	/	0,3
	Fertilisation organique moyenne	t MS/ha	/	0,2	/	0,6
	Rendement (tubercules)	t MS/ha	/	2,8	/	1,8
Pomme de terre	Surface cultivée	ha	/	0,7	0,3	0,06
	Fertilisation organique moyenne	t MS/ha	/	7,7	5,6	2,7
	Rendement (tubercules)	t MS/ha	/	5,5	5,7	1,4
	Quantité vendue (tubercules)	t MS/an	/	0,6	1,7	/
Blé	Surface cultivée	ha	/	0,8	/	/
	Fertilisation organique moyenne	t MS/ha	/	3,4	/	/
	Rendement grain	t MS/ha	/	2,2	/	/
	Quantité vendue (grains)	t MS/an	/	1,5	/	/
Orge	Surface cultivée	ha	/	/	0,4	/
	Fertilisation organique moyenne	t MS/ha	/	/	3,2	/
	Rendement grain	t MS/ha	/	/	2,6	/
	Quantité vendue (grains)	t MS/an	/	/	0,9	/

(1) : application de 0,5 t MS de fumier concentré sur 0,10 ha ; (2) : application concentrée de 2,2 t MS fumier sur 0,27 ha de riz tanety et 0,07 ha pépinière ; (3) : application de 0,4 t MS fumier concentré sur 0,03 ha de pépinière et de 20 kg MS sur 0,12 ha de riz tanety ; (4) rendement en plante entière (tige et épis laiteux-pâteux) pour la transformation d'ensilage (densité de environ 22 plants/m²) ; (5) : kizosi planté comme bordure entre parcelles ; (6) : brachiaria en SCV avec faible densité ; (6) : petite parcelle de brachiaria planté pour la production de semences.

Dans l'Exploitation 1, d'importantes quantités de concentrés sont achetées pour l'alimentation du troupeau bovin laitier, de l'élevage porcin « naisseur-engraisseur » et de l'élevage de poules pondeuses (Figure 9, Tableau 7). Toute l'année, le troupeau laitier est principalement alimenté de

fourrages cultivés sur l'exploitation. Seul le troupeau de zébu est nourri de *bozaka* lors des pâtures à l'extérieur.

Dans les exploitations 2 et 3, il a été constaté une forte valorisation de toutes les biomasses disponibles par l'élevage laitier : fourrages produits (en saison sèche et humide), résidus de cultures, *bozaka* ramassé à l'extérieur, concentrés achetés (provende et drèches ; Tableau 7). Les principales différences entre l'Exploitation 2 et l'Exploitation 3 concernant les pratiques d'alimentation des bovins laitiers sont des surfaces plus importantes de fourrages de contre-saison pour l'Exploitation 3 et le remplacement d'une partie des achats de concentrés par de la patate douce pour l'Exploitation 2. Ces différences peuvent être dues en partie aux différences de densité animale entre les Exploitation 2 et 3 ; l'Exploitation 3 compenserait alors la forte densité animale par des achats de provende plus importants et par la valorisation de plus de surfaces en contre-saison.

L'Exploitation 4 semble diminuer au maximum les coûts engendrés par l'alimentation bovine en n'achetant aucun concentré (Tableau 7), mais en valorisant au mieux les résidus de cultures, les *bozaka* extérieurs et les quelques plantes fourragères implantées dans des buts non-alimentaires (semences, bordures des parcelles).

Pratiques de gestion des effluents

Les pratiques de gestion des effluents d'élevage sont relativement proches pour les quatre exploitations ; mais l'Exploitation 4 est celle qui se distingue le plus des trois autres (Tableau 7). Les principales différences dans les pratiques de gestion des effluents résident dans :

- la nature des sols de l'étable (bétonné, dallé ou sol nu) qui facilite plus ou moins la récupération des liquides. Seule l'Exploitation 4 possède une litière végétale sur sol nu.
- la nature et la quantité de la litière employée. Les exploitations 1 et 3 utilisent des litières végétales assez fines. L'Exploitation 1 achète la même quantité de *bozaka* que l'Exploitation 2 pour un effectif de bovin laitier près de cinq fois supérieur (Figure 11). L'Exploitation 3 n'achète pas directement de litière végétale mais emploie les refus de l'alimentation et des pailles de riz.
- les mélanges d'effluents dans le tas de fumier. Les exploitations peuvent mélanger tous les effluents issus des différents élevages (cas d'Exploitation 1) ou réserver certains effluents comme les effluents de volailles pour des fertilisations ciblées (cas de l'Exploitation 3).
- la pratique du compostage. L'Exploitation 4 est la seule à pratiquer le compostage des effluents d'élevage. Cela se traduit par des ajouts de *bozaka* au tas de fumier. Cette pratique permet d'augmenter le volume de fumier produit. L'Exploitation 4 est aussi la seule des quatre cas d'étude à vendre du fumier.

Tableau 7 : Pratiques de gestion de l'élevage bovin laitier pour les quatre exploitations d'agriculture-élevage

Pratiques	Exploitation 1			Exploitation 2			Exploitation 3			Exploitation 4		
Conduite et allotement												
Conduite	Stabulation permanente			Stabulation permanente			Stabulation permanente			Attache au piquet de jour; Etable de nuit		
Allotement	Lot vaches laitières + taureau reproducteur; Lot génisses + jeunes;			Lot vaches laitières + veaux non sevrés; Lot génisses + jeunes à l'extérieur de l'exploitation			Lot vaches laitières + génisses; Lot veaux			Lot vaches laitières + génisses + veaux		
Alimentation												
	<i>Aliment</i>	<i>Période⁽¹⁾</i>	<i>Ration⁽²⁾ kg MB/j/anl</i>	<i>Aliment</i>	<i>Période⁽¹⁾</i>	<i>Ration⁽²⁾ kg MB/j/anl</i>	<i>Aliment</i>	<i>Période⁽¹⁾</i>	<i>Ration⁽²⁾ kg MB/j/anl</i>	<i>Aliment</i>	<i>Période⁽¹⁾</i>	<i>Ration⁽²⁾ kg MB/j/anl</i>
Affouragement	Kizozi	SH	30,5	Bozaka	SS, SH	15,0	Bozaka	SS, SH	19,0	Bozaka	SS, SH	12,5
	Avoine – Ray-grass	SS	7,5	Kizozi et/ou Brachiaria	SH	17,0	Kizozi	SH	15,0	Patate douce ⁽⁴⁾	SS	7,0
	Radis fourrager	SI1 (avril-juin)	11,5	Avoine – Ray-grass	SS	8,0	Avoine – Ray-grass	SS	16,0	Sétaria	SH	4,0
	Ensilage	SS-SI2 (oct-déc)	8,0	Mololo	SS, SH	2,0	Mololo	SS, SH	2,5	Brachiaria	SH (mars-avril)	2,5
	Mololo	SH, SS, SI1 (avril-juin)	4,0							Mololo	SS (avril-nov)	3,0
Complément	Provende	Toute année, vaches en lactation	5,0	Provende	SH	0,2	Provende	Toute année	1,2	/		
	Drèche de brasserie	Toute année, vaches en lactation	8,0	Drèche de brasserie	SH	3,0	Drèche de brasserie	Toute année	1,4	/		
				Patate douce ⁽³⁾	SS	2,5						
Atelier lait												
Traite manuelle	2 fois/jour (7h et 18h)			2 fois/jour (7h et 18h)			2 fois/jour (6-7h et 17-18h)			1 fois/jour (7-8h)		
Devenir du lait	Transformation sur l'exploitation			Commercialisation particuliers			Commercialisation fromagers			Commercialisation particulier et coopérative		
Gestion des effluents												
Type de litière	Bozaka			Bozaka			Aliments refusés + mololo			Aliments refusés + mololo + bozaka		
Ajout de litière	2 fois/jour			2 fois/jour			2 fois/jour			1 fois/jour		
Retrait de litière	2 fois/jour			2 fois/jour			2 fois/jour			Tous les 2 à 3 jours		
Autres ajouts au tas de fumier	Effluents zébus ; effluents porcins ; effluents volailles			Effluents zébus ; effluents porcins ; litières usagées volailles (son de riz)			Effluents zébus, effluents porcins			Bozaka (pour compostage) ; effluents porcins ; eau		
Vente du fumier	Non			Non			Non			Oui		
Qualité du fumier après 90 jours de maturation												
Taux MS (%)	37,1			48,0			28,8			47,6		
Taux N (% de MS)	2,0			1,6			2,2			0,9		

SH : Saison Humide ; SS : Saison Sèche ; SI : Saison Intermédiaire ou période de soudure ; (1) : Période de distribution du fourrage ; (2) : Ration moyenne par type d'aliment (en kg MB/jour/animal) calculée sur la période de distribution ; (3) : tubercules de patate douce ; (4) : feuilles et tiges de patate douce

En résumé pour les flux de biomasse au sein des exploitations, l'Exploitation 1 présente les flux de biomasses les plus importants. De plus, cette exploitation est la seule à intégrer un atelier de transformation de la production laitière. Les exploitations 2 et 3 ont des fonctionnements similaires, des quantités de flux de biomasses relativement proches, mais des différences structurelles et de pratiques suggèrent deux orientations des activités : cultures et l'élevage laitier, respectivement pour l'Exploitation 2 et l'Exploitation 3. En effet dans l'Exploitation 2, l'effectif bovin, les surfaces fourragères de contre-saison et l'emploi de concentrés sont inférieurs, mais la surface totale cultivée est supérieure et les cultures vivrières plus fertilisées. Les flux entrants, sortants et internes à l'Exploitation 4 sont dans l'ensemble les plus faibles, à l'exception des achats de *bozaka* pour la litière et le compostage du fumier. Les achats d'aliments pour la famille sont similaires dans les exploitations 1, 2 et 3 ; les très faibles quantités d'aliments achetés par l'Exploitation 4 confirment un système de subsistance tourné vers des cultures vivrières (Figure 9).

Donc, bien que seulement quatre exploitations aient été étudiées, une grande diversité des pratiques de gestion de la biomasse et des flux de biomasses engendrés est observable, et en particulier pour les pratiques de fertilisation, alimentation de l'élevage bovin laitier et gestion des effluents d'élevage. La pratique d'une « fertilisation ciblée » et les différences de quantités de fumier épandu et d'engrais minéral appliqué sont susceptibles d'induire de la variabilité spatiale de la fertilité des sols. La variabilité des pratiques de gestion des effluents pourrait se traduire par des niveaux différents de recyclage des éléments nutritifs présents dans les excréta. De plus, les variations dans la quantité et la qualité des aliments importés pour l'élevage laitier, c'est-à-dire les entrées d'éléments nutritifs dans le système d'élevage, pourraient conditionner la production laitière et donc les sorties en éléments nutritifs du système. Ces différences observées dans les quatre exploitations s'accompagneraient alors de différences au niveau de l'efficacité globale de ces systèmes (i.e. le rapport exportations sur importations). Enfin, la réalisation de ces pratiques s'accompagne de besoins en main d'œuvre différents mais induit aussi des coûts (e.g. achats de main d'œuvre, achats de concentrés, achats d'engrais) et des recettes (e.g. ventes du lait, ventes de cultures de rente). Ces conséquences des pratiques sur la main d'œuvre et les flux monétaires des exploitations sont détaillées à la suite.

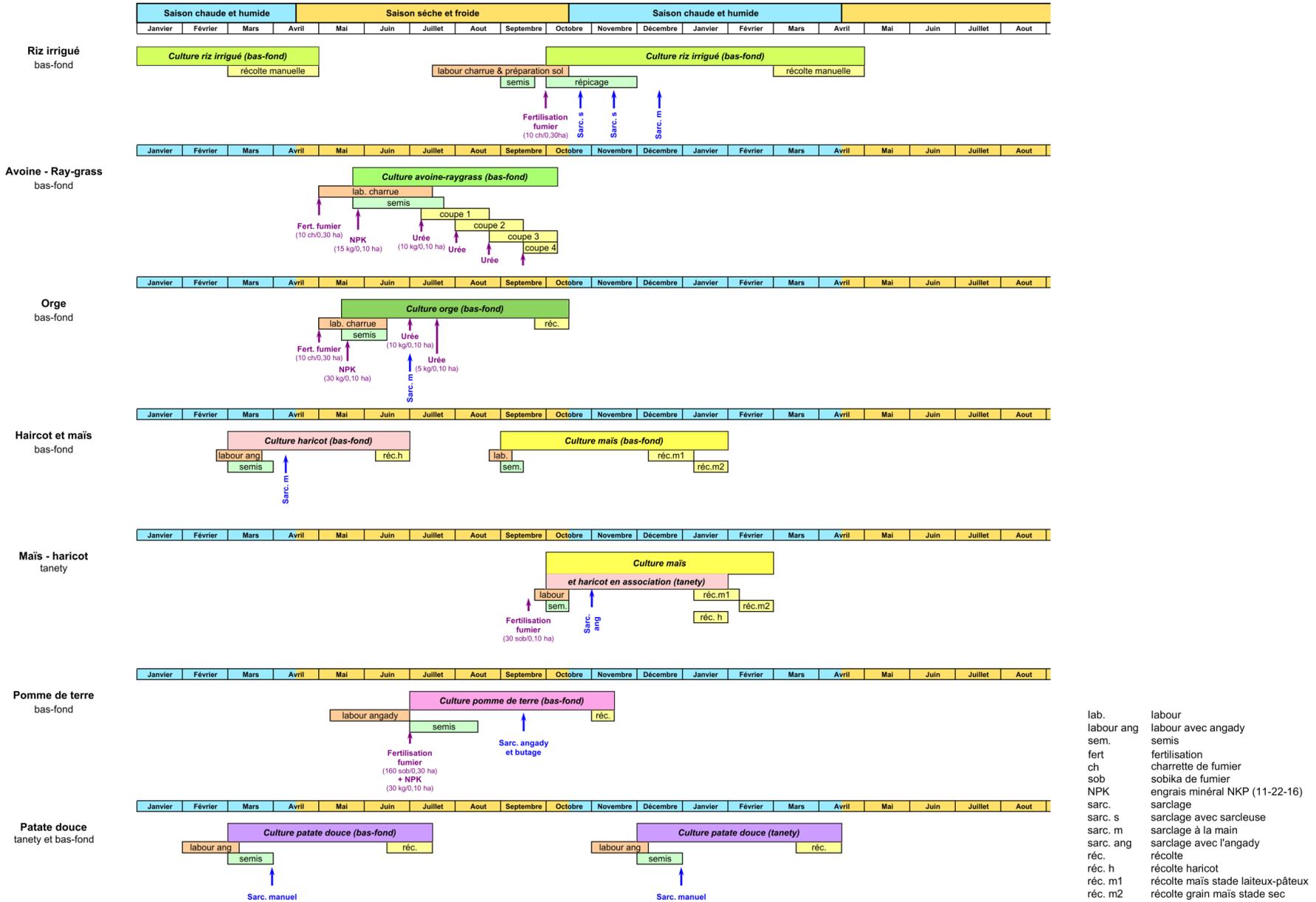


Figure 10 : Calendrier des cultures sur tanety et sur bas-fond ; exemple de l'Exploitation 3

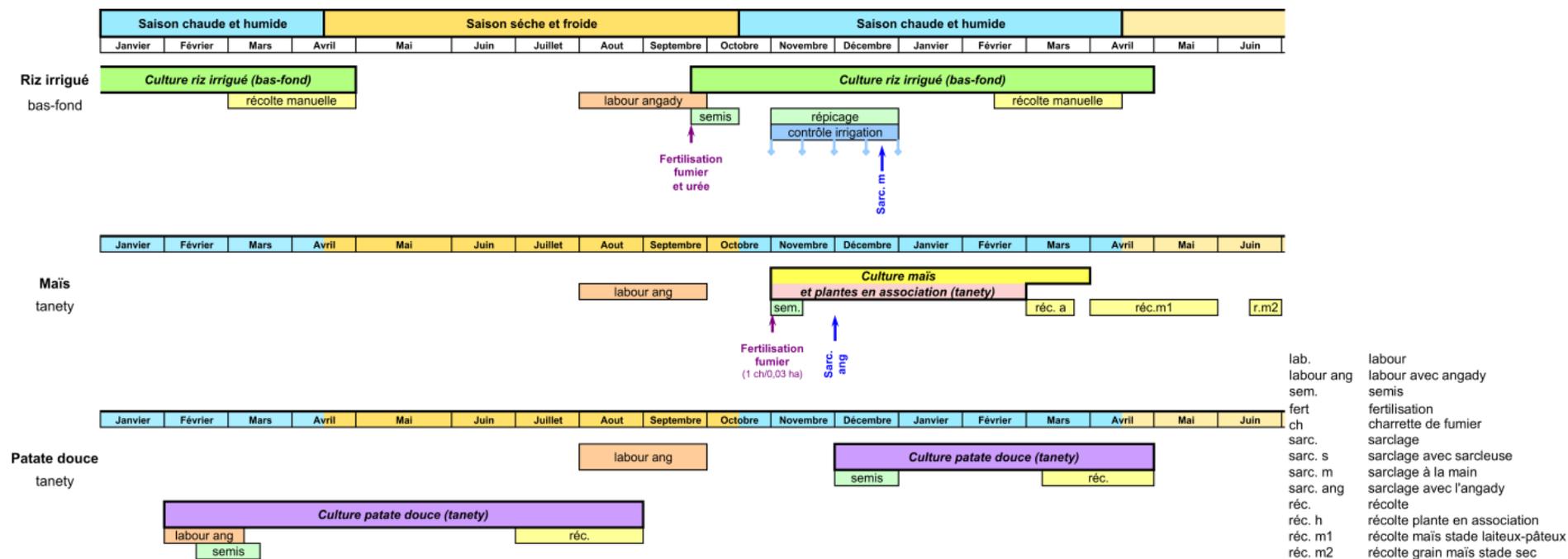


Figure 11 : Calendrier des principales cultures sur *tanety* et sur *bas-fond* ; exemple de l'Exploitation 4

3.4 Conséquences des pratiques sur la gestion de la main d'œuvre et gestion économique

3.4.1 Pratiques et conséquences sur la main d'œuvre

La distribution du temps de travail au cours de l'année pour les quatre exploitations a été calculée à partir des données des enquêtes par immersion et suivis (Figure 12). Elle indique que les mois d'avril et novembre – décembre constituent deux périodes souvent surchargées dans les calendriers de travail. Ces périodes correspondent aux travaux de récolte du riz (avril) et à la fin des travaux de préparation des rizières de bas-fond et de repiquage des plants de riz (novembre – décembre). La culture du riz organise alors les calendriers de travail pour les quatre exploitations. Cependant dans chaque exploitation, d'autres pratiques accentuent ces pics d'activités ou en engendrent des nouveaux. La charge de travail dédiée aux activités culturelles est celle qui présente le plus de variation au cours d'une même année (Figure 12). Cependant il est à noter que le temps de travail nécessaire à la récolte des fourrages (cultivés ou non) est pris en compte comme un temps dédié à l'activité bovin et donc aux activités d'élevage.

Pour l'Exploitation 1, les mois d'avril et décembre sont les deux principaux pics d'activité (Figure 12) et représentent respectivement 15 et 14% de l'ensemble de la charge de travail annuelle (i.e. 4583 jours-hommes par an). En plus de la récolte de riz, le mois d'avril concorde avec la fin de la récolte du kizozzi, le début de la récolte de radis fourrager et du maïs pour la fabrication d'ensilage (appelé par la suite « maïs-ensilage »), et le début de la préparation de l'ensilage. Durant le mois de décembre, la fin des travaux de préparation des rizières et le repiquage coïncident avec le début de la récolte du kizozzi, la fertilisation du maïs-ensilage et la préparation des parcelles de radis fourrager. La période creuse s'étend de juin à août, ce dernier mois rassemblant uniquement 4% de la charge totale de travail.

Dans l'Exploitation 2, deux nouveaux pics d'activité en juillet et octobre viennent s'ajouter à ceux d'avril et novembre – décembre (Figure 12) avec respectivement 10 et 12% de l'ensemble de la charge de travail annuelle (i.e. 2363 jours-hommes par an). Ces quatre pics d'activité sont liés :

- en avril, à la récolte et le battage du riz et la récolte des cultures de patate douce (début) et du maïs ;
- en juillet, au labour, au semis et à la fertilisation des cultures de contre-saison et la fin de la récolte de patate douce ;
- en octobre, à la récolte du blé, au labour et aux semis des cultures pluviales sur *tanety* (maïs et riz), au début des travaux de sol sur rizière de bas-fond, et au semis de la pépinière de riz ;
- en novembre et décembre, à la fin de la préparation des rizières et au repiquage des plants, au sarclage des premières parcelles des riz repiquées à la fin de la mise en culture et à la fertilisation des cultures sur *tanety*.

Les mois d'août et septembre composent la période creuse pour l'Exploitation 2, avec respectivement 5 et 6% de la charge totale de travail.

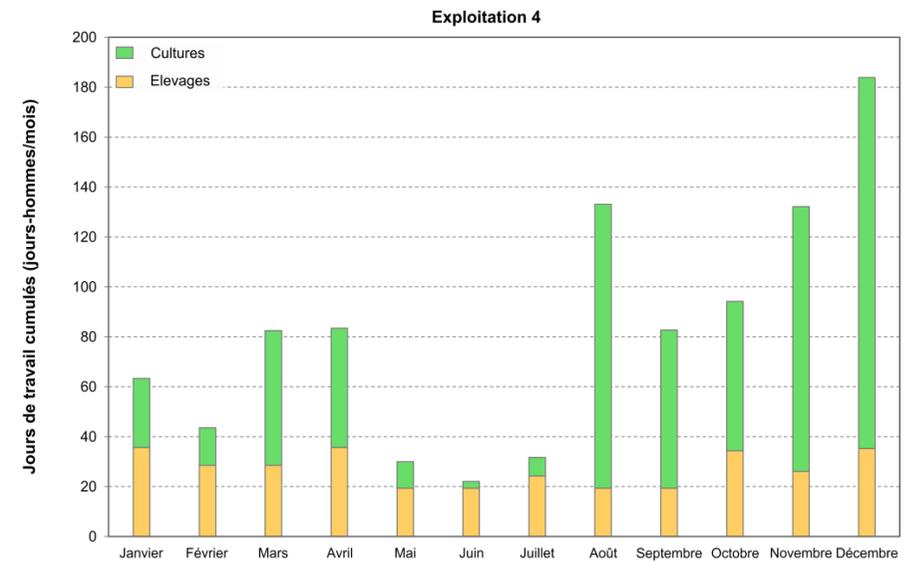
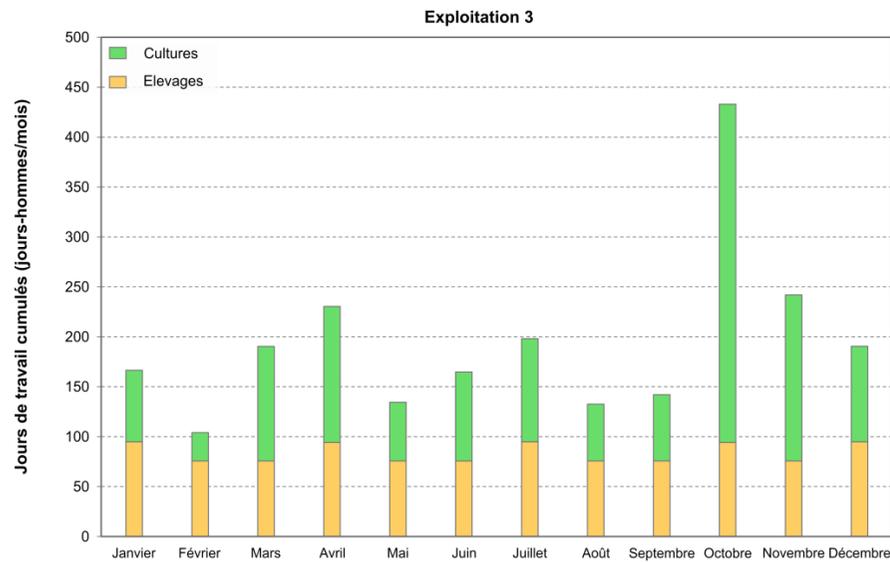
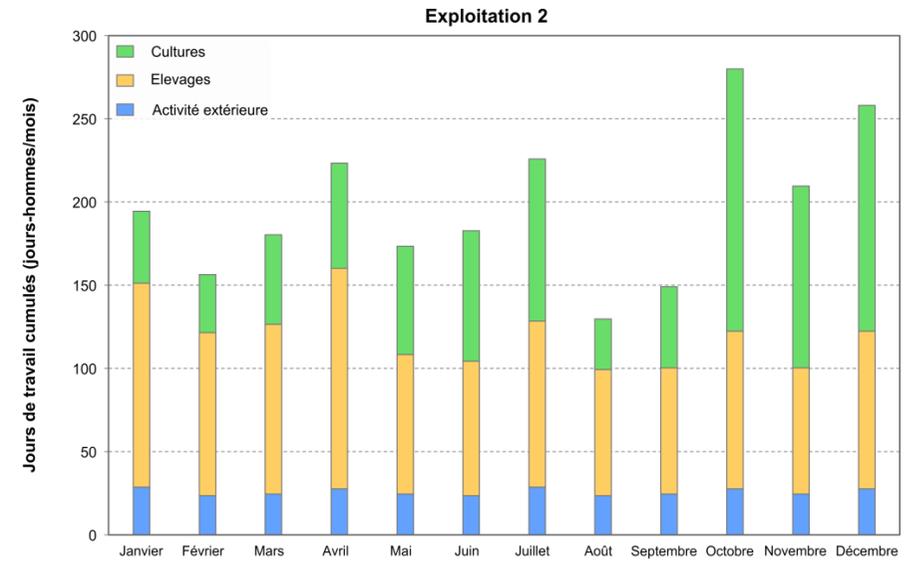
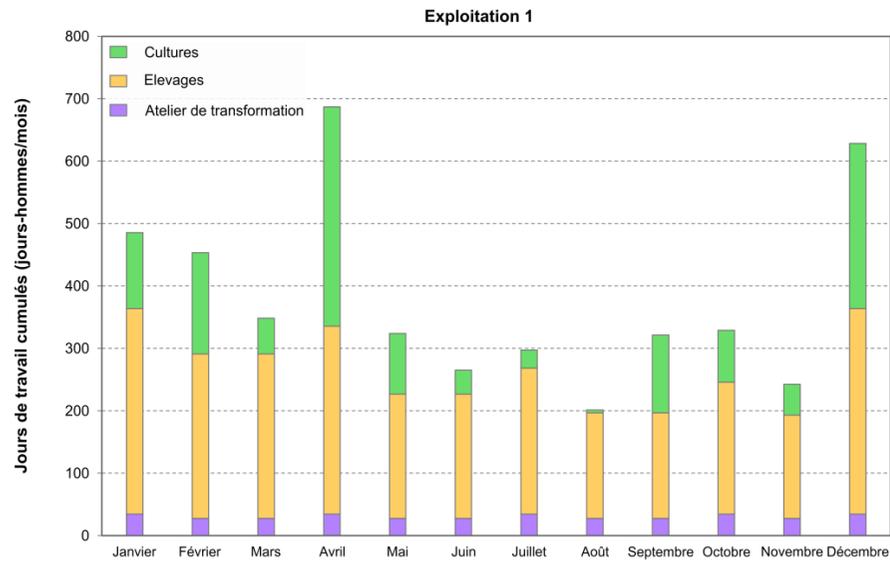


Figure 12 : Distribution de la charge annuelle de travail pour les quatre exploitations d'agriculture-élevage

Pour l'Exploitation 3, les trois principaux pics d'activité se situent en avril (récolte du riz, labour et mise en culture de la patate douce), octobre et novembre (Figure 12), avec respectivement 10, 19 et 10% de l'ensemble de la charge de travail annuelle (i.e. 2328 jours-hommes par an). Les mois d'octobre – novembre correspondent à la récolte des cultures de rentes sur bas-fond (orge et pomme de terre), au labour et mise en place des cultures sur *tanety* (maïs et patate douce), à la préparation des dernières rizières de bas-fond (labour, piétement des parcelles par les zébus), à la fertilisation organique des rizières et au début du repiquage. Le mois de février est le mois le moins chargé de l'année pour l'Exploitation 3 avec seulement 4% de la charge de travail annuelle totale.

L'Exploitation 4 présente un premier pic d'activité en mars – avril (récolte riz, patate douce et maïs sec) et une longue période surchargée dans la seconde moitié de l'année d'août à décembre (Figure 12), avec 14 et 19% de la charge totale de travail annuel (i.e. 982 jours-hommes par an) pour les mois d'aout et de décembre, respectivement. Cette longue période concentre les travaux de labour sur rizières et *tanety*, le semis du riz, le repiquage, le sarclage des premières parcelles de riz, et la mise en culture des cultures pluviales (riz pluvial, maïs, patate douce). La période creuse de l'Exploitation 4 s'étend de mai à juillet ; chaque mois représente environ 3% du total de la charge de travail. Ceci est en accord avec le fait que l'Exploitation 4 ne pratique aucune culture de contre-saison.

Le cumul de la charge de travail (Figure 13) indique que tout au long de l'année l'Exploitation 4 est celle qui emploie le moins de main d'œuvre pour le fonctionnement de l'exploitation. Les exploitations 2 et 3 sont proches tout au long de l'année et leur charge est en moyenne 2,4 fois supérieure à celle de l'Exploitation 4. La charge de travail de l'Exploitation 1 est quant à elle 4,7 fois supérieure à celle de l'Exploitation 4.

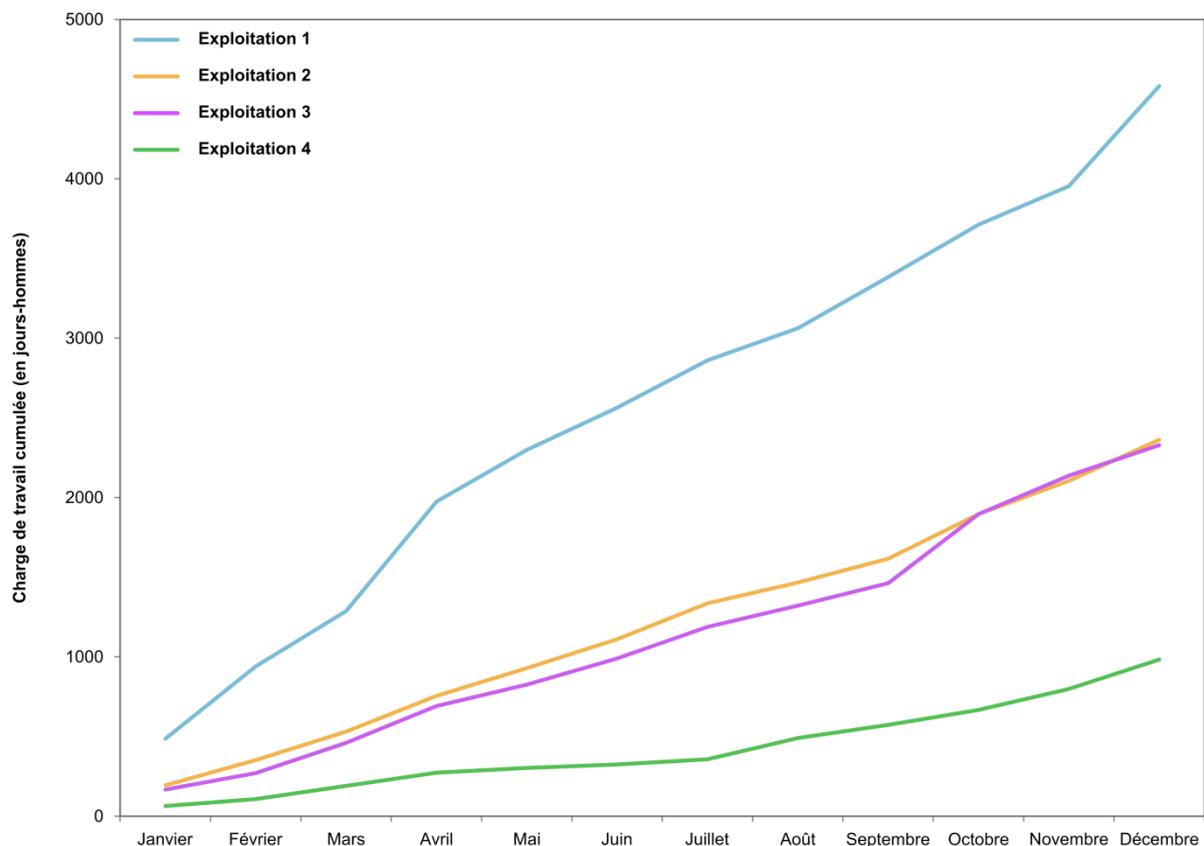


Figure 13 : Charge de travail cumulée au cours d'une année pour les quatre exploitations d'agriculture-élevage

Tableau 8 : Charges de travail pour les cultures et l'élevage

Exploitations	Charge de travail pour les cultures	Charge relative pour les cultures	Charge de travail pour l'élevage	Charge relative pour l'élevage
	jours-hommes/an	jours-hommes/ha/an	jours-hommes/an	jours-hommes/UGB/an
Exploitation 1	1383	102	2834	71
Exploitation 2	918	133	1137	142
Exploitation 3	1326	276	1002	84
Exploitation 4	657	243	326	109

Les charges de travail consacrées aux cultures pour les exploitations 2, 3 et 4 correspondent respectivement à 66, 96 et 47% du total du temps de travail dédié aux activités culturelles de l'Exploitation 1 (Tableau 8). En moyenne sur une années, les charges de travail relatives (jours-hommes/ha/an) pour les cultures des exploitation 3 et 4. De plus, malgré une surface cultivée près de 2,8 fois inférieure à celle de l'Exploitation 1 (Tableau 5), l'Exploitation 3 emploie presque autant de main d'œuvre que l'Exploitation 1 pour l'ensemble des activités culturelles. Le niveau élevé des besoins de main d'œuvre des exploitations 3 et 4 pourrait être dû :

- à une disponibilité moindre en animaux de trait, en matériel agricole (charrue) et en moyens de transports (charrettes, camions) (Tableau 5), se traduisant par des besoins main d'œuvre accrus (en particulier pour l'Exploitation 4). Par exemple, pour le transport du fumier sur les parcelles, l'Exploitation 1 peut utiliser deux charrettes à traction animale, voire le camion, alors que l'Exploitation 3 est forcée d'avoir recours au transport humain (*sobika*) de fumier ;
- à l'importance des cultures de rente de contre-saison pour l'Exploitation 3 (absente sur l'Exploitation 1), qui nécessitent des travaux d'entretien (plusieurs sarclages). Bien que les deux exploitations aient à peu près la même charge relative de travail pour le riz (environ 212 jours-hommes par ha), l'Exploitation 3 utilise 2,6 fois plus de main d'œuvre pour 1,4 ha de culture de contre-saison (303 jours-hommes par ha) alors que l'Exploitation 1 n'en emploie que 117 jours-hommes par ha pour l'avoine – ray-grass (1,6 ha).

De même, l'ensemble des temps de travail dédiés aux activités d'élevage des exploitations 2, 3 et 4 représentent respectivement 40, 35 et 11% du total de la charge annuelle de travail consacrée aux activités d'élevage dans l'Exploitation 1 (Tableau 8). Les deux systèmes ayant les charges relatives de travail pour les activités d'élevage les plus élevées (Exploitation 2 et Exploitation 4) sont celles qui utilisent le moins de concentrés (environ 1807, 197 et 430 kg MS/UGB/an, respectivement pour les exploitations 1, 2 et 3) et le plus de *bozaka* pour l'alimentation, la litière et le fumier (0,6, 2,9, 2,4 et 4,5 t MS/UGB/an, respectivement pour les exploitations 1, 2, 3 et 4).

L'Exploitation 1 est la seule des quatre exploitations dont le temps de travail consacré à l'élevage bovin laitier est supérieur à celui nécessaire pour l'ensemble des cultures (Figure 14). Les activités culturelles constituent donc les activités qui nécessitent le plus de temps de travail pour les exploitations 2, 3 et 4. Cette importance de l'élevage bovin dans l'Exploitation 1 est accentuée par le fait que l'ensemble des cultures sont destinées à l'élevage bovin, à l'exception de la culture du riz.

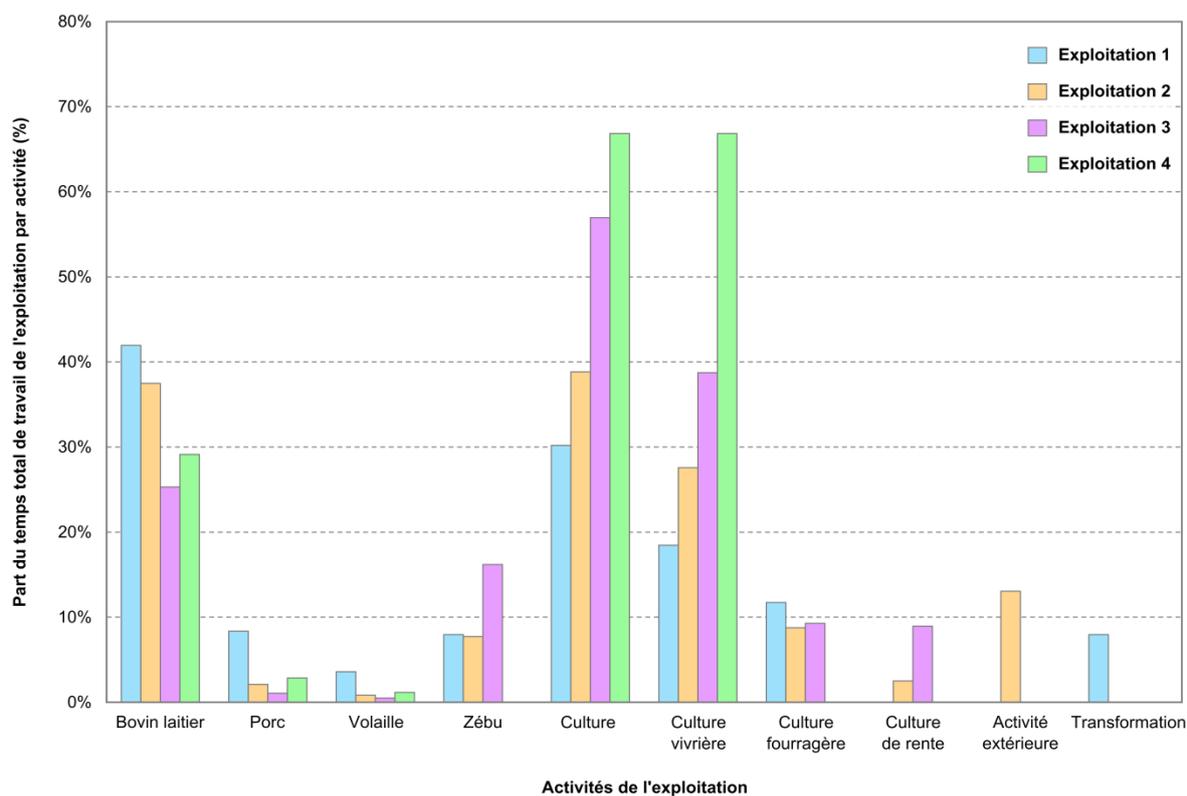


Figure 14 : Importance relative des activités dans chaque exploitation en fonction de la part du temps de travail global de l'exploitation pour les quatre exploitations d'agriculture-élevage étudiées

De plus, l'Exploitation 1 est celle qui présente la part de la charge de travail totale la plus importante pour l'élevage de porcs et de volailles.

Pour l'ensemble des exploitations, le temps de travail dédié aux cultures vivrières représente la plus grande partie de la charge de travail consacrée à l'ensemble des cultures, y compris pour l'Exploitation 1 qui cultive majoritairement des cultures fourragères. La culture de riz semble nécessiter davantage de main d'œuvre que les cultures fourragères. Pour l'Exploitation 4, le temps consacré à la mise en culture des cultures fourragères (brachiaria et sétaria) est négligeable par rapport à celui consacré aux cultures vivrières. Pour les exploitations 1, 2 et 3, les cultures fourragères occupent entre 9 et 12% de la charge totale de travail annuel. Seules les exploitations 2 et 3 ont des cultures de rente ; elles représentent une part importante du temps de travail pour l'Exploitation 3, environ 9%, mais seulement 3% du temps de travail total pour l'Exploitation 2. L'Exploitation 2 consacre près de 13% de sa charge de travail annuel à une activité extérieure (boucherie, négoce d'animaux), soit davantage que pour les cultures fourragères et de rente réunies (Figure 14).

La distribution du temps de travail au cours de l'année a montré l'existence de nombreux pics d'activités liés en particulier au calendrier cultural des exploitations. De manière générale, les pics d'activité sont liés à la culture du riz pour les quatre exploitations étudiées. La variabilité des charges de travail total d'une exploitation à l'autre serait due aux différences de structure (dimension des terres, du cheptel), de disponibilité du matériel agricole (charrette, charrue, camion) et à la diversité des pratiques (e.g. culture de rente ou alimentation à base de *bozaka* vs de concentrés). Les activités d'élevage reposent essentiellement sur de la main d'œuvre familiale ou permanente. Cependant, la

main d'œuvre extérieure est fréquemment sollicitée pour les activités culturelles (e.g. labour à l'*angady*, transport de *sobika* de fumier, récolte du riz, blé ou orge) dans les quatre exploitations suivies. Les ouvriers agricoles employés proviennent des communes respectives à chaque exploitation. Ainsi ces quatre exploitations affectent leur environnement social via la création d'emplois qui est un indicateur de durabilité sociale. L'impact de ces exploitations sur leur environnement social via la création d'emplois va donc varier avec l'offre de chaque exploitation. L'Exploitation 1, qui a la charge de travail la plus importante des quatre exploitations, est celle qui emploie au total le plus de main d'œuvre non familiale. Ainsi, l'impact d'Exploitation 1 sur la durabilité sociale en termes de création d'emplois semble plus important que pour les autres cas d'études.

Dans des systèmes agricoles employant peu ou pas d'intrants, les coûts engendrés par les salaires représentent la majeure partie des coûts des productions agricoles. Ainsi le coût de production du riz rapporté à l'unité de poids dépendra de la main d'œuvre employée et de la capacité du système à produire (i.e. rendement). A l'échelle globale de l'exploitation, le poids des salaires sur l'économie des exploitations dépendra du niveau des importations (i.e. achat d'animaux d'aliments, d'engrais minéraux, de pesticides, de soins vétérinaires, de nourritures). Par exemple, une exploitation qui importe de grandes quantités de concentrés pour l'alimentation des animaux aura potentiellement des coûts de main d'œuvre relativement faibles par rapport au total dépensé. Cependant, ce besoin en main d'œuvre non-familiale pour des productions indispensables et non commercialisées, tel le riz, pourrait mettre en péril la durabilité économique des exploitations de subsistance où très peu de productions sont commercialisées.

3.4.2 Pratiques et ressources financières

Un bilan économique de chaque exploitation a été réalisé à partir des données obtenues lors de l'enquête par immersion. Tous les achats et les ventes effectués durant l'année (i.e. 12 mois) qui a précédé la période d'immersion ont été répertoriés pour chaque exploitant (Annexe 6, Annexe 7, Annexe 8 et Annexe 9). Les dépenses familiales pour les achats de nourritures ont été incluses dans les bilans agricoles ; elles sont indispensables à l'alimentation de la famille et la main d'œuvre permanente et extérieure. Les écarts entre les bilans économiques des activités agricoles (recettes agricoles - dépenses agricoles) pour les quatre exploitations est extrêmement contrasté ; l'Exploitation 1 a un bilan économique plus de 35 fois supérieur à celui des exploitations 2 et 3 et ces dernières ont des bilans économiques 18 et 16 fois supérieurs à celui de l'Exploitation 4.

Les principales dépenses observées pour l'Exploitation 1, qui présente la spécialisation laitière la plus prononcée, sont les achats de concentrés (61 % du total des dépenses agricoles) et les achats de lait supplémentaires pour l'atelier de transformation (17% des dépenses agricoles). Les coûts de main d'œuvre permanente (5 %) et extérieure (3%) sont assez faibles par rapport à l'ensemble des dépenses agricoles de l'exploitation (Annexe 6).

Les deux activités engendrant les dépenses les plus importantes pour l'Exploitation 2 sont l'atelier d'engraissement porcin avec 37% du total des dépenses agricoles (achat de jeunes porcs, achat du maïs concassé) et les cultures (achat d'engrais minéral et pesticides) avec 30% des dépenses agricoles. L'emploi de la main d'œuvre extérieure pour les cultures couvre aussi une part importante (15%) des dépenses agricoles de l'Exploitation 2. Sachant que la main d'œuvre extérieure est dédiée aux cultures, l'activité culture est celle qui entraîne le plus de dépenses pour l'Exploitation 2 (Annexe 7).

Pour l'Exploitation 3, la principale source de dépenses agricoles est l'activité d'élevage bovin (en particulier la production laitière) avec 41% des dépenses agricoles de l'exploitation pour les achats de concentrés, de pailles de riz et les soins vétérinaires (dont insémination artificielle). La main d'œuvre extérieure et permanente est la seconde dépense agricole; elle représente près de 24% du total des dépenses agricoles de l'Exploitation 3 (Annexe 8).

L'Exploitation 4 est essentiellement orientée vers l'autoconsommation familiale. Elle utilise très peu d'intrants (moins de 1% des dépenses agricoles de l'exploitation) et n'achète aucun concentré. L'Exploitation 4 est celle qui présente les charges les plus limitées des quatre exploitations étudiées, environ 8 fois inférieures à celles des exploitations 2 et 3, et 58 fois inférieures à celles de l'Exploitation 1. Les principales dépenses agricoles résultent de l'emploi de main d'œuvre extérieure pour les travaux de culture (48% des dépenses agricoles de l'exploitation) et des achats d'aliments pour l'alimentation de la famille (42%). L'Exploitation 4 est la seule à consacrer plus de 13% des dépenses de l'exploitation à l'alimentation de la famille (Annexe 9).

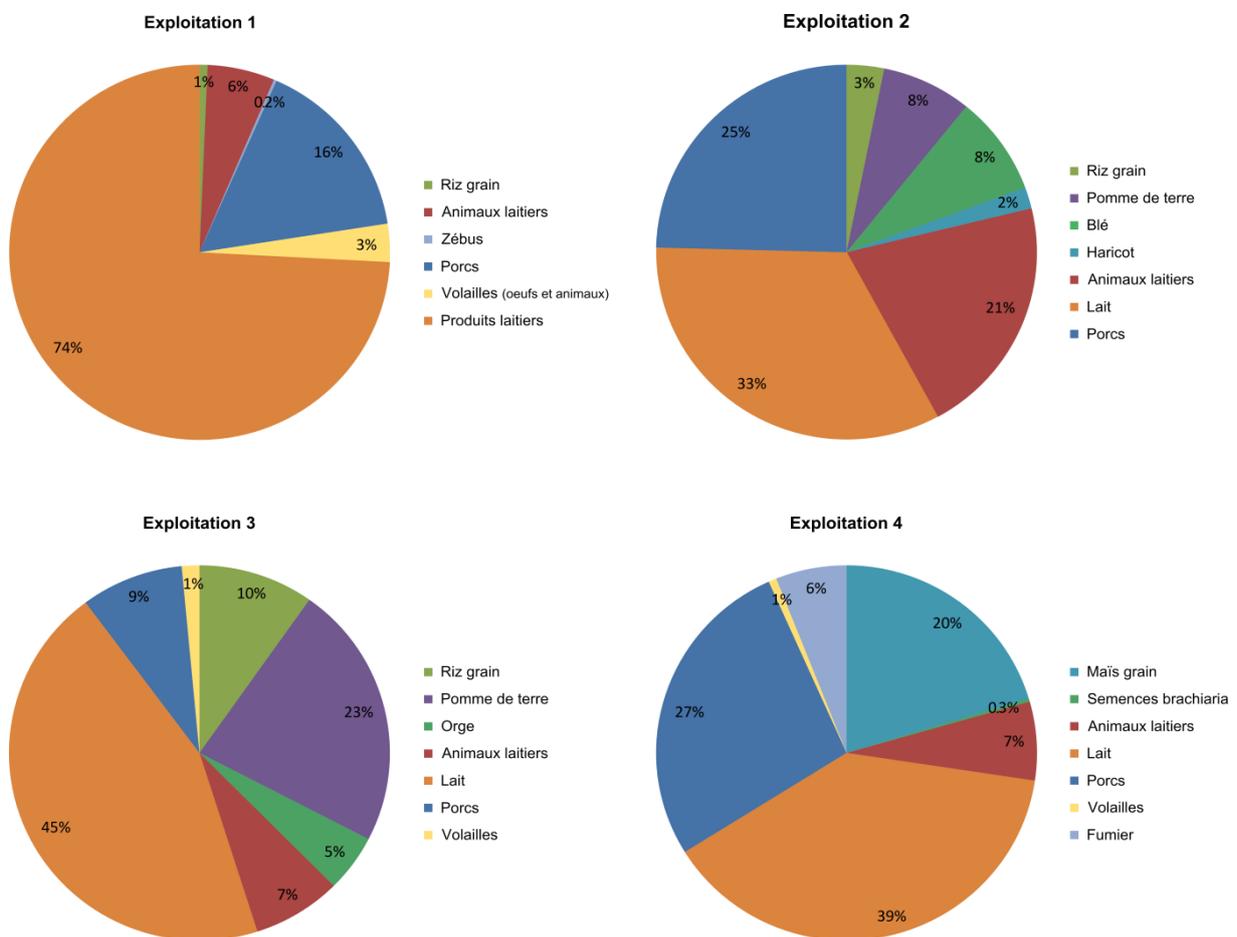


Figure 15 : Importance relative des différentes sources de recette agricole des quatre exploitations d'agriculture-élevage étudiées

La principale source de revenu des quatre exploitations d'agriculture-élevage est la vente de lait et de produits laitiers (Figure 15). Cependant, ce résultat est à nuancer pour l'Exploitation 4 du fait de la réduction drastique des ventes de lait et de l'effectif du troupeau bovin entre 2009 et 2011 (Tableau 9).

Pour l'Exploitation 1 la seconde source de revenus provient de la vente des porcs. L'ensemble des productions animales représente presque l'intégralité (99%) de ses recettes, confirmant ainsi l'orientation de l'exploitation vers une spécialisation dans l'élevage.

Les exploitations 2 et 3 montrent une plus grande diversification des activités agricoles par rapport à l'Exploitation 1, ce qui se traduit par une diversification des sources de revenus (ventes de pomme de terre, blé ou orge). L'ensemble des ventes de produits végétaux représentent 21 et 38% du total des recettes agricoles des exploitations 2 et 3, respectivement. Pour l'Exploitation 2, l'importance économique des ventes d'animaux (21%) est à mettre en relation avec le déstockage d'une partie du troupeau laitier pour faire face à la crise de la filière en début 2009. L'Exploitation 3 est la seule des quatre exploitations étudiées à baser plus d'un quart de ses entrées d'argent sur la vente de culture de rente.

La seconde source de revenus de l'Exploitation 4 est la vente d'un porc engraisé par an, qui finance la majeure partie de la main d'œuvre extérieure engagée pour les travaux de culture (octobre-novembre). L'importance de l'atelier porc dans l'économie de l'Exploitation 4 et la diminution progressive de l'activité d'élevage laitier sont en accord avec l'objectif mentionné par l'exploitant d'augmenter le nombre de porcs engraisés par an. La vente de maïs-grain représente une part importante (20%) des recettes agricoles dans l'économie de l'Exploitation 4. Le maïs apparaît ainsi comme la culture la plus importante après le riz en termes d'autosuffisance alimentaire de la famille et en termes économiques. L'Exploitation 4 est la seule des quatre exploitations à vendre du fumier. Ces ventes représentent une part presque aussi importante que la vente d'animaux laitier, soit environ 6% du total des recettes agricoles. La vente du fumier est très probablement à mettre en relation avec les pratiques de compostage (ajout de *bozaka*, ajout d'eau pour accélérer la décomposition des pailles) observées pour le fumier.

En ce qui concerne le bilan global d'exploitation (i.e. différence entre ensemble des recettes et des dépenses agricoles et non agricoles), l'Exploitation 4 est la seule exploitation à présenter un bilan global d'exploitation négatif (Tableau 9). Son efficacité économique (i.e. rapport entre l'ensemble des recettes et l'ensemble des dépenses) inférieure à 1 indique que 23% de l'ensemble des dépenses de l'exploitation ne parviennent pas à être compensés. En d'autres termes, les activités agricoles n'arrivent pas à générer assez de revenus pour subvenir à l'ensemble des besoins de la famille.

Malgré d'importantes dépenses en matériel agricole, pour les besoins de la famille (nourritures, scolarité, santé) et d'autres dépenses exceptionnelles (achat d'un ordinateur), l'Exploitation 1 reste largement bénéficiaire et possède l'efficacité économique la plus forte des quatre exploitations. Seule l'activité volaille (poules pondeuses) ne semble pas rentable, ceci pourrait s'expliquer par une possible surestimation des quantités d'aliments pour volailles achetés sur l'année. De plus, l'efficacité économique des cultures est à relativiser puisque la main d'œuvre extérieure employée pour les travaux de cultures n'est pas incluse dans les calculs.

L'efficacité économique élevée pour les exploitations 2 et 4 est liée au faible niveau des dépenses pour l'alimentation des animaux (peu ou pas d'achat de concentré), à l'utilisation préférentielle des fourrages produits sur l'exploitation ou prélevés à l'extérieur et la ventes d'animaux. Ces deux élevages bovins sont donc des élevages à faible niveau d'intrants avec déstockage d'une partie du troupeau. Il en est de même pour le système de culture de l'Exploitation 4 : la forte efficacité économique des cultures est liée au fait que très peu d'argent est investie en intrants (engrais minéral et/ou pesticide).

Tableau 9 : Ensemble des bilans par activités et autres sources de dépenses ou revenus pour l'obtention du bilan global et de l'efficacité économique globale de l'exploitation pour les quatre exploitations d'agriculture-élevage

Sources	Exploitation 1		Exploitation 2		Exploitation 3		Exploitation 4	
	Bilan (Ar)	Efficacité économique	Bilan (Ar)	Efficacité économique	Bilan (Ar)	Efficacité économique	Bilan (Ar)	Efficacité économique
Cultures	280 000	1.5	-454 636	0.8	3 135 357	4.5	205 144	4.0
Elevage bovin	50 396 447	2.1	5 152 654	7.5	1 750 988	1.5	646 071	17.6
Elevage porcin	8 902 150	1.8	-740 262	0.8	-234 868	0.8	286 750	4.9
Elevage de volailles	-1 836 333	0.7	-6 750	0.0 ⁽²⁾	139 000	7.6	9 000	/ ⁽⁴⁾
Main d'œuvre (extérieure et permanente)	-5 330 625	/	-1 700 000	/	-2 204 522	/	-538 318	/
Bâtiments et matériels*	-1 268 500	/	-162 476	/	-268 200	/	-93 000	/
Famille: besoins alimentaires	-1 606 350	/	-669 600	/	-1 198 267	/	-521 400	/
Famille: autres besoins**	-5 524 064	/	-1 046 114	/	-623 181	/	-474 536	/
Activité extérieure	/	/	2 539 250	1.1	/	/	/	/
Autres sources de revenus	4 260 000 ⁽¹⁾	/	0	/	1 000 000 ⁽³⁾	/	/	/
Crédit à rembourser	/	/	-1 253 167	/	/	/	/	/
Dépenses exceptionnelles et/ou autres sources de dépenses	-1 860 000	/	-40 000	/	/	/	/	/
Global d'exploitation	46 412 725	1.58	1 618 898	1.05	1 496 307	1.15	-480 289	0.7

Efficacité économique : efficacité économique, définit par le rapport de l'ensemble des recettes de l'exploitation sur de l'ensemble des dépenses de l'exploitation ; * : achats de matériel ou amortissement du matériel déjà acheté non-amorti, entretien annuel du matériel et des bâtiments ; ** : besoins de la famille liés à achats de produit pour le quotidien (bougies, allumettes, etc), l'hygiène, la santé, les frais de scolarité des enfants, les cérémonies et exhumations.

(1) : revenus issus du salaire d'instituteur de l'épouse de l'exploitant ; (2) : efficacité nulle car aucune recette n'est générée de l'activité volaille ; (3) : revenus correspondant à l'épargne de l'exploitant 3 ; (4) : efficacité non calculable car les dépenses étaient nulles.

Malgré le fait que l'activité porc représente 25 et 9% de l'ensemble des revenus agricoles des exploitations 2 et 3 respectivement, cet atelier n'arrive pas à compenser les dépenses qu'il génère. Dans l'Exploitation 2, la mort de deux animaux adultes atteints de peste porcine pourrait expliquer ce manque à gagner. Pour l'Exploitation 3, le bilan négatif pourrait s'expliquer par une surestimation possible des quantités de maïs concassé acheté sur l'année. Le bilan positif et la forte efficacité économique de l'activité porc pour l'Exploitation 4 conforte l'objectif de l'agriculteur d'accroître cette activité.

Les activités extra-agricoles de l'Exploitation 2 présente un bilan très positif et constitue l'activité la plus rémunératrice derrière l'élevage bovin. Cependant elle demande d'importants investissements pour fonctionner. En effet, environ 18 400 000 Ar par an (soit environ 9 400 US\$/an) sont nécessaires pour les achats d'animaux de boucherie ou de négoce pour une recette de près de 20 900 000 Ar par an (soit environ 10 700 US\$/an).

Pour les quatre cas d'étude, les enquêtes par immersion ont permis d'apporter des informations détaillées relatives aux flux économiques de l'exploitation (activités de cultures, activités d'élevages, bâtiments et matériels) et du ménage (nourriture, scolarité, santé, habillement, cérémonies, épargne, etc.).

Ces informations détaillées ont permis d'expliciter trois modes de gestion économique :

- une économie basée majoritairement sur le secteur laitier. L'Exploitation 1 est un système productif à fort niveau d'intrants. Elle mobilise d'importants échanges monétaires, sortants (achats d'aliments, achat de lait) et entrants (vente de produits laitier). L'atelier de transformation laitier permet la création de valeur ajoutée. Il s'agit alors d'un système productif à forte spécialisation laitière entièrement tourné vers la commercialisation.
- une économie basée sur l'élevage laitier et la diversification des revenus. Les exploitations 2 et 3 présentent une activité lait qui génère une grande partie des recettes agricoles (33 et 45% respectivement) et une diversification des revenus par de l'élevage porcin et des cultures de rentes. L'Exploitation 2 se distingue de l'Exploitation 3 par la diversification de ses revenus par des activités extra-agricoles.
- une économie de subsistance. L'Exploitation 4 est un système à faibles échanges monétaires ; peu d'intrants achetés et peu de production commercialisée. Depuis l'arrêt des ventes de lait, elle repose essentiellement sur une agriculture vivrière d'autoconsommation. Les principales dépenses sont dues aux besoins de la famille, directement (nourriture, scolarité, santé...) ou indirectement (main d'œuvre pour la culture du riz, aliment de base de la famille).

4 Conclusion

La typologie des exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra réalisée révèle l'existence de six types d'exploitations distincts par leurs pratiques d'élevage, de cultures, et/ou leur structure. Les quatre exploitations enquêtées par immersion appartiennent chacune à un groupe typologique différent et sont ainsi représentatives d'une majeure partie de la diversité des exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra. Seules les d'exploitations d'agriculture-élevage caractérisées par des troupeaux laitiers avec des animaux à dominante zébu et ne pratiquant pas la stabulation permanente n'ont pas été prises en compte dans notre étude. Ainsi les quatre exploitations d'agriculture-élevage sélectionnées dans cette étude ne couvrent que la diversité des systèmes d'agriculture-élevage à orientation laitière.

Les enquêtes par immersion dans les quatre exploitations d'agriculture-élevage sélectionnées ont facilité l'accès à l'information et une meilleure interprétation des dires des exploitants et des résultats des enquêtes. Ces enquêtes et suivis ont fourni des informations précises sur les pratiques et le fonctionnement des exploitations qui ont permis d'expliciter les flux des biomasses au sein des exploitations, les besoins en main d'œuvre et les périodes de surcharge de travail, et les flux économiques des exploitations. Le choix d'un échantillon réduit a été incité par le climat d'instabilité qui régnait à Madagascar au début de ce travail et la volonté de procéder à des enquêtes très détaillées. Les exploitations étant éloignées les unes des autres, et parfois enclavées, le suivis d'un échantillon d'exploitations restreint réduit aussi les difficultés logistiques. Enfin, travailler avec des exploitations réelles et non des exploitations « types » fictives permet d'impliquer les agriculteurs directement dans les questionnements de l'étude, de bénéficier de leur connaissance du milieu et

d'échanger directement avec eux sur des résultats qui pourraient sembler « incohérents » à première vue.

Bien que l'étude n'ait porté que sur quatre exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra, de grandes sources de variabilités ont été observées en termes de : (i) structure et objectifs d'évolution, (ii) pratiques et flux de biomasses, (iii) charge de travail et (iv) ressources économiques.

En ce qui concerne la structure et les tendances évolutives, les exploitations se distinguent clairement entre elles. En effet, l'Exploitation 1, qualifiée de « grande exploitation », connaît une rapide croissance depuis ces dernières années, et l'objectif actuel de l'exploitant est de continuer cette croissance en termes de surfaces et de production laitière. Les exploitations 2 et 3 sont considérées comme « intermédiaires » vis-à-vis de leur structure. Mais elles se distinguent par une densité animale plus élevée dans l'Exploitation 3 (i.e. surface agricole inférieure pour une taille du troupeau bovin semble). Ces deux exploitations partagent un objectif commun, augmenter les surfaces agricoles mais maintenir la taille du troupeau laitier constante. Enfin la « petite exploitation », Exploitation 4, a présenté une tendance évolutive de réorientation et diminution de son activité laitière jusqu'à un système presque entièrement voué à d'autoconsommation.

La diversité des pratiques au sein des exploitations induit une diversité des flux de biomasses. Ces flux seront d'autant plus différents que la structure de l'exploitation sera contrastée. A l'échelle de l'exploitation, la taille du troupeau laitier ou des surfaces cultivées accroît les différences de flux de biomasses liées aux pratiques d'alimentation ou de fertilisation par exemple. Les flux de biomasses les plus importants ont été observés pour l'Exploitation 1. Il s'agit de l'exploitation à forte spécialisation laitière, qui pratique une alimentation à base de fourrages (cultivés sur l'exploitation) et d'aliments concentrés achetés. La fertilisation organique et minérale pour cette exploitation est pratiquée exclusivement sur les cultures fourragères. En relation avec la taille du cheptel bovin, des quantités de fumier appliquées sont très importantes. L'Exploitation 2 et l'Exploitation 3 présentent des pratiques et des flux de biomasses similaires : élevage laitier et diversification des activités par des cultures de rentes. La disponibilité en fumier étant moindre, ces deux exploitations ciblent les apports de fumier et d'engrais minéral en particulier sur les parcelles de cultures de rentes et les fourrages de contre-saison. Bien que la base de l'alimentation du troupeau laitier soit semblable pour ces deux exploitations (fourrages, résidus de cultures, *bozaka* et aliments concentrés), l'Exploitation 2 se démarque de l'Exploitation 3 par une volonté de diminuer l'achat des concentrés (remplacés alors par des tubercules cultivées sur l'exploitation). Cela souligne deux orientations différentes de ces exploitations d'agriculture-élevage : davantage tournée vers les cultures pour l'Exploitation 2 et vers l'élevage laitier pour l'Exploitation 3. L'Exploitation 4 pratique une agriculture vivrière d'autoconsommation, avec de très faibles niveaux d'intrants pour l'élevage et les cultures. L'alimentation de l'élevage laitier est basée sur l'utilisation des résidus de cultures et des *bozaka*. Le fumier est composté avec des ajouts de pailles ; une partie sert à fertiliser les cultures vivrières sur *tanety* et l'autre partie est destinée à la commercialisation.

Les besoins en main d'œuvre augmentent avec la dimension des exploitations. La main d'œuvre extérieure est essentiellement employée pour les activités culturales (à l'exception de la conduite de la charrue) et celle permanente destinée aux activités d'élevages. Les pics d'activités pour les quatre exploitations sont principalement liés au calendrier cultural, et en particulier à la culture du riz. L'emploi de main d'œuvre extérieure pour le riz est systématique dans les quatre exploitations, même pour l'Exploitation 4 de subsistance. Les variations en besoin de main d'œuvre proviennent de différences dans les cultures mises en place, leurs surfaces, les techniques utilisées et le matériel

agricole disponible. Tout au long de l'année, les besoins en main d'œuvre des activités d'élevage varient peu au sein d'une même exploitation, mais les différences entre exploitations sont essentiellement liées à la taille du cheptel, et aux pratiques d'alimentation (e.g. récolte de *bozaka* vs achat de concentré).

L'analyse des flux monétaires des exploitations a révélé trois modes de gestions économiques. L'Exploitation 1, système productif à fort niveau d'intrants, a une économie basée majoritairement sur le secteur laitier avec un atelier de transformation laitier qui génère de la valeur ajoutée. Les exploitations 2 et 3 ont une économie basée sur l'élevage laitier et la diversification des revenus par des cultures de rentes, un atelier porcin ou une activité extra-agricole (cas de l'Exploitation 2). L'Exploitation 4 est un système à faibles échanges monétaires (peu d'intrants achetés et peu de production commercialisée) et elle repose essentiellement sur une agriculture d'autoconsommation. La durabilité économique de cette dernière exploitation est mise en péril. En effet le peu de ventes agricoles réalisées ne parviennent pas à compenser les dépenses obligatoires liées aux besoins de la famille, ce qui se traduit par un bilan global d'exploitation négatif.

La variabilité des systèmes d'exploitation et des pratiques précédemment décrites sont susceptibles d'induire des différences en termes de durabilité environnementale (fertilité des sols, recyclage des éléments nutritifs, efficacité azotée des exploitations) et de durabilité socio-économique (création d'emplois, autosuffisance alimentaire, marge brute agricole).

La variabilité dans les pratiques culturales (type de culture, itinéraires techniques), et dans les pratiques de fertilisation (type de fertilisant, quantités apportées, apports de fertilisant ciblés sur certaines cultures ou parcelles) peuvent induire une variabilité de la fertilité des sols entre les exploitations et au sein même d'une exploitation. Cette variabilité viendrait s'ajouter à l'hétérogénéité intrinsèque de la fertilité des sols. En perspective, une caractérisation de l'état de fertilité des sols et de sa variabilité pour les quatre exploitations serait nécessaire afin d'identifier quels sont les impacts réels (positifs ou négatifs) de ces pratiques sur la fertilité des sols.

Les pratiques de fertilisation et d'alimentation des animaux affectent la productivité des cultures et des animaux, et donc indirectement les recettes liées aux ventes des produits agricoles. Les importations de fertilisants produits à l'extérieur (engrais minéral, fumier acheté) ou d'aliments extérieurs (*bozaka*, concentrés) constituent des entrées en éléments nutritifs dans les systèmes d'exploitation ; ces éléments nutritifs seront par la suite intégrés dans un processus de recyclage au sein de l'exploitation. Une des étapes clé de ce recyclage en éléments nutritifs est la gestion des effluents d'élevage. La variabilité des pratiques de gestion des effluents peut entraîner des pertes variables en éléments nutritifs et rendre ainsi le processus de recyclage plus ou moins efficace. Des études supplémentaires sont à mener pour les exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra afin de caractériser les impacts des pratiques d'alimentation du troupeau laitier, d'imports de fertilisant minéral, et d'amélioration de la gestion des effluents sur la production de l'exploitation, la marge brute agricole et le recyclage des éléments nutritifs.

Références

- Andriamanalina, Beby Seheny, 2007. Missions économiques. Fiche de synthèse : La filière lait à Madagascar. Mission économique de Tananarivo, Antananarivo, Madagascar, 4 p.
- Beauvais, Constance, 2010. Caractérisation des facteurs de variation de la qualité des engrais organiques animaux dans les élevages bovins laitiers du Vakinankaratra, Madagascar. Master degree Montpellier SupAgro, Montpellier, France, 67 p.
- CPCS, 1967. Commission de Pédologie et Cartographie des sols, Classification des Sols. ENSA, Grigon. 87 p.
- FAO, 2012. FAOSTAT. <http://faostat.fao.org/default.aspx>
- Gallenga, G., 2008. L'empathie inversée au cœur de la relation ethnographique. *Journal des anthropologues*, 145-161.
- GSDM, TAFA, and FIFAMANOR, 2008. Guide pour les Hautes Terres de Madagascar. Conduite des systèmes de culture sur couverts végétaux et affouragement des vaches laitières. GSDM - TAFA - FIFAMANOR, Antsirabe. 90 p.
- Herrero, M., Thornton, P.K., Gerber, P., and Reid, R.S., 2009. Livestock, livelihoods and the environment: understanding the trade-offs. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 1, 111-120.
- Kassam, A., Friedrich, T., Shaxson, F., Reeves, T., Pretty, J., and De Moraes Sá, J.C., 2011. Production Systems for Sustainable Intensification. *Technology Assessment - Theory and Practice (TATuP)* 20, 38-45.
- Lebart, L., Piron, M., and Morineau, A., 2006. Statistique exploratoire multidimensionnelle. Visualisation et inférence en fouille de données. 4 ed. Dunod. 480 p.
- Liu, J., You, L., Amini, M., Obersteiner, M., Herrero, M., Zehnder, A.J.B., and Yang, H., 2010. A high-resolution assessment on global nitrogen flows in cropland. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 8035-8040.
- MAEP, 2012. Filière technique agricole. Le blé. <http://www.maep.gov.mg/filtecble.htm>
- Malinowski, B., 2003. The subject, method and scope of this inquiry. In: Routledge (Ed.), *Argonauts of the Western Pacific: An Account of Native Enterprise and Adventure in the Archipelagoes of Melanesian New Guinea (1922) Taylor and Francis (11th editions)*, pp. 1-20.
- R Core Team (2012). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Version 2.14, Vienna, Austria. URL : <http://www.R-project.org/>
- Riquier, J., 1968. Carte pédologique de Madagascar à l'échelle de 1 : 1000 000. Orstom, Tananarive,
- Rosegrant, M.W., Paisner, M.S., Meijer, S., and Witcover, J., 2001. Global food projections to 2020: emerging trends and alternative futures. IFPRI, Washington, USA. 206 p.
- World Bank, 2012. Data World Bank. <http://data.worldbank.org/indicator>

Chapitre 3 :
Variabilité de la fertilité des sols
inhérente et induite par les
pratiques pour les exploitations
d'agriculture-élevage des hauts
plateaux de Madagascar

Dans les hauts plateaux de Madagascar, une grande variabilité des paysages est observable en lien avec la diversité de la toposéquence (e.g. collines *versus* bas-fonds), des types de sol (e.g. sols de couleur jaune, rouge, ou marron) et de l'utilisation des terres (e.g. bois, savanes ou cultures annuelles) (Chapitre 1 et Chapitre 2). Les contrastes morphologiques s'accompagnent généralement d'une hétérogénéité de la fertilité des sols (indicateur de durabilité environnementale) d'origine intrinsèque. Cependant, cette hétérogénéité de la fertilité des sols pourrait aussi être induite par la variabilité des pratiques culturales (e.g. type de culture, itinéraire technique) et des pratiques de fertilisation (e.g. fertilisation « ciblée ») décrite précédemment (Chapitre 2). Entre exploitations d'agriculture-élevage, la variabilité des pratiques de gestion des effluents pourrait se traduire par des niveaux différents de recyclage de la biomasse et des éléments nutritifs présents dans les excréta, et ainsi par des variations dans la quantité et la qualité des effluents d'élevage disponibles. De plus, la pratique d'une fertilisation préférentielle sur certaines parcelles (fertilisation « ciblée ») et les différences de quantités d'engrais (organique et/ou minéral) appliquées selon les cultures (Chapitre 2) sont susceptibles d'accentuer la variabilité spatiale de la fertilité des sols au sein d'une même exploitation.

Objectif de l'étude

L'objectif de ce chapitre est d'étudier la variabilité de la fertilité des sols au sein des exploitations d'agriculture-élevage des hauts plateaux malgaches et de comprendre les effets des pratiques de gestion des parcelles sur la variabilité de fertilité des sols.

Méthodologie

Des prélèvements de sol (horizon 0-20 cm) ont été effectués pour l'ensemble des parcelles des quatre exploitations d'agriculture-élevage étudiées ; au total 487 échantillons de sol ont été obtenus. Chaque échantillon a été caractérisé par le type de sol, la position de la parcelle dans la toposéquence (burrelet de berge, bas-fond, terrasses ou colline) et les pratiques culturales. Les échantillons de sol ont été analysés par spectrométrie moyenne et proche infrarouge. Deux modèles linéaires à effets mixtes ont été développés pour expliquer la variabilité du carbone et du phosphore du sol en fonction du type de sol, de la position dans la toposéquence, et des pratiques de gestions des parcelles.

Principaux résultats

Les principaux résultats de ce chapitre indiquent qu'il n'existe pas de gradient de fertilité des sols en lien avec la distance à l'habitat. Cependant les unités de paysage se démarquent nettement, avec des teneurs en carbone organique et en azote total du sol significativement inférieures pour les parcelles de bas-fonds. Les pratiques de semis direct sous couverture végétale, de fertilisation organique (fumier) et l'absence de culture (bois ou *tanety* non cultivée) ont montré des effets significativement positifs sur les teneurs en carbone organique du sol. Bien que les sols d'origine volcanique (cambisols) et les apports importants en fumier aient montré des effets significativement positifs sur les teneurs en phosphore du sol, une large partie de la variabilité du phosphore du sol reste inexplicée.

Conclusion

Ce chapitre incite à apporter une attention particulière aux les parcelles de bas-fond, probablement en augmentant les apports de fertilisants organiques et minéraux sur ces parcelles.

Ce Chapitre 3 est adapté de l'article soumis à *Agriculture Ecosystems and Environment* :

Alvarez S., Tittonell P., Tillard E., Albrecht A., Scopel E., Bocquier F., Inherent and farmer-induced soil variability in smallholder crop-livestock systems in the highlands of Madagascar (in correction).

Inherent and farmer-induced soil variability in smallholder crop-livestock systems in the highlands of Madagascar

Alvarez S.^a, Tiftonell P.^b, Tillard E.^a, Albrecht A.^c, Scopel E.^d, Bocquier F.^{e,f}

^a Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux, CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), 7 ch de l'IRAT, 97410 Saint-Pierre, Réunion

^b Systèmes de Culture Annuels, CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), TA B02/102 Av. Agropolis, 34398, Montpellier cedex 5, France

^c SeqBio, Carbon Sequestration and Soil Biota Group, Institut de Recherche pour le Développement (IRD), BP 434, Ambatoroka, 101 Antananarivo, Madagascar

^d Systèmes de Culture Annuels, CIRAD, Ampandrianomby, BP 853, Antananarivo 101, Madagascar, eric.scopel@cirad.fr

^e Montpellier SupAgro, UMR868 Sciences Animales, 2 place P. Viala, 34060 Montpellier, France

^f Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux, INRA (Institut National de Recherche Agronomique), 2 place P. Viala, 34060 Montpellier, France

Corresponding author: Tel.: + 262 262 49 92 71; fax: + 262 262 49 92 95.

E-mail address: stephanie.alvarez@cirad.fr (S. Alvarez)

Abstract

Land degradation is particularly strong in the densely populated highlands of Madagascar. Soil fertility depletion exhibits spatially heterogeneous patterns, which are influenced by inherent soil-landscape variability, land use and management practices as determined by farm resource endowment. A total of 487 topsoil samples (0-20 cm) were collected in four contrasting sites of the Malagasy highlands, dominated by Ferralsols and Cambisols. The objectives were (i) to study variability in soil fertility indicators at farm and landscape scales and (ii) to understand how farmer management practices induce (or counterbalance) soil variability. Soil samples were analysed through NIRS and MIRS spectroscopy. Linear mixed effects (LME) modelling was used to partition the variance in soil fertility indicators. Soil C and total N increased significantly ($P < 0.05$) from alluvial *Baiboho* soils (8 g kg⁻¹ C; 0.52 g kg⁻¹ N), to lowland paddy fields and terraced foothills (15.6 g kg⁻¹ C; 1.24 g kg⁻¹ N) and upland soils on *Tanety* hills (32.7 g kg⁻¹ C; 2.28 g kg⁻¹ N). While tillage practices and intensity of manure fertilisation explained part of this residual variance, particularly between field plots, yet unexplained variance was associated with within-field soil variability. Extractable P levels were generally high, on average 36% higher in Cambisol than in Ferralsols (63.3 mg kg⁻¹), and on average 26% higher in fields receiving intense manure fertilisation.

Keywords: Soil fertility management; crop-livestock interactions; tillage; manure; infrared reflectance spectroscopy; soil organic carbon

1 Introduction

Soil fertility is the meeting point of three major concerns around tropical agriculture: food insecurity, alleviation of rural poverty and prevention of ecosystem degradation. Poor soil fertility may be inherent to certain soil types and climates, or induced through nutrient depletion and physical degradation. Land degradation constrains land productivity particularly under smallholder management, characterized by limited access to external nutrients sources. Assessment of nutrient depletion rates in the Tropics made in the last two decades showed alarming results, especially for African countries (e.g., Stoorvogel and Smaling, 1990). Soil phosphorus and nitrogen depletion, for example, are indicated as major factors limiting food production of smallholder farms in Africa (e.g., Sanchez et al., 2003), particularly in densely populated regions (Tittonell et al., 2008). This picture is also common for the highlands of Madagascar, in spite of its fertile soils and conducive agroecological conditions. Such inherently nutrient- and carbon-rich, deep volcanic soils are however unable nowadays to sustain sufficient productivity of the major crops in the region, rice, maize and winter cereals.

The highlands of Madagascar exhibit one of the fastest rates of human population growth in rural areas (FAO, 2011), as a consequence of which the area of arable land available to smallholders has declined from 0.29 ha per person in 1990 to 0.19 ha per person in the 2008. Nutrient depletion rates in these soils were estimated at 20-40 kg ha⁻¹ year⁻¹ for N, 4 - 7 kg ha⁻¹ year⁻¹ for P and 17 – 33 kg ha⁻¹ year⁻¹ for K, more than a decade ago (Smaling et al., 1997). Severe soil water erosion and physico-chemical deterioration were also documented (Nyssen et al., 2009). Cash-constrained smallholder farmers face increasing prices of mineral fertilizers in the region; e.g., the price paid for urea was multiplied by almost four in relative terms from 1990s to 2000, while rice prices increased far less than proportionally (FAO, 2011). Farmyard manure is available to farmers owning livestock, and the quality and the quantities available are influenced by the type livestock activity (dairy, poultry, pigs), the management system (confined or free ranging) and the size of the activity, all of which is closely linked to farmer resource endowments (Samad Houssein M., 2009).

Due to limited availability of nutrient resources, smallholder farmers tend to allocate these resources unevenly in space and time, leading to management-induced soil variability, as observed elsewhere (e.g., Samaké et al., 2005; Tittonell et al., 2005; Zingore et al., 2007). The result may be a mosaic of soil fertility situations across the agricultural landscape, determined by land use and management practices, and interacting with the underlying geology and geomorphology of the area. Any attempt to improve soil productivity or to reduce soil depletion, anticipating the effects of current rural population growth, needs to embrace such spatial variability and its causes as a key variable for agroecosystem management. In spite of Madagascar being presented as a hotspot of land degradation, there is still scarce data on soil fertility status and its spatial variability within farms and landscapes (Boardman, 2006; Vågen et al., 2006b). At a regional scale, Vågen et al (2006b), showed wide soil variability associated mostly with variability in soil and land use types (deforestation). Such variability, however, remains largely associated with parent materials and climatic differences at this scale of analysis.

Characterising patterns of soil variability at local scale is essential for fine-tuning soil improving technologies and management recommendations. Such information is needed, for example, to

improve nutrient use efficiencies through targeted mineral fertilizer and manure applications, conservation farming or agroforestry interventions. We hypothesise that the spatially heterogeneous patterns of soil fertility can be categorized for better targeting by unravelling the interaction of inherent soil-landscape variability times, land use and management across diverse soils and sites. Our objectives are (i) to describe and quantify soil fertility variability and its determinants at regional, landscape and farm scale and, (ii) to understand how farmer management practices affect soil fertility and its variability, reinforcing or counteracting the inherent soil heterogeneity. We sampled soils from agricultural fields along landscape topo-sequence transects in four contrasting sites representing the regional variability in soil types and practices. Management and land use information were collected through interviews with farmers, and the soil and management data were analysed through mixed multivariate modelling to categorise variability.

2 Materials and methods

2.1 The study area

The study was conducted in the region around Antsirabe (19°51'S; 47°01'E), in the Malagasy Highlands (1200-1550 m elevation). Dominant soils in the area are Ferralsols (FAO, 2007) coexisting with soils derived from more recent volcanic activity (Cambisols, Andosols) and lithic raw mineral soils formed on gneiss, quartz or granite (Zebrowski and Ratsimbazafy, 1979) (Figure 1).

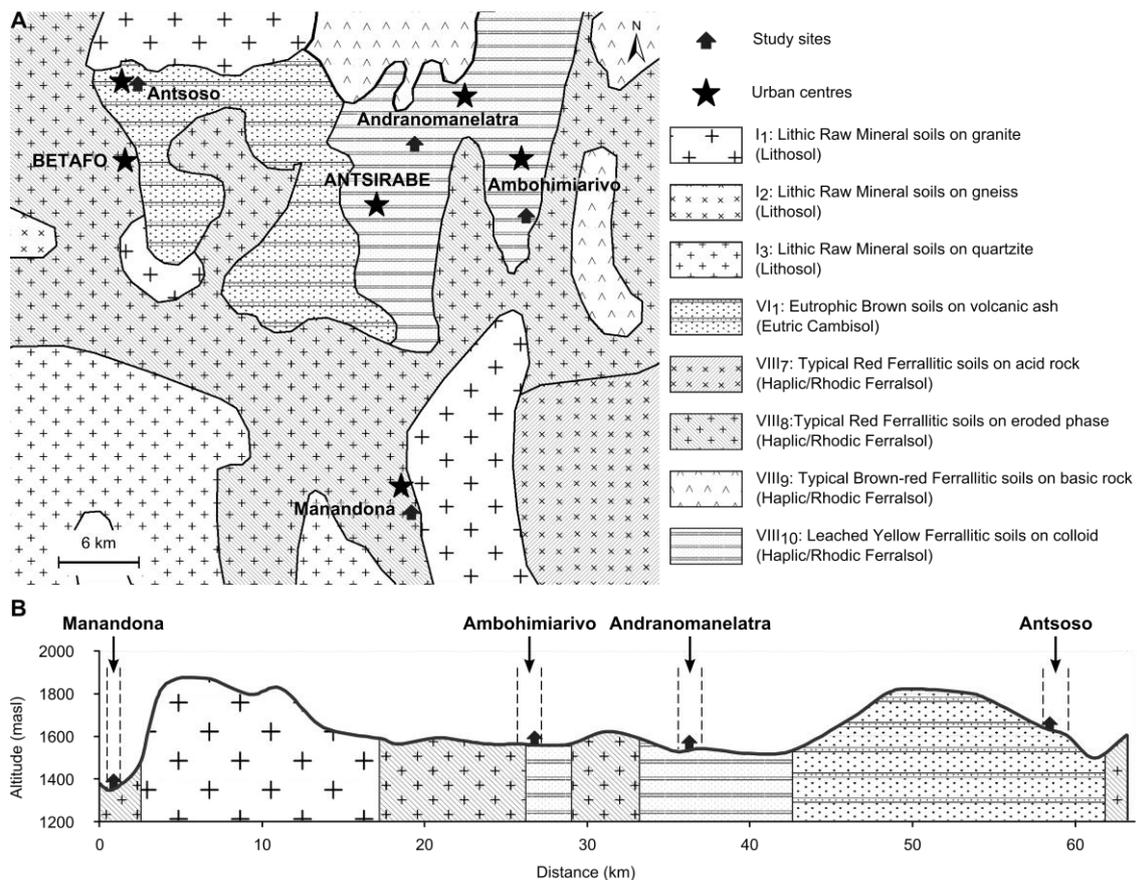


Figure 1: Soils map (A) and transect (B) of the study area adapted from the Soil Map of Madagascar from Riquier, 1968 with the French Classification system (CPCS, 1967) and the corresponding FAO-Unesco classification in parenthesis.

This tropical climate of altitude is characterised by warm and rainy summers from November to April, and relatively cool and dry winters from May to September. Average rainfall and temperature are respectively 1300 mm and 19.2°C during summer, and 190 mm and 15.0°C during winter. Agriculture is dominated by smallholder, mixed crop-livestock farms. Clearly differentiated soil-landscape units are allocated to different land uses (Figure 2). Irrigated rice (paddy) is the main crop grown in the lower parts of the landscape for self consumption and the market (Rakoto Ramiarantsoa, 1995). Hill crests and convex slopes known locally as *Tanety* are cropped to a range of different rainfed crops such as maize and beans (*Zea mays*, *Phaseolus* sp.), potatoes, sweet potatoes and cassava (*Solanum tuberosum*, *Ipomoea batatas*, *Manihot esculenta*) and fodder crops (*Brachiaria* sp., *Pennisetum purpureum* Schumach. cv. *Kizoz*). Vegetable crops and often also cereals are grown in the flooding plain of rivers known as *Baiboho*. Temperate cereals as barley (*Hordeum vulgare*) and wheat (*Triticum aestivum*) or fodder crops such as oat (*Avena sativa* L.) and ryegrass (*Lolium* L.) are often grown after paddy rice in the lowlands (during winter). The natural vegetation (*Bozaka*) consisting of grassland savannas of *Heteropogon contortus*, *Aristida* sp. and sparse trees is traditionally grazed by the local Zebu cattle (Rakoto Ramiarantsoa, 1995). Individual farms own field plots scattered on these different landscape units. Households often consist of clusters of homesteads belonging to a single family that manage their land together. Homesteads are often located on the foot slopes of *Tanety* hills or on well-drained valley plains, while some cropping fields may be located as far as 2 to 5 Km away from the homesteads.

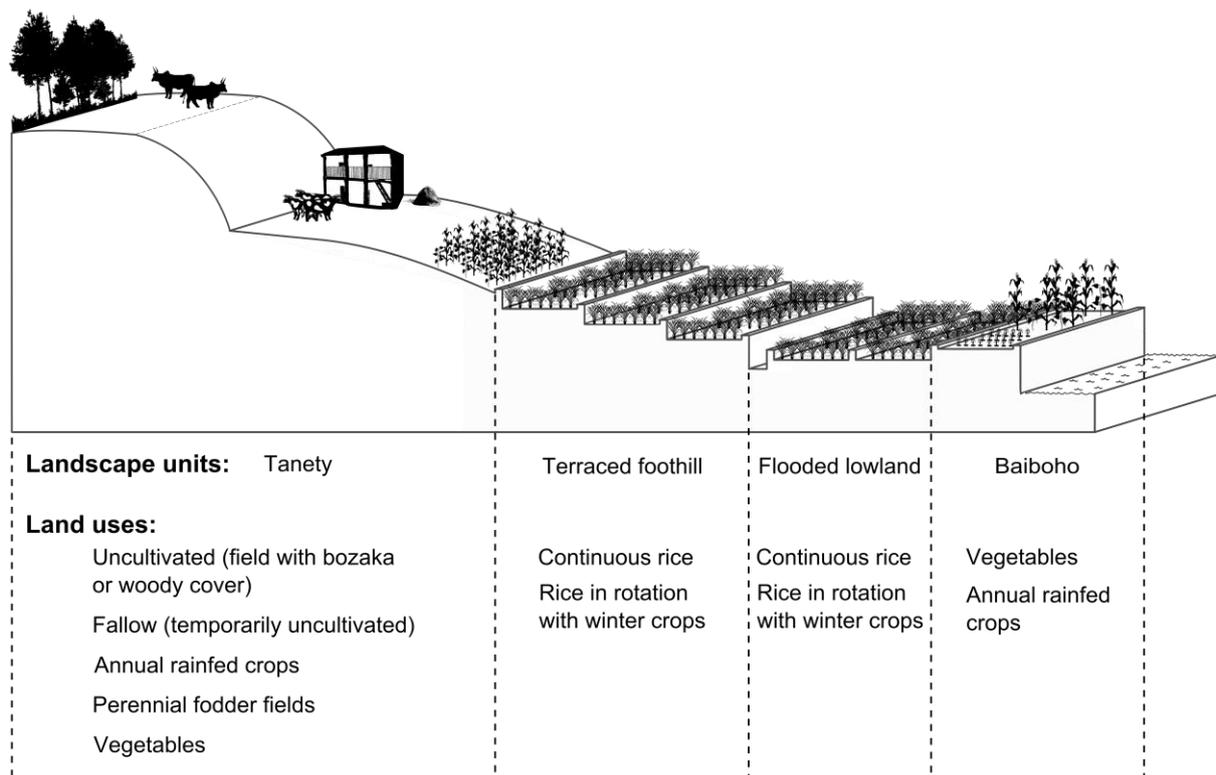


Figure 2: Landscape transects and land uses for a smallholder farm in the highlands of Madagascar.

2.2 Site selection and soil sampling

Soil samples were collected along four landscape transects located within a radius of 25 km around the town of Antsirabe, at Manandona, Ambohimiarivo, Andranomanelatra and Antsoso (Figure 1). The four sites were selected to cover the variability in dominant soil types formed on different parent

materials, restricting the selection to soils of agricultural importance. At each site, transects were delineated in order cut across the local soil-landscape variability. Between 20 and 40 fields were sampled along each transect, totalling 121. Landscape characterisation (slope and geometry of fields), plus detailed information on decision-making and quantitative data on current management, crop rotation, soil cover, and land use history were gathered through interviews with farmers while selecting and sampling their fields. Topsoil samples were collected from the upper 20 cm, which is the approximate ploughing depth either by hand hoe (*angady*) or ox-ploughing (Tsujimoto et al., 2009). Three to six 8 cm-diameter cores were taken from each plot according to their size, shape and slope, totalling 487 topsoil samples. Three, four or five soil samples were taken from each plot when their area was respectively less than 10 m², between 10 and 20 m² or more than 28 m². Each sample point was placed at least of 2 m from the plot boundaries, while the spatial arrangement of sampling points followed the disposition of dots on a dice whenever possible. Up to 6 samples per plot were taken when the plot geometry was irregular and/or the slope was strongly pronounced within the plot respecting the dice disposition and the 2 m distance from plots boundaries. Surface litter was removed prior to sampling. All soil sampling points were geo-referenced using a Global Positioning System (Garmin eTrex Vista[®]). Soil samples were collected in May-June 2010.

2.3 Soil analysis

Soil water content was determined gravimetrically after oven drying sub-samples at 105°C during 24 hours. Bulk density was calculated with respect to the core volume after correcting for water content. The rest of the soil sample was oven dried at 40°C during 48 hours, ground and sieved through 2 mm prior to analysis. All samples were analysed using Near- and Mid-Infrared spectroscopy (NIRS and MIRS, respectively). Standard wet chemistry analyses were done on approximately 10% of the samples for calibration of the spectra; this subset was selected according to their spectroscopic properties, in order to cover the total spectral variability. Soil pH (pH_{water}) was determined in water through electrometric measurement of a 1:2.5 soil:solution ratio (NF ISO 10390, AFNOR 1994). Total carbon and total soil nitrogen (TSN) were obtained by dry combustion method using an elemental analyzer (ThermoQuest NC 2100). It is assumed that there were no carbonates in these soils, hence the total carbon was considered to be equivalent to the soil organic carbon (SOC). Extractable phosphorus (P_{Extr}) was determined through the Olsen-Dabin method (Dabin, 1967) using a continuous flow assay of phosphomolybdic complex. The cation exchange capacity (CEC) was determined by the cobaltihexamine chloride method (NF X31-130, AFNOR 1994).

All soil samples were scanned through both NIRS (700–2500 nm) and MIRS (2500–25 000 nm); the latter was shown to be better suited to analyse SOC and NT than NIRS for dried-sieved (2mm) soil samples under laboratory conditions (Bellon-Maurel and McBratney, 2011; Reeves, 2010; Viscarra Rossel et al., 2006). Soil clay and silt contents (CS), SOC, TSN and P_{Extr} were predicted with MIRS (Nicolet 6700 FT-IR with Fournier transform) using the calibration subset and based on previous calibrations done on the LRI Malagasy soil database. pH_{water} and CEC were predicted with NIRS (FOSS-NIRSystems) using the calibration subset. Partial least-squares regression (PLSR) and leave-one-out cross-validation were used to fit and validate calibration models both with NIRS and MIRS spectral data (Table 1).

Table 1: Performance parameters of the soils properties predictions by MIRS and NIRS technologies

Soil property	Spectral technology	n _{cal}	Mean	Sd	SEC	R ²	SEcv	Rcv ²
Clay and silt (g.kg ⁻¹)	MIRS	38	576.09	76.16	4.87	0.93	5.67	0.94
SOC (g.kg ⁻¹)	MIRS	38	29.58	17.05	1.53	0.988	3.57	0.94
TSN (g.kg ⁻¹)	MIRS	38	2.05	1.11	0.114	0.988	0.31	0.91
P _{Extr} (mg.kg ⁻¹)	MIRS	38	68.67	53.78	0.061	0.942	0.11	0.81
pH _{water}	NIRS	34	5.53	0.53	0.099	0.965	0.345	0.59
CEC (me.100g ⁻¹)	NIRS	34	5.47	2.53	1.136	0.801	1.408	0.70

SOC: Soil Organic Carbon; TSN: Total Soil Nitrogen; P_{Extr}: Extractable Phosphorus with the Olsen-Dabin method; CEC: Cation Exchange Capacity; n_{cal}: number of soil samples used in the spectral calibration; Sd: Standard deviation; SEC: standard error of calibration; R²: coefficient of determination; SEcv: standard error of cross validation; Rcv²: coefficient of determination of cross validation.

2.4 Categorising variables and factor levels

Soil sampling points were placed on the Madagascar soil map of Riquier (Riquier, 1968) using the geographic information system (GIS) software ESRI® ArcGIS 9.3. They were categorised into three classes according the soil map (cf. Figure 1): eutrophic brown soils on volcanic ash (eutric Cambisol), typical red ferralitic soils (eroded phase) formed on acid rock (rhodic Ferralsol) and lixiviated yellow ferralitic soils formed on colloids (haplic Ferralsol); these three soil classes are subsequently referred to as brown volcanic, red ferralitic and yellow ferralitic. Using the soil and filed surveys, management observations and topographic descriptions, each sampling point was allocated a landscape unit, a land use type, an estimated age under cultivation, a soil tillage/management class and a soil fertilisation intensity class defined by manure and mineral fertiliser application rates. The landscape units were *Tanety*, hills or upland plateaus, *Terraced foothills*, *Flooded lowlands*, which are flooded at least part of the year for rice cropping (with hydromorphic soils), and *Baiboho*, which are river flooding plains or drained lowland fields subject to intermittent flooding (cf. Figure 2). Land uses were summarize into seven soil cover classes: Uncultivated (fields with *bozaka* or woody cover), Fallow (temporarily uncultivated), Annual rainfed crops, Perennial fodder fields (usually planted with *Brachiaria* sp., *Pennisetum purpureum* Schumach. cv. *Kizozi*, *Chloris gayana*), Continuous rice, Rice in rotation with winter crops, and Vegetable production. Soil-crop management classes included: (1) No cultivation (corresponding to uncultivated fields), (2) direct-sowing mulch-based cropping systems (DMC), (3) Conventional ox-plough tillage, (4) Recent cultivation with tillage after natural vegetation, fallow or DMC, and (5) Recent fallow (frequently short fallows). The soil fertility management classes included Low, Medium and High intensity of manure application, defined according the farmers' estimates and corresponding to approximate rates of <1 t manure ha⁻¹ year⁻¹, 3 to 5 t manure ha⁻¹ year⁻¹ and >20 t manure ha⁻¹ year⁻¹, respectively.

2.5 Statistical analysis

Standard descriptive statistics and unconditional associations between independent covariates (main effects) and soil quality variables were computed. All independent variables with significant unconditional association ($P < 0.05$) with the dependent variables were included in the further multivariate model as fixed effects. The data used in these analyses were derived from soil samples randomly selected within plots (4-6 samples per plot). Thus, plot was included in the model as a random effect associated with the intercept, from a normal distribution with mean zero and unknown variance σ^2u_j , to correct for the possible clustering of samples within plots. For each

dependent variable, plot-specific and sample-specific effects can be specified separately without any fixed effect:

$$Y_{ij} = \beta_0 + u_j + r_{ij} \quad (\text{Eq. 1})$$

where Y_{ij} is the soil quality indicator (e.g., Soil Organic Carbon) corresponding to sample i and plot j , β_0 is the average outcome for the population, u_j is the plot-specific effect (random effect for plot j) and r_{ij} is the individual-level (sample) error.

The final multivariate model for the i^{th} sample within the j^{th} plot was:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 x_{1ij} + \beta_2 x_{2ij} + \dots + \beta_k x_{kij} + u_j + r_{ij} \quad (\text{Eq. 2})$$

where β_k is the coefficient for the k^{th} fixed effect. Backward elimination was used to exclude non significant ($P > 0.05$) effects from Eqn. 2 using a Chisquare likelihood ratio test. Comparing the inter-plot variance $\sigma^2 u_j$ between models before and after including fixed effects enabled to assess whether plot-level variability has accounted for some of the variance in the dependent variable. The adequacy of the final models was evaluated by examining normal probability plots of residuals and plotting residuals vs. levels of covariates or vs. predicted values to check that the assumptions of homogeneity of variance were met. All statistical analyses were performed using R (R Development Core Team, 2011).

3. Results

3.1 Soil diversity and variability at regional scale

An initial correlation analysis between all soil indicators for the entire sample population allowed identifying soil organic carbon (SOC) and extractable phosphorus (P_{Extr}) as two key indicators to represent variability in soil fertility, when interpreted in relation to soil clay plus silt content (CS; 0 – 20 μm). SOC was strongly and positively correlated with total soil nitrogen (TSN) ($r^2 = 0.94$, $P < 0.0001$), and moderately, negatively and correlated with soil bulk density and pH and cation exchange capacity (Table 2). Soil pH and CEC were also moderately correlated. P_{Extr} was weakly and positively correlated with the soil C:N ratio and the CS, but independent from the rest of the soil variables. The poor correlation between SOC and CS at this level of analysis results from the wide variability in soil types and parent materials present in the four sites (see later Figure 3 A).

Table 2: Correlation (Pearson correlation coefficients) matrix of multivariate soil samples (n= 487, *P < 0.05, **P < 0.01, *P < 0.001)**

	Bulk density	Clay + silt	SOC	TSN	C:N ratio	P_{Extr}	pH	CEC
Bulk density	1***	-0.14**	-0.54***	-0.52***	-0.07	-0.15***	0.38***	0.05
Clay + silt		1***	0.03	0.04	-0.02	0.37***	-0.3***	-0.24***
SOC			1***	0.97***	0.04	0.18***	-0.6***	-0.41***
TSN				1***	-0.14**	0.04	-0.61***	-0.41***
C:N ratio					1***	0.36***	0.11*	-0.02
P_{Extr}						1***	0.01	-0.05
pH							1***	0.55***
CEC								1***

SOC: Soil Organic Carbon; TSN: Total Soil Nitrogen; P_{Extr} : Extractable Phosphorus with the Olsen-Dabin method; CEC: Cation Exchange Capacity

On average, brown volcanic soils exhibited higher SOC, TSN and P_{Extr} contents than the ferralitic red and yellow soils (Table 3). Brown volcanic soils had significantly lower mean values for pH and bulk density compared with the typical red or the yellow ferralitic soils. These soils also showed wide variability in SOC with a difference between first and third quartile equal to 22 g.kg^{-1} (vs. 5.8 g.kg^{-1} for ferralitic soils). SOC contents and stocks, and total soil N were significantly higher in ferralitic red than in yellow soils. The average of C:N values of the soil samples was rather high (14.3). SOC contents and stocks in red soils increased almost linearly with CS ($n=130$; $P < 0.001$; $SE = 0.0042$; $r^2 = 0.44$). The average values for most soil indicators in Table 3 reflect the relative distribution of the three major soil types across the four sites. While the 106 samples from Antososo corresponded to brown volcanic soils, the majority of samples from Andranomanelatra ($n = 129$) corresponded to ferralitic yellow soils and only a few ($n = 13$) to ferralitic red soils. The latter was the dominant soil type also at Ambohimiarivo and Manandona.

Soils formed on different parent materials exhibited different relationships between texture and other soil fertility indicators (Figure 3). For all ferralitic soils found at Ambohimiarivo, Andranomanelatra and Manandona (Figure 3) an 'envelope' could be barely delineated to describe the relationship between CS and SOC (indicated in Figure 3 as hand-drawn dashed lines); such envelope patterns are often observed in tropical agricultural soils (e.g., Feller and Beare, 1997). While 91 % of the samples were within a narrow range of CS (from 418.3 to 682.3 g kg^{-1}), soils from Manandona had the lowest SOC contents ($< 25.4 \text{ g kg}^{-1}$) and the coarsest texture (Table 3). The eutrophic brown soils formed on volcanic ash that are found at Antososo (cf. Figure 1) exhibited greater SOC contents at intermediate values of CS (ca. between 400 and 600 g kg^{-1}), which correspond to the range of CS observed in soils of *Tanety* uplands at this site. These soils had total N contents in the order of 3 to 4 kg kg^{-1} , equivalent to 5 to 6.6 t ha^{-1} of total N in the upper 20 cm of the soil (bulk density 830 kg m^3); an average annual decomposition rate of 3% would lead to between 150 and 200 kg ha^{-1} mineral N potentially available to plants per year (Figure 3 B). Soil P_{Extr} levels were also high in virtually all soils (Figure 3 C); only a few observations fell below the threshold for crop responses to P applications, often set at 10 mg kg^{-1} for tropical soils (e.g., Sanchez, 1977).

Variability observed in the sites dominated by ferralitic soils corresponds mostly to soil variability within the landscape (i.e., along transects), which is evident from the ranges of CS and SOC observed (Figure 3 A). At Manandona, however, where there was a narrower range of SOC variability across the landscape; soils at this site were also significantly less acid (pH 5.9 , on average – Figure 3 D). These trends in combination with the relative distribution of different soil types in the four landscape transects explain the negative correlations between SOC and pH at regional scale (Table 2). Examining such relationships site by site reveals that the lowest pH values and highest SOC contents corresponded to volcanic brown soils at Antososo (cf. Table 3). The bulk density (BD) of these volcanic soils decreased with the content of SOC according to: $BD = -0.005 \text{ SOC} + 0.993$ ($P < 0.001$; $SE = 0.0005$ and $r^2 = 0.50$). The CEC was the highest and least variable in Manandona, while the method used did not perform well for the brown volcanic soils of Antososo.

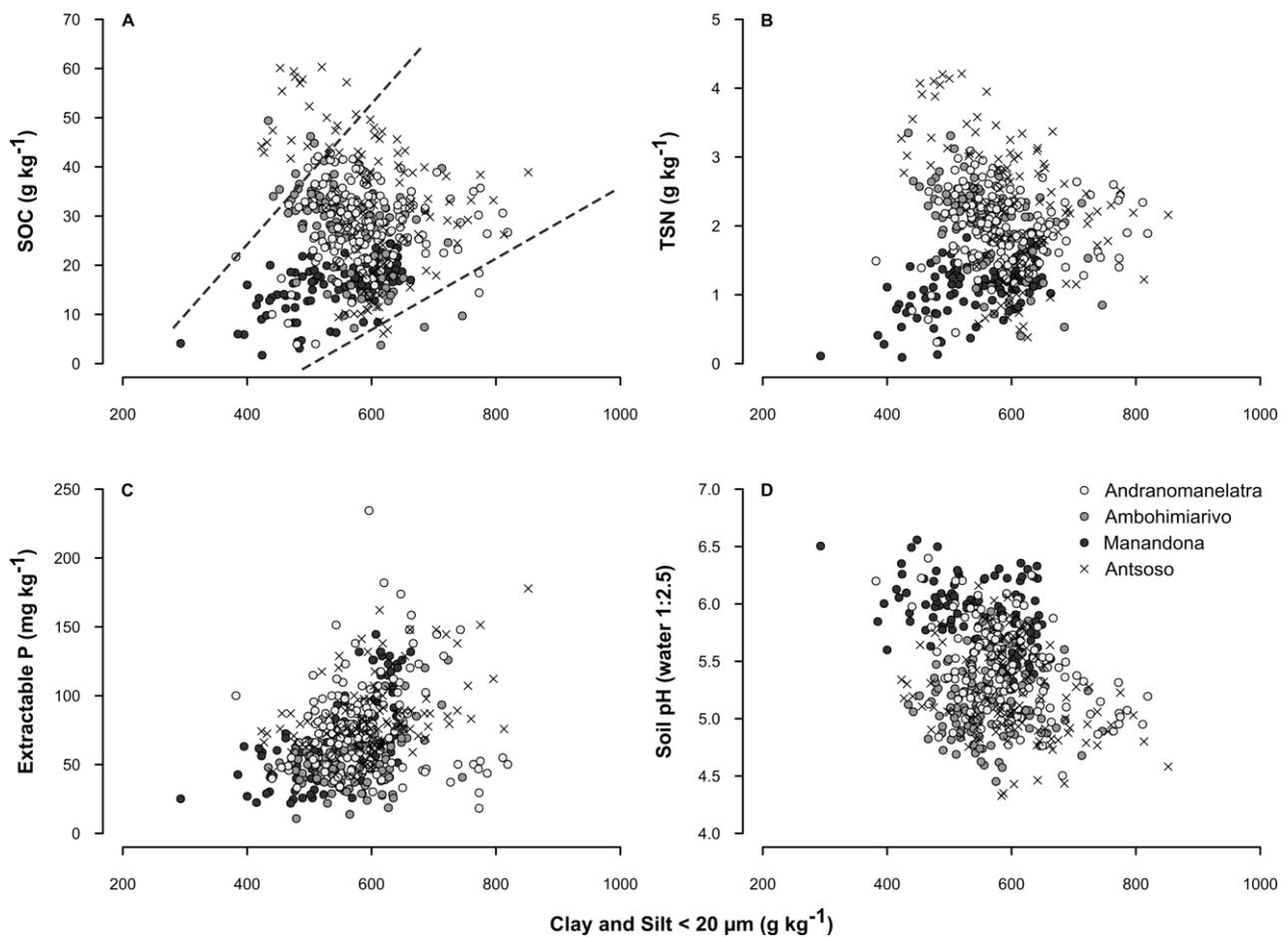


Figure 3: Relationship between (A) Soil Organic Carbon (SOC), (B) Total Soil Nitrogen (TSN), (C) Extractable Phosphorus and (D) the soil pH, and the amount of Clay and Silt (< 20 μm) for the four study sites (Andranomanelatra, Ambohimiarivo, Manandona and Antsoso) in the highlands of Madagascar ($n=487$). The hashed lines in (A) correspond to upper and lower boundaries of an 'envelope' barely delineated to describe the relationship between Clay and Silt and SOC.

3.2 Soil variability across the landscape

In general, SOC contents and stocks, TSN, extractable P decreased along the toposequences from *Tanety* soils located on hill crests and upper to mid-slopes, to soils on terraced foothills (often irrigated) and flooded lowlands, to the alluvial soils on the *Baiboho* (Table 3). Such a decrease was however not statistically significant for extractable P due to wide within-site variability. Soil pH tended to increase significantly in the opposite direction. It must be noticed that most fields sampled ($n = 293$) were located on *Tanety* uplands – as these are the common landscape units cultivated to rainfed and forage crops or used for grazing.

Terraced foothills are often an extension uphill of the most common flooded lowlands ($n = 101$) used for irrigated rice and for rainfed winter cereals. *Baiboho* are rarer and strongly associated with local geomorphologies. They were only sampled in Manandona and exhibited significantly coarser soils, poorer in SOC, total N and extractable P but with higher pH and CEC than the other landscape units. The ranges of SOC and extractable P corresponding to each soil-landscape unit for the entire region are illustrated by Figure 4 A, where they increase on average from the *Baiboho*, to the irrigated lowlands and to the *Tanety* uplands.

Table 3: Average soil fertility indicators (Mean \pm SEM) for the 0-20 cm soil layer across four sites in the Vakinankaratra region, Madagascar highlands (n = 487). Averages were calculated per site and per classes of major soil types, landscape units, land use types, soil-crop management practices and manure fertilisation intensity. Means were compared with one-way analysis and Tukey multiple comparisons test.

Variable	n	Bulk density			Clay + silt			SOC		TSN		Stock of SOC			P _{Extr}		pH _{water}		CEC						
		Mean	SEM	*	Mean	SEM	*	Mean	SEM	*	Mean	SEM	*	Mean	SEM	*	Mean	SEM	Mean	SEM	*				
<i>Site (transect)</i>																									
Andranomanelatra	142	0.90	\pm 0.01	ac	590.8	\pm 6.4	a	28.5	\pm 0.6	b	1.97	\pm 0.04	b	50.9	\pm 1.1	a	77.6	\pm 2.8	ab	5.42	\pm 0.03	b	5.54	\pm 0.14	b
Antsoaso	106	0.83	\pm 0.01	b	602.6	\pm 8.1	a	32.8	\pm 1.4	a	2.28	\pm 0.10	a	52.4	\pm 1.9	a	84.9	\pm 2.7	a	5.22	\pm 0.04	c	-	-	-
Manandona	104	0.92	\pm 0.01	a	545.1	\pm 7.4	b	16.0	\pm 0.5	c	1.11	\pm 0.04	c	29.2	\pm 0.9	c	70.0	\pm 3.1	b	5.93	\pm 0.03	a	6.16	\pm 0.05	a
Ambohimiarivo	135	0.87	\pm 0.01	c	563.6	\pm 4.9	b	27.4	\pm 0.7	b	2.00	\pm 0.05	b	46.6	\pm 1.0	b	52.8	\pm 1.6	c	5.17	\pm 0.03	c	5.38	\pm 0.07	b
<i>Soil type</i>																									
Brown soil on volcanic ash	106	0.83	\pm 0.01	c	602.6	\pm 8.1	a	32.8	\pm 1.4	a	2.28	\pm 0.10	a	52.4	\pm 1.9	a	84.1	\pm 2.7	a	5.22	\pm 0.04	b	-	-	-
Typical red ferrallitic soil	130	0.93	\pm 0.01	a	569.3	\pm 8.2	b	17.1	\pm 0.5	c	1.24	\pm 0.04	c	31.3	\pm 0.9	b	62.7	\pm 2.9	b	5.80	\pm 0.03	a	5.70	\pm 0.09	a
Leached yellow ferrallitic soil	251	0.88	\pm 0.01	b	568.4	\pm 3.7	b	28.7	\pm 0.5	b	2.01	\pm 0.03	b	49.8	\pm 0.8	a	68.8	\pm 1.8	b	5.30	\pm 0.02	b	5.63	\pm 0.08	a
<i>Landscape unit</i>																									
Tanety	293	0.85	\pm 0.01	b	585.5	\pm 4.7	a	32.7	\pm 0.5	a	2.28	\pm 0.04	a	54.6	\pm 0.7	a	72.5	\pm 1.8	a	5.15	\pm 0.02	c	4.58	\pm 0.07	c
Terraced foothill	76	0.93	\pm 0.02	a	561.1	\pm 7.6	b	18.0	\pm 0.5	b	1.24	\pm 0.04	b	32.8	\pm 0.9	b	74.3	\pm 3.7	a	5.91	\pm 0.04	a	5.84	\pm 0.11	b
Flooded lowland	101	0.94	\pm 0.01	a	577.1	\pm 5.5	ab	18.0	\pm 0.6	b	1.34	\pm 0.04	b	33.4	\pm 1.1	b	64.0	\pm 2.9	a	5.70	\pm 0.02	b	6.32	\pm 0.15	a
Baibofo	17	0.93	\pm 0.02	a	474.2	\pm 19.4	c	8.0	\pm 1.0	c	0.52	\pm 0.07	c	14.7	\pm 1.8	c	58.7	\pm 4.0	a	6.00	\pm 0.07	a	6.02	\pm 0.03	ab
<i>Land use</i>																									
Uncultivated	54	0.82	\pm 0.01	d	631.9	\pm 13.6	a	32.0	\pm 1.4	a	2.27	\pm 0.10	a	51.4	\pm 1.8	ab	60.1	\pm 2.9	a	4.93	\pm 0.03	a	4.07	\pm 0.15	d
Fallow	19	0.90	\pm 0.02	abcd	586.4	\pm 23.1	ab	28.8	\pm 0.9	a	2.03	\pm 0.07	a	51.4	\pm 1.7	ab	69.2	\pm 5.9	a	5.17	\pm 0.09	cd	5.18	\pm 0.27	bc
Annual rainfed crops	174	0.85	\pm 0.01	bd	569.1	\pm 5.9	b	31.2	\pm 0.8	a	2.17	\pm 0.06	a	51.7	\pm 1.2	b	73.8	\pm 2.7	a	5.27	\pm 0.03	c	4.82	\pm 0.10	c
Perennial forage fields	64	0.89	\pm 0.01	bc	568.4	\pm 6.9	b	32.6	\pm 0.9	a	2.27	\pm 0.07	a	57.3	\pm 1.4	a	75.5	\pm 2.7	a	5.25	\pm 0.03	c	4.70	\pm 0.12	cd
Rice and winter crops	92	0.91	\pm 0.01	ca	561.7	\pm 6.8	b	18.9	\pm 0.6	b	1.32	\pm 0.04	b	34.1	\pm 0.9	c	73.9	\pm 3.0	a	5.88	\pm 0.03	b	6.28	\pm 0.15	a
Continuous rice	81	0.95	\pm 0.01	a	577.9	\pm 6.4	b	16.6	\pm 0.6	b	1.25	\pm 0.04	b	31.1	\pm 1.1	c	63.5	\pm 3.6	a	5.68	\pm 0.02	a	5.86	\pm 0.13	ab
Vegetables	3	0.94	\pm 0.04	abcd	462.3	\pm 19.9	b	8.4	\pm 2.0	b	0.52	\pm 0.12	b	16.0	\pm 4.2	c	57.1	\pm 0.9	a	6.14	\pm 0.11	ab	6.07	\pm 0.08	abcd
<i>Soil-Crop management</i>																									
No cultivation (bush/ pasture)	26	0.78	\pm 0.02	c	623.2	\pm 20.6	a	36.9	\pm 2.2	b	2.67	\pm 0.15	ab	56.4	\pm 3.0	b	58.3	\pm 4.4	bc	4.92	\pm 0.04	b	3.55	\pm 0.24	c
DMC (No-till cultivation)	13	0.78	\pm 0.03	bc	611.8	\pm 32.5	ab	46.5	\pm 2.6	a	3.16	\pm 0.19	a	71.8	\pm 3.2	a	93.3	\pm 9.0	a	4.97	\pm 0.15	b	3.09	\pm 0.20	c
Recent cultivation	29	0.84	\pm 0.01	abc	565.0	\pm 17.6	b	31.9	\pm 1.0	b	2.26	\pm 0.07	bc	53.2	\pm 1.1	b	53.3	\pm 1.9	c	5.00	\pm 0.04	b	4.88	\pm 0.16	ab
Recent fallow	50	0.86	\pm 0.01	ab	578.1	\pm 12.4	ab	30.8	\pm 1.1	b	2.15	\pm 0.08	c	52.5	\pm 1.7	b	65.9	\pm 3.0	bc	5.08	\pm 0.04	b	4.77	\pm 0.15	b
Conventional	369	0.90	\pm 0.01	a	572.1	\pm 3.5	b	24.0	\pm 0.5	c	1.69	\pm 0.04	d	42.2	\pm 0.8	c	72.5	\pm 1.7	ab	5.54	\pm 0.02	a	5.46	\pm 0.07	a
<i>Manure fertilisation intensity**</i>																									
Low	114	0.88	\pm 0.01	a	586.6	\pm 8.0	a	22.5	\pm 1.2	c	1.59	\pm 0.08	b	37.9	\pm 1.7	c	67.8	\pm 3.1	b	5.42	\pm 0.04	a	5.34	\pm 0.15	a
Medium	290	0.88	\pm 0.01	a	569.8	\pm 4.5	a	26.9	\pm 0.6	b	1.90	\pm 0.04	a	45.7	\pm 0.9	b	67.8	\pm 1.7	b	5.42	\pm 0.03	a	5.07	\pm 0.08	a
High	83	0.90	\pm 0.01	a	583.6	\pm 6.1	a	30.6	\pm 0.7	a	2.10	\pm 0.05	a	55.0	\pm 1.2	a	83.7	\pm 3.3	a	5.40	\pm 0.04	a	5.40	\pm 0.14	a

SOC: Soil Organic Carbon; TSN: Total Soil Nitrogen; P_{Extr}: Extractable Phosphorus with the Olsen-Dabin method; CEC: Cation Exchange Capacity (The method used to determine the CEC does not perform well for soils formed on volcanic ash) ; *: Values followed by different letters differ significantly by Tukey multiple comparisons test (P < 0.05);

** : < 1 t manure ha⁻¹.year⁻¹; Medium : 3 to 5 t manure ha⁻¹.year⁻¹; High : 20 to 30 t manure ha⁻¹.year⁻¹

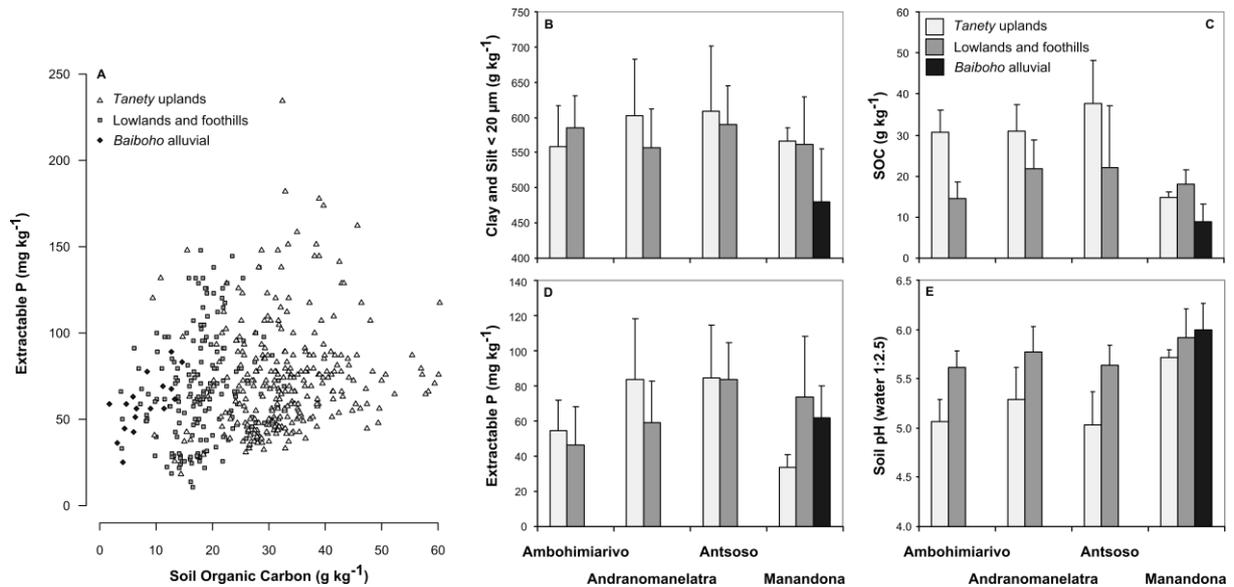


Figure 4: Relationship between (A) Extractable Phosphorus and the content of Soil Organic Carbon (SOC), and (B) Clay and Silt (< 20 µm) content, (C) SOC, (D) Extractable Phosphorus and (E) soil pH for the four study sites (Ambohimiarivo, Andranomanelatra, Antsoaso and Manandona) in the highlands of Madagascar according their landscape (Tanety uplands, Lowlands and foothills, and, Baibocho alluvial).

Average CS contents tended to be higher in *Tanety* soils than on soils located on irrigated foothills and lowlands, except in Ambohimiarivo (Figure 4 B). This site and Manandona were dominated by red Ferrallitic soils. *Tanety* soils had higher average SOC values except in Manandona (Figure 4 C), and lower pH than low lying soils (Figure 4 D and Figure 4 E). Across sites, average extractable P was higher, equal or lower in *Tanety* soils as compared to soils in lower landscape units (NB: All *Tanety* soil samples were represented by 37, 36, 25 and 1% samples from Ambohimiarivo, Andranomanelatra, Antsoaso and Manandona, respectively). A positive linear relationship was found between extractable P content and the amount of CS on low lying soils ($n = 76$, $P < 0.001$, $SE = 0.04$ and $r^2 = 0.60$) and in the *Baibocho* alluvial soils ($n = 17$, $P < 0.02$, $SE = 0.04$ and $r^2 = 0.47$).

Within sites, and for a single landscape unit, a large proportion of variability was still observed for several soil fertility indicators. Such spatial heterogeneity is complex and patterns are difficult to unravel. Contrasting situations are illustrated using key topsoil indicators averaged for entire fields (i.e., ignoring within-field variability) in Figure 5. Figure 5 A-C show fields located on two landscape units: *Tanety* (left hand side of the image) and flooded lowlands (right hand side). In spite of some variability detectable between contiguous fields, all *Tanety* fields were quite homogeneous in terms of SOC. Variability between landscape units was wider than between fields on a similar landscape position for extractable P and soil pH. In Figure 5 D-F, although the fields shown in the image were neighbouring or located no more than a few hundred meters away from each other, their average SOC varied from c. 15 to 50 g kg⁻¹, extractable P from 20 to 100 mg kg⁻¹ and the soil pH roughly from 5 to 6. In this case, soil variability was mostly associated with management while landscape variability played a secondary role. Figure 5 G-I show fields corresponding to *Baibocho* soils (lower left corner of the image, next to the river), flooded lowlands and terraced foothills (upper right corner, west of the road); average SOC contents tended to increase in that order, and P was highly variable. In Figure 5 J-L low lying fields exhibited lower average SOC and extractable P, while soils on *Tanety* uplands were more acid.

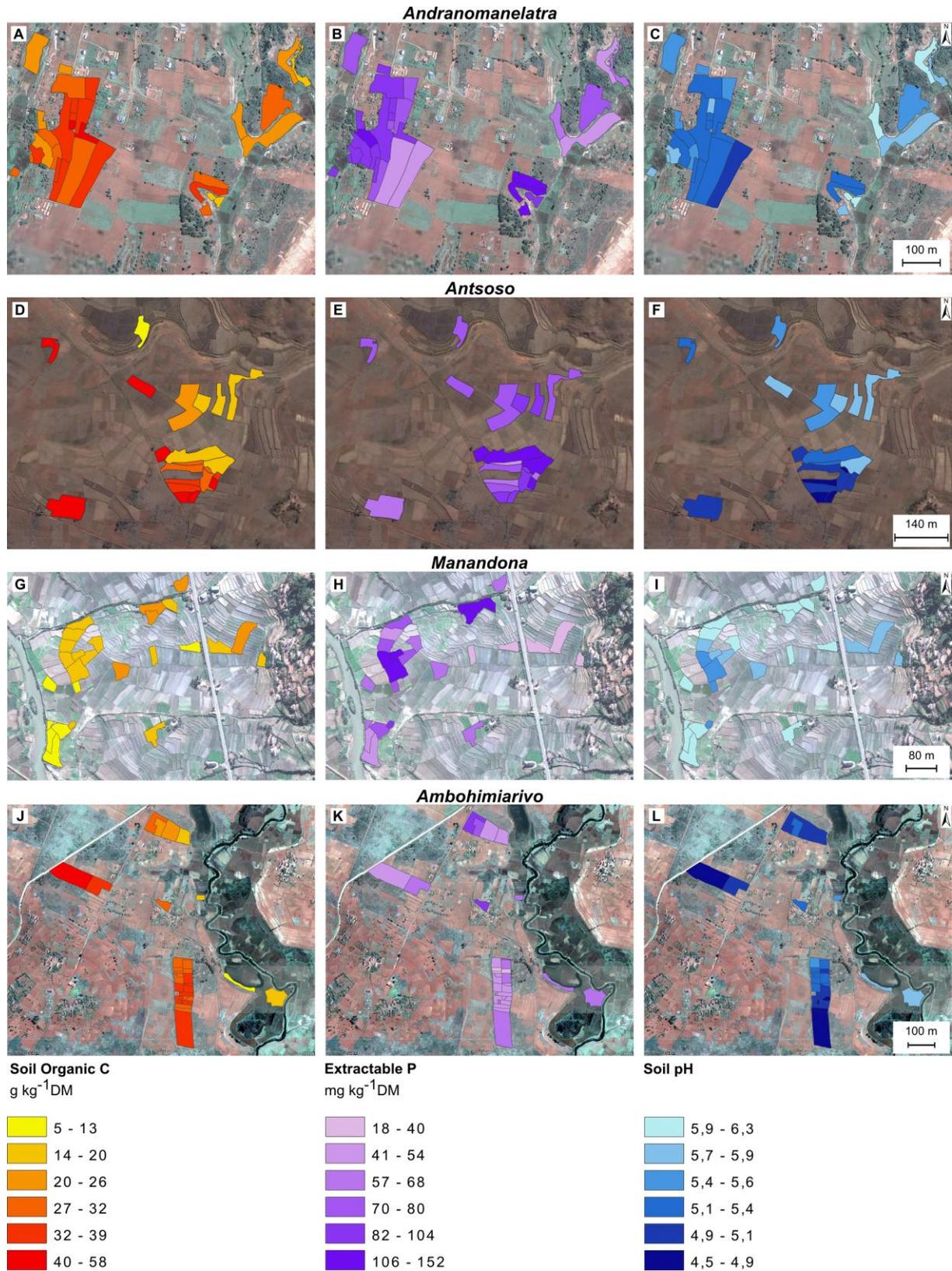


Figure 5 : Maps of the spatial distribution of tree soil fertility indicators – Soil Organic Carbone (A, D, G, J), Extractable P (B, E, H, K) and pH (C, F, I, L) -- for the sampled fields in the for study sites (Andranomanelatra, Antsoso, Manandona and Ambohimiarivo) in the highlands of Madagascar. Source of background are respectively GeoEye satellite image, 13/11/2009, Google Earth 2010; DigitalGlobe satellite image, 24/06/2006, Google Earth 2010; GeoEye satellite image, 26/06/2009, Google Earth 2010 and, GeoEye satellite image, 13/11/2009, Google Earth 2010.

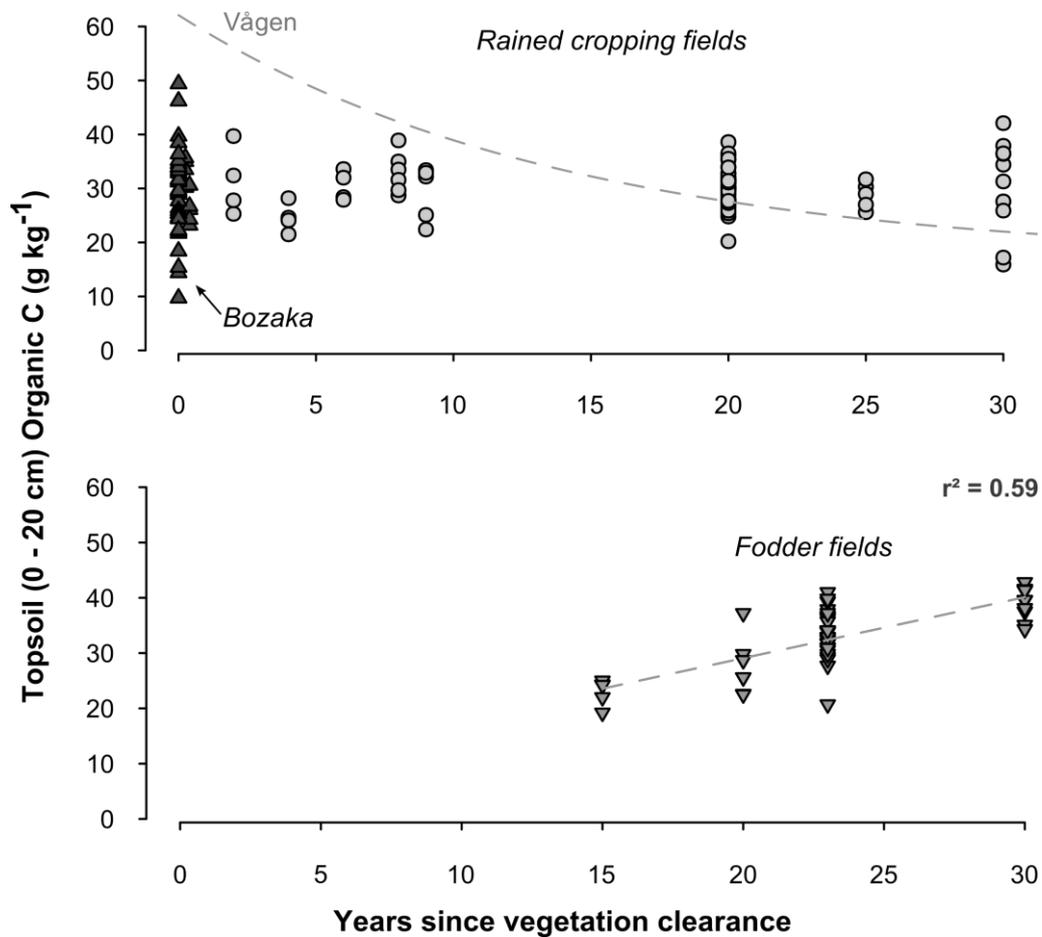


Figure 6: Relationship between the content of Soil Organic Carbon (SOC) from ferrallitic soils and years since vegetation clearance for (A) Rained cropping fields, uncultivated Bozaka and, (B) Fodder fields with a high level of organic fertilization (200-300 kg of manure 100m⁻² year⁻¹), both on Tanety uplands and with Conventional ox-plough tillage. The dotted curve on (A) define the evolution of SOC content with time since conversion as predicted with an asymptotic regression model by Vågen et al., for dryland crop on slash-and-burned fields in the highlands of Madagascar (Vågen et al, 2006a). The dotted line on (B) illustrate the trend for the SOC content for the perennial fodder fields (n = 52, P < 0.001, SE = 0.13 and r² = 0.59).

Such spatial heterogeneity was also perceived by local farmers who referred to crop performance and topsoil colour (dark brown or black for “good soils” and red or yellow for “poor soils”) as the main criteria to differentiate soil quality. Our mapping, which was shared with local farmers, led to the paradoxical finding that fields regarded locally as fertile had usually the lowest average values of SOC and TSN contents. This was particularly true for low lying paddy fields and for *Baiboho* soils, which were always indicated as “the most fertile”. These soils had often half the level of SOC measured on adjacent *Tanety* soils (cf. Figure 5), higher pH and comparable levels of extractable P across the four sites (Figure 4). Here, soil fertility appreciation by local farmers should be analysed in relation to water management and risks of water stress for crop production, as the concept of “fertility” for local farmers includes obviously more than classical soil quality indicators.

3.3 Human-induced soil heterogeneity

The spatial heterogeneity in soil fertility indicators observed within each site and landscape unit may be largely ascribed to farmer management practices. These include mid- and long term effects of different land uses, crop rotations and fallows, or use of organic and mineral fertilisers. Land use types were strongly associated with soil-landscape variations, and thus two contrasting groups were distinguished: (i) uncultivated (*Bozaka*), fallow, annual rainfed crops and perennial pastures on the

Tanety uplands; and (ii) irrigated rice sole or in rotation with winter cereals, and Vegetables on terraced foothills and lowlands. The differences observed in terms of average soil fertility indicators between these two groups of land use types (Table 3) are obviously largely due to their location on the landscape. Yet, within a certain land use and landscape unit, farmer-induced heterogeneity interacted strongly with soil inherent variability. Across all sites, SOC contents in *Tanety* uplands decreased slightly with the length of the period under cultivation ($P < 0.001$, $SE = 0.017$ and $r^2 = 0.27$), while extractable P did not show any tendency of decreasing with the age of the field (not shown here).

Unlike the study of Vågen et al. (2006a) conducted on slash-and-burn fields in the highlands of Madagascar, we could not establish clear chronosequences of decreasing SOC from ferrallitic soils (neither extractable P) as a consequence of agriculture (Figure 6). To start with, it was not easy to set the initial state of SOC due to the large variability observed in uncultivated *Tanety* fields (i.e., the *Bozaka* fields in Figure 6 A); their average SOC content was lower than the initial state in Vågen's model, and often lower than the average for cultivated fields. Subsequently, SOC in rainfed cropping fields were lower than predicted by Vågen for the first ten years since vegetation clearance, and equal or higher than the model after twenty years of cultivation. Soils exhibited wide variability in their different soil fertility indicators within each range of time since vegetation clearance, indicating an overruling effect of management on soil properties. At Andranomanelatra, where perennial fodder fields were more frequent due to the presence of dairy farms, we even observed a trend of SOC accumulation with time (about 22.8 t ha^{-1} for 0-20 cm in fifteen years) as a result of continuous fertilisation with animal manure at high rates (i.e. $20 -30 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$). The oldest fields at each location were always the flooded lowlands and terraced foothills, known locally as *Tanimbary* (i.e. "rice land"), and their average soil indicators did not vary significantly between land use types.

Soil-crop management practices had also an impact on soil fertility. The major practices were grouped as: (1) No cultivation (*Bozaka* or pasture fields), (2) DMC for direct-sowing mulch-based cropping systems, (3) Conventional ox-plough tillage, (4) Recent tillage after natural vegetation, fallow or DMC, and (5) Recent fallow (frequently short fallows). In most of cases the average soil fertility indicators for No cultivation and DMC were significantly higher than Conventional management; e.g., lower bulk densities and higher SOC and TSN contents (Table 3). However, it must be noticed that while non-cultivated and DMC fields correspond to a few cases located on fertile *Tanety* uplands ($n = 26$ and 13 , respectively), conventional management was the dominant practice across sites, landscape units and land use types ($n = 369$). In the 13 fields under DMC, the average SOC, TSN and extractable P were higher than in adjacent non-cultivated or conventional fields.

Fields that received high rates of manure fertilisation exhibited significantly greater average SOC, TSN and extractable P contents than fields receiving less than $1 \text{ t manure ha}^{-1} \text{ year}$. The average rate of manure application across sites was $2.4 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ varying widely across the four sites. The percentage of fields receiving manure annually was 75, 80, 91 and 69% in Ambohimiarivo, Andranomatelantra, Antsoaso and Manandona, respectively, with average application rates of 0.4, 8.2, 0.5 and $1.9 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$. The percentage of fields that received manure did not differ between the *Tanety* uplands (83%) and the low lying fields (76%), but the average manure application rate was greater on *Tanety* fields (3.7 vs. $1.9 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, respectively). Cattle manure was applied to 90% of rainfed cropping fields (at $2.0 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ on average), to 54% of irrigated continuous rice fields ($1.3 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$), in virtually 100% of the fields cropped to irrigated rice and winter cereals in

rotation (2.3 t ha⁻¹ year⁻¹) and in none of the vegetable gardens grown on *Baiboho* soils (vegetable crops grown on these soils were sometimes fertilised with chicken manure).

Table 4: Average range of within-field variability of soil fertility indicators (minimum, maximum and mean values of the range) averaged over all fields at each location

Site	<i>n</i> <i>field</i>	Bulk density		Clay + silt		SOC		TSN		P _{Extr}		pH _{water}		CEC	
		g.cm ⁻³	% <i>max</i> <i>ampl</i>	g.kg ⁻¹	% <i>max</i> <i>ampl</i>	g.kg ⁻¹	% <i>max</i> <i>ampl</i>	g.kg ⁻¹	% <i>max</i> <i>ampl</i>	mg.kg ⁻¹	% <i>max</i> <i>ampl</i>		% <i>max</i> <i>ampl</i>	me.100g ⁻¹	% <i>max</i> <i>ampl</i>
<i>Andrano.</i>	35														
Min. range		0.02	2.4	12	2.1	2.0	3.4	0.12	2.9	8.1	3.6	0.08	3.6	0.08	0.9
Mean range		0.10	12.0	83	14.8	8.8	15.0	0.52	12.6	28.5	12.8	0.44	19.7	0.96	10.5
Max. range		0.38	45.8	218	39.0	27.7	47.3	2.03	49.3	156.8	70.1	1.32	59.2	5.14	56.4
<i>Antsoso</i>	26														
Min. range		0.04	4.8	9	1.6	2.1	3.6	0.04	1.0	8.1	3.6	0.08	3.6	-	-
Mean range		0.12	14.5	86	15.4	10.4	17.8	0.80	19.4	31.5	14.1	0.34	15.2	-	-
Max. range		0.27	32.5	235	42.0	21.6	36.9	1.50	36.4	110.2	49.3	0.70	31.4	-	-
<i>Manan.</i>	26														
Min. range		0.04	4.8	7	1.3	0.9	1.5	0.09	2.2	2.6	1.2	0.06	2.7	0.04	0.4
Mean range		0.15	18.1	67	12.0	5.1	8.7	0.34	8.3	20.8	9.3	0.29	13.0	0.17	1.9
Max. range		0.35	42.2	294	52.6	12.5	21.3	0.93	22.6	84.3	37.7	1.03	46.2	0.77	8.5
<i>Ambohi.</i>	34														
Min. range		0.01	1.2	28	5.0	0.2	0.3	0.09	2.2	1.3	0.6	0.11	4.9	0.02	0.2
Mean range		0.14	16.9	74	13.2	5.1	8.8	0.39	9.5	14.7	6.6	0.23	10.3	0.37	4.1
Max. range		0.26	31.3	171	30.6	17.8	30.4	1.13	27.4	78.0	34.9	0.67	30.0	2.44	26.8

% *max ampl*: variability compared to the maximum amplitude i.e. the range for each soil property on the entire data set (%)

Soil heterogeneity was also often large within individual fields. Figure 7 shows the variability in SOC within each field sampled on the four landscape transects. Although fields are ordered from lowest to highest average SOC contents, they reflect approximately their position along the landscape topo-sequence. *Tanety* soils (Tan in Figure 7) exhibited lower SOC variability (and greater average contents) than low lying soils (TF, FL and Ba) in Andranomanelatra, but higher variability than flooded lowlands and terraces in Ambohimiario and Antsoso. SOC levels were lower and less variable across the landscape at Manandona. Table 4 summarises the average amplitude in the variability of soil fertility indicators at field scale, calculated as the observed range by field (distance between maximum and minimum values) and averaged for all samples belonging to a same site. Soils sampled at Andranomanelatra, where dairy farming is more intensive, had the widest within-field variability (45.8% to 70.1% of the maximum range) in soil bulk density, SOC, TSN, extractable P contents and pH. Figure 8 illustrates within-field variability for two contiguous fields in Andranomanelatra, indicating the four sampling points within each parcel. Such variability is presumably the result of the practice of manure application, which is first 'piled' in the field for some time before it is distributed more or less evenly on the field surface.

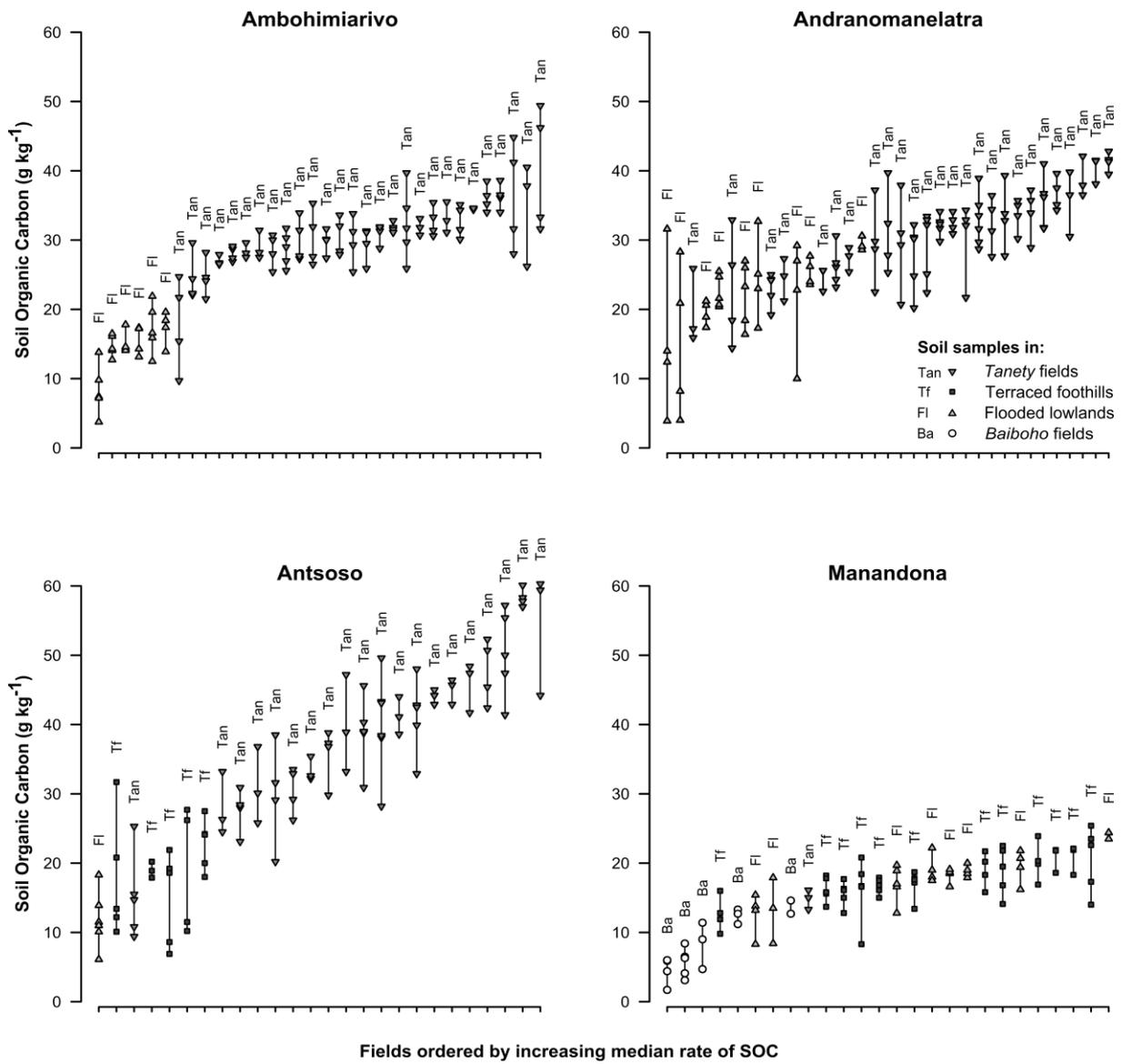


Figure 7: Variability at scale fields for Soil Organic Carbon (SOC) content in the four study sites according the landscapes (Tan : Tanety upland, Tf: Terraced Foothills, Fl: Flooded Lowlands and Ba: Baiboho alluvial). Lines represent the fields and each point is an soil sample.

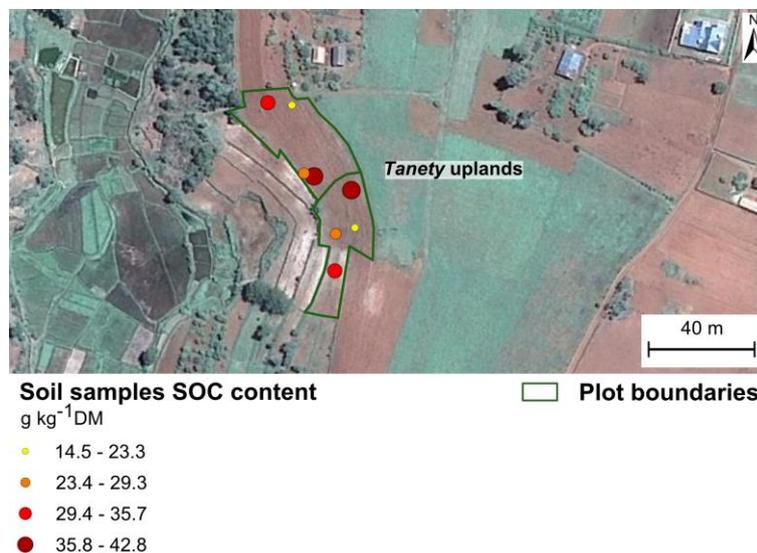


Figure 8: Example of within-field variability for two contiguous fields in the Tanety uplands of Andranomanelatra, indicating the content of Soil Organic Carbon (SOC) for each sampling points within the two fields

3.4 Modelling of soil variability across scales

Variability in soil properties was studied through LME modelling for all soil quality indicators, using soil type, land use, soil-crop management and manure intensity as explanatory variables. Landscape units were already represented by land uses, due to their close association. Only the predictions for SOC and extractable P are presented (Tables 5 and 6). The overall mean SOC content (\pm SEM.) was $26.5 \pm 0.5 \text{ g kg}^{-1}$ ($n = 487$). Red ferrallitic soils showed a significant lower SOC than yellow ferrallitic soils (reference level) while no difference was observed between red ferrallitic and brown volcanic soils (Table 5). The two land uses corresponded to irrigated rice had significant lower SOC compared with the reference value for the annual rainfed crops (reference level). Fields receiving medium and high intensities of manure fertilization had 6.3 and 7.3 g kg^{-1} greater SOC contents compared with those fertilised at low intensities. An increase in SOC contents of over 50% was observed for fields under with respect to conventional management.

Table 5: Coefficient estimates, standard errors and predicted content of Soil Organic Carbon (SOC) from an ordinal least squares regression model including field as a random effect

Predictors	Categories ¹	Coef.	SE	Wald test	Predicted SOC ²
<i>(Intercept)</i>		23.54	2.00	≤ 0.001	23.5
<i>Soil parental material</i>	Brown soil on volcanic ash	2.54	1.79	0.157	26.1
	Typical red ferrallitic soil	-6.48	1.68	≤ 0.001	17.1
<i>Land use</i>	Uncultivated	0.61	3.17	0.848	24.2
	Fallow	-6.77	4.18	0.109	16.8
	Perennial forage fields	0.52	2.29	0.822	24.1
	Rice and winter crops	-7.99	1.82	≤ 0.001	15.6
	Continuous rice	-5.14	2.05	0.014	18.4
	Vegetables	-8.69	6.28	0.169	14.8
<i>Soil crop management</i>	DMC	14.47	3.93	≤ 0.001	38.0
	No cultivation	12.82	3.67	≤ 0.001	36.4
	Recent cultivation	3.71	2.52	0.143	27.3
	Recent fallow	5.11	3.16	0.108	28.7
<i>Manure fertilisation intensity</i>	Medium	6.28	1.96	0.002	29.8
	High	7.31	2.75	0.009	30.9
<i>Plot</i>	Inter-plot standard deviation	5.49	0.46	< 0.001	

¹: reference categories were not included (i.e., Yellow ferrallitic soils; Rainfed cereal cropping; Low manure intensity; Conventional management)

²: predicted values were calculated setting all other covariates to 0 (i.e. the reference category)

The overall mean extractable P content (\pm SEM.) was $70.5 \pm 1.4 \text{ mg kg}^{-1}$ ($n = 487$). Brown volcanic soils exhibited higher levels of extractable P compared with the reference level of yellow ferrallitic soil, while no differences were found with respect to red ferrallitic soils (Table 6) Only plots receiving high intensities of manure showed significantly higher extractable P levels. No significant association was found between extractable P and land use or soil-crop management.

The total unexplained variation in the dependent variables attributable to plot-level characteristics (estimated with Eq. 1) was significantly different from 0 ($P < 0.001$) for both SOC and extractable P, making it further relevant to incorporate plot-level fixed covariates in an attempt to account for some of this variation. This variance had decreased by 69 and 31% after including fixed effects for SOC and extractable P, respectively, indicating that inclusion of plot-level variables has mainly accounted for variance in SOC. Nonetheless, the estimates of residual plot-level variance were still

significantly different from 0 ($P < 0.001$ – Tables 5 and 6) for both soil indicators, indicating that other major factors not considered in this study were also responsible for within-field soil variability.

Table 6: Coefficient estimates, standard errors and predicted content of Extractable Phosphorus (PE_{extr}) from an ordinal least squares regression model including field as a random effect

Predictors	Categories ¹	Coef.	SE	Wald test	Predicted P _{Extr} ²
(Intercept)		63.33	4.76	≤ 0.001	63.3
Soil parental material	Brown soil on volcanic ash	22.75	5.68	≤ 0.001	86.1
	Typical red ferrallitic soil	0.08	5.10	0.988	63.4
Manure fertilisation intensity	Medium	-5.28	5.02	0.295	58.1
	High	16.12	6.98	0.023	79.5
Plot	Inter-plot standard deviation	20.48	1.83	< 0.001	

¹: reference categories were not included

²: predicted values were calculated setting all other covariates to 0 (i.e. the reference category)

4. Discussion

Although most soil indicators analysed exhibited ranges of values that may be considered high for tropical soils (e.g., 20 to 40 g kg⁻¹ organic C; 50 to 80 mg kg⁻¹ extractable P; etc.), their variability was large across the agricultural fields sampled in this region of the Malgasy highlands (Vakinankatra). While 90% of the soils sampled exhibited clay plus fine silt contents ranging from 420 to 680 g kg⁻¹, soil fertility indicators such as organic C, total N, extractable P and pH varied much more widely across sites, landscape positions (and associated land uses) and soil management situations (notably organic fertiliser use and tillage). Differences between sites were largely explained by a different relative distribution of soil types at each site; yet a large proportion of the variance in soil attributes was associated with soil-landscape variability within each site. Systematically, soil fertility attributes showed higher average values for *Tanety* uplands than for irrigated lowland fields, which seems to contradict local farmers' assertion that paddy fields are the most fertile. Management practices such as frequency and intensity of tillage and use of animal manure led to statistically detectable differences in soil fertility levels, sometimes between contiguous fields, and even to spatial heterogeneity within individual fields. In general, management-induced soil variability tended to overrule the effect of inherent soil variations across sites and the landscape.

The brown soils formed on volcanic ash (eutric Cambisols) that are common in the area of Betafo (represented by Antsoso in this study) were lighter, had greater C, N and P contents and were more acid in a 1:2.5 soil-water suspension than the rest of the soils. The red and yellow ferrallitic soils (rhodic and haplic Ferralsols, respectively) occurring at the other three sites showed only a weak positive association between their content of clay and fine silt and their contents in C and N, as would have been expected for highland tropical soils of these texture classes (e.g. Tittonell et al., 2008). Such relationship was even found to be negative in the same region of the Malgasy highlands in earlier studies (Vågen et al., 2006b). When soils of both allophane and lateritic origins are confounded in a sample population, the apparent relationship between soil C and clay content may be negative, since the former often exhibit coarser textures in the region. The presence of allophane elements in brown volcanic soils that improve aggregate stability and thus physical protection of organic matter may contribute to explain the higher C contents of these soils (Razafimbelo et al.,

2008), but not their decrease with increasing clay plus fine silt (cf. Figure 3 A). A larger proportion of allophane material in brown soils of coarser texture might be responsible for such trends.

The independence between soil C and extractable P levels, which was shown also by the study of Vågen et al. (2006b), was the result of large fluctuations in P levels for all soil types (cf. Figure 4 A), presumably due to variability associated with management. Indeed, part of the remainder variability in extractable P contents after accounting for soil type, land use and soil management was significantly associated with high intensity of manure application ($>3 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$), and yet a large part of the variability remained unexplained (cf. Table 6). Although the observed average contents of extractable P were high, ferralitic soils are characterized by phosphorus-fixing properties by Fe and/or Al compounds that may render most of this P hardly available to plants (Sanchez et al., 1997; 2003). With a few exceptions, most soils on *Tanety* uplands exhibited soil C contents that were greater than 25 g kg^{-1} , while lowland soils tended to fluctuate below this threshold (cf. Figure 4 A). This contributes to explain the significant effect of land use in soil C prediction (cf. Table 5), due to the close association between land use and landscape position. Thus in general, while the variance in extractable P was largely explained by management, variance in soil C could be explained to a different degree by soil type and landscape position, and secondarily by soil management.

Soil variability was also observed between contiguous fields on a same landscape unit, often managed by a single household. No clear gradient of variation in soil fertility was found with respect to the position of the homesteads, as has been commonly observed in other smallholder systems in the tropics (e.g., Prudencio, 1993; Ramisch, 2005; Tittonell et al., 2005; Zingore et al., 2007). Rather, farmer-induced soil heterogeneity resulted from the preferential allocation of nutrient resources to certain activities, such as rice or fodder for dairy cattle, independently from their location with respect to homesteads and/or farm facilities. An important determinant of such spatial allocation pattern is the presence of animal-draught transport on most farms. Variability in soil properties between and within fields is consistent with the residual variance in the LME models for soil C and extractable P after the effects of site (soil types) and land use (landscape position) were accounted for. Fields that were not tilled (No cultivation or DMC practices) and those that received intense manure fertilisation ($>3 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) showed significantly higher soil C contents. Good predictions of extractable P levels were obtained through LME model with just soil type and manure intensity as independent variables. Manure application may increase P availability due to both the presence of P in manure and the increase in humic compounds that may counterbalance the P-fixing effect of ferralitic soils (Giller et al., 1997; Palm et al., 1997).

Tillage appeared to have a significant impact on soil C and total N. Although the number of fields sampled was small, the highest soil C and total N contents that were measured corresponded to (*Tanety*) fields under DMC (direct-seeding, mulch-based cropping) under smallholder management, or in non-cultivated or less frequently cultivated fields such as natural grasslands or perennial fodder crops. Fields recently left as fallow and fields recently cultivated after fallowing had intermediate levels of soil C between non-cultivated and conventionally tilled fields. Positive impact of DMC on soil C and total N stocks was shown earlier for these soils by Razafimbelo et al. (2008), who found also significant differences in soil aggregation between no-tillage and conventional practices after 11 years or experiment. Douzet et al. (2008) demonstrated that DMC systems may reduce runoff and soil erosion drastically in the Malagasy highlands. These results are in line with other studies worldwide that showed soil C increases under DMC in tropical and subtropical conditions (e.g., Farage et al., 2007; de Rouw et al., 2010; Neto et al., 2010).

An increase in soil C was observed in perennial fodder fields as a result of no tillage and repeated manure applications over 15 years (cf. Figure 6), which shows potential for C storage in the soils of the region. Similar results were found elsewhere (e.g., Carvalho et al., 2010; Palm et al., 1997). Perennial fodder fields and pastures that receive manure fertilisation exhibit C sequestration potential as the amounts of carbon removed in harvest can be counterbalanced (Dawson and Smith, 2007). Conant and Paustian (2002) estimated that soil carbon could be sequestered in grassland topsoils at rates of $0.46 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, which is equivalent to ca. 7 t ha^{-1} in 15 years - less than what we measured in this study (cf. Figure 6 B). Although the increase in soil C in response to manure application would be largely explained by an increase in the labile SOC fractions (e.g., Janzen et al., 1998), the rather temperate climate of the Malagasy highlands combined with the nature and texture of local soils may contribute to retaining important soil C stocks in non-cultivated fields. The amounts of manure used by farmers locally are much higher than what has been reported from other tropical smallholder systems, notably in sub-Saharan Africa (e.g. Bationo et al., 2007; de Rouw and Rajot, 2004; Tittonell et al., 2007).

A striking feature of this study is the lack of match between farmers' perception of soil fertility and the value of soil fertility indicators measured across the landscape. Farmers regard the lowland paddy fields as most productive. Our results showed consistently higher soil C and total N contents in *Tanety* uplands. The soil C, extractable P and CEC values measured in paddy fields were comparable to those presented by Tsujimoto et al. (2009) for the same region. These fields have been cultivated for long periods (> 50 years) – normally the first fields to be brought into cultivation across sites. As they are regarded as fertile, they receive less intense manure applications, as revealed by our surveys. These fields are intensively tilled every year during the dry winter season, and all the aerial biomass produced on them (grain plus straw) is removed annually during harvest. This is reflected in their lower average soil C contents (cf. Table 3). Farmers' perception of soil fertility could be in part influenced by the important role of rice in the family consumption ($153 \text{ kg person}^{-1} \text{ year}^{-1}$ in 2008, according to the World Bank) and by the knowledge inherited from the ancestors who were the first to cultivate the lowland fields. But these fields receive important amounts of sediments together with the surface irrigation water, which implies a net transfer of fertility from higher to lower landscape positions (Bedard-Haughn et al., 2006). Even under flooding, paddy fields revealed a significant decomposition rates of soil organic matter into CH_4 emissions (IPPC, 2006), and such hydrological properties may also stimulate a stable soil N mineralization to sustain crop production (Tsujimoto et al., 2009). Surprisingly, local farmer's perception did not make reference to the current decrease of paddy yields in the region, which is known to have been of around $2 - 2.5 \text{ t ha}^{-1}$ during the last decade.

5. Conclusions

This study contributed to some extent to unravel complex patterns of soil variability in the inherently fertile soils of the highlands of Madagascar. No previous study has been conducted at this scale of analysis in the region. However, much of that variability remains elusive and difficult to categorise in a way that could be used to inform the design of soil improving technologies. We showed that although soil variability may be largely explained by differences between soil types across sites and the landscape, land use and management play a major role in creating (sometimes reinforcing) soil heterogeneity in these smallholder crop-livestock systems. An important proportion of residual

variance in major soil fertility indicators was explained by management factors such as tillage and organic fertilisation practices. Presumably due to the local practice of manure application soil heterogeneity was also important within individual fields, which were often as small as 0.02 ha. The higher average levels of carbon and nutrient contents in upland (*Tanety*) soils compared with lowland paddy fields is somewhat incompatible with local farmers' perception of soil fertility and with the low average yields of rainfed cereals obtained in those fields (ca. 1 to 2 t ha⁻¹ year⁻¹). *Tanety* upland soils exhibited not only high current levels of C stocks but also potential for C sequestration when under perennial pastures receiving manure over time. While lowland fields have been cultivated for long to grow rice, the major staple food in the region, expansion of agriculture towards the formerly grazing areas on the *Tanety* uplands is more recent. The consequences of farming on these fields are still largely unknown. Our results indicate that investments in nutrient inputs could be better directed towards sustaining productivity of lowland fields. Although not quantified in this study, we observed serious signs of soil erosion on *Tanety* uplands, and increasing siltation of the irrigation system, compromising the sustainability of agriculture in the region.

Acknowledgements

The authors wish to thank Malagasy smallholders of Antsirabe for their participation and access to their farms. Thanks are due to Julie Dusserre and Jean-Marie Douzet for their technical and logistical support. A.S. Ph.D. thesis was supported by Persyst/CIRAD. This research was partially supported by the European Commission through the project ABACO (Agroecology based aggradation-conservation agriculture), Food Security Thematic Program (FSTP), Ref: EuropeAid/128500/C/ACT.

Reference List

- Bationo, A., Kihara, J., Vanlauwe, B., Waswa, B., Kimetu, J., 2007. Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. *Agricultural Systems*, 94(1), 13-25.
- Bedard-Haughn, A., Jongbloed, F., Akkerman, J., Uijl, A., de Jong, E., Yates, T., Pennock, D., 2006. The effects of erosional and management history on soil organic carbon stores in ephemeral wetlands of hummocky agricultural landscapes. *Geoderma*, 135, 296-306.
- Bellon-Maurel, V., and McBratney, A., 2011. Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils - Critical review and research perspectives. *Soil Biology and Biochemistry*, In Press, Corrected Proof.
- Boardman, J., 2006. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *CATENA*, 68(2-3), 73-86.
- Carvalho, J. L. N., Raucci, G. S., Cerri, C. E., Bernoux, M., Feigl, B. J., Wruck, F. J., Cerri, C. C., 2010. Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. *Soil and Tillage Research*, 110(1), 175-186.
- Conant, R. T., and Paustian, K., 2002. Spatial variability of soil organic carbon in grasslands: implications for detecting change at different scales. *Environmental Pollution*, 116(Supplement 1), S127-S135.
- Dabin, B., 1967. Méthode Olsen modifiée. In: *Application des Dosages Automatiques à l'Analyse du Sol*. Cahiers de l'Ortsom, 257-286.
- Dawson, J. J. C., and Smith, P., 2007. Carbon losses from soil and its consequences for land-use management. *Science of The Total Environment*, 382(2-3), 165-190.
- de Rouw, A., Huon, S., Souleuth, B., Jouquet, P., Pierret, A., Ribolzi, O., Valentin, C., Bourdon, E., Chantharath, B., 2010. Possibilities of carbon and nitrogen sequestration under conventional tillage and no-till cover crop farming (Mekong valley, Laos). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 136(1-2), 148-161.
- de Rouw, A., and Rajot, J. L., 2004. Soil organic matter, surface crusting and erosion in Sahelian farming systems based on manuring or fallowing. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(2), 263-276.
- Douzet, J.M., Muller, B., Scopel, E., Albrecht, A., Rakotoarisoa, J., Rakotoalibera, M.H., 2008. Réduction du ruissellement et de l'érosion par les systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale pour les cultures pluviales des hautes terres malgaches. *Terre malgache* (26), 99-103.
- FAO, 2007. TERRASTAT: Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties version 3.6. In: *Land and water Development Division*. FAO, Rome, Italy.
- FAO, 2011. FAOSTAT. <http://faostat.fao.org/default.aspx> .
- Farage, P.K., Ardö, J., Olsson, L., Rienzi, E.A., Ball, A.S., Pretty, J.N., 2007. The potential for soil carbon sequestration in three tropical dryland farming systems of Africa and Latin America: A modelling approach. *Soil and Tillage Research*, 94(2), 457-472.

- Feller, C., and Beare, M. H., 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79(1-4), 69-116.
- Giller, K.E., Cadisch, G., Ehaliotis, C., Adams, E., Sakala, W.D., Mafongoya, P.L., 1997. Building soil nitrogen capital in Africa. In: Buresh, R.J., Sanchez, P.A., and Calhoun, F. (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa*. SSSA, Madison, WI, pp. 151-192.
- IPPC, 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan.
- Janzen, H.H., Campbell, C.A., Izaurrealde, R.C., Ellert, B.H., Juma, N., McGill, W.B., Zentner, R.P., 1998. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. *Soil and Tillage Research*, 47(3-4), 181-195.
- Neto, M.S., Scopel, E., Corbeels, M., Cardoso, A.N., Douzet, J.M., Feller, C., Piccolo, M.D. C., Cerri, C.C., Bernoux, M., 2010. Soil carbon stocks under no-tillage mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrado: An on-farm synchronic assessment. *Soil and Tillage Research*, 110(1), 187-195.
- Nyssen, J., Poesen, J., Deckers, J., 2009. Land degradation and soil and water conservation in tropical highlands. *Soil and Tillage Research*, 103(2), 197-202.
- Palm, C.A., Myers, R.J.K., Nandwa, S.M., 1997. Combined use of organic and inorganic nutrient sources for soil fertility maintenance and replenishment. In: Buresh, R.J., Sanchez, P.A., and Calhoun, F. (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa*. SSSA, Madison, WI, pp. 193-217.
- Prudencio, C., 1993. Ring management of soils and crops in the west African semi-arid tropics: The case of the mossi farming system in Burkina Faso. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 47(3), 237-264.
- R Development Core Team, 2011. R: a language and environment for statistical computing. Vienna, Austria.
- Rakoto Ramiarantsoa, H., 1995. Chair de la terre, oeil de l'eau... Paysanneries et recompositions de campagnes en Imerina (Madagascar). Editions de l'Orstom, Paris.
- Ramisch, 2005. Inequality, agro-pastoral exchanges, and soil fertility gradients in southern Mali. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 105(1-2), 353-372.
- Razafimbelo, T. M., Albrecht, A., Oliver, R., Chevallier, T., Chapuis-Lardy, L., Feller, C., 2008. Aggregate associated-C and physical protection in a tropical clayey soil under Malagasy conventional and no-tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 98(2), 140-149.
- Reeves, J. B., 2010. Near- versus mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil analysis emphasizing carbon and laboratory versus on-site analysis: Where are we and what needs to be done? *Geoderma*, 158(1-2), 3-14.
- Riquier, J., 1968. Carte pédologique de Madagascar à l'échelle de 1:1000 000. Orstom, Tananarive.
- Samad Houssein M., 2009. Diagnostic de la filière lait dans la région Alaotra Mangoro, cas de la zone d'Ambatondrazaka, mémoire de fin d'étude Université d'Antananarivo, Ecole supérieure des sciences agronomiques/ Projet laitier de la région Alaotra-Mangoro et Ile et Vilaine. 77 p.
- Samaké, O., Smaling, E.M.A., Kropff, M.J., Stomph, T.J., Kodio, A., 2005. Effects of cultivation practices on spatial variation of soil fertility and millet yields in the Sahel of Mali. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 109(3-4), 335-345.

- Sanchez, P.A., Shepherd, K.D., Soule, M.J., Place, F.M., Buresh, R.J., Izac, A.M.N., Mokwunye, A.U., Kwesiga, F.R., Ndiritu, C.G., Woome, P.L., 1997. Soil Fertility Replenishment in Africa: An Investment in Natural Resource Capital. In: Buresh, R.J., Sanchez, P.A., Calhoun, F. (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa*. SSSA, Madison, WI, pp. 1-46.
- Sanchez, P. A., 1977. Properties and Management of Soils in the Tropics. *Soil Science*, 124(3).
- Sanchez, P.A., Palm, C.A., Buol, S.W., 2003. Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics. *Geoderma*, 114(3-4), 157-185.
- Smaling, E.M.A., Nandwa, S.M., Janssen, B.H., 1997. Soil fertility in Africa is at stake. In: Buresh, R.J., Sanchez, P.A., Calhoun, F. (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa*. SSSA, Madison, WI, pp. 47-61.
- Stoorvogel, J.J., and Smaling, E.M.A., 1990. Assessment of soil nutrient depletion in sub-Saharan Africa: 1983-2000. Report 28. Volume 4. Soil and Water Research, Wageningen, The Netherlands.
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., Leffelaar, P.A., Shepherd, K.D., Giller, K.E., 2005. Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya: II. Within-farm variability in resource allocation, nutrient flows and soil fertility status. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 110(3-4), 166-184.
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., de Ridder, N., Giller, K.E., 2007. Heterogeneity of crop productivity and resource use efficiency within smallholder Kenyan farms: soil fertility gradients or management intensity gradients? *Agricultural Systems* 94, 376-390
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., Corbeels, M., Giller, K.E., 2008. Yield gaps, nutrient use efficiencies and responses to fertilisers by maize across heterogeneous smallholder farms in western Kenya. *Plant and Soil* 313, 19–37.
- Tsujimoto, Y., Horie, T., Randriamihary, H., Shiraiwa, T., Homma, K., 2009. Soil management: The key factors for higher productivity in the fields utilizing the system of rice intensification (SRI) in the central highland of Madagascar. *Agricultural Systems*, 100(1-3), 61-71.
- Vågen, T., Andrianorofanomezana, M.A.A., Andrianorofanomezana, S., 2006a. Deforestation and cultivation effects on characteristics of oxisols in the highlands of Madagascar. *Geoderma*, 131(1-2), 190-200.
- Vågen, T., and Shepherd, K.D., 2006b. Sensing landscape level change in soil fertility following deforestation and conversion in the highlands of Madagascar using Vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*, 133(3-4): 281-294.
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J., Skjemstad, J.O., 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131(1-2), 59-75.
- World Bank. 2011. Data World Bank. <http://data.worldbank.org/indicator> .
- Zebrowski, C.I., and Ratsimbazafy, C.I., 1979. Notice explicative n°83, Feuille Antsirabe. In: *Carte pédologique de Madagascar à 1:100 000*. Orstom, Paris, 1-114.
- Zingore, S., Murwira, H.K., Delve, R.J., Giller, K.E., 2007. Influence of nutrient management strategies on variability of soil fertility, crop yields and nutrient balances on smallholder farms in Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 119(1-2), 112-126.

Conclusion du chapitre 3

Cette étude a contribué à mieux appréhender l'hétérogénéité de la fertilité des sols des hauts plateaux de Madagascar. Ainsi, pour les exploitations familiales d'agriculture-élevage, la variabilité de la fertilité des sols peut en grande partie s'expliquer par des différences de type de sols, de paysage, d'utilisation des terres et de mode de gestion des parcelles. Une proportion importante de la variabilité du carbone organique et du phosphore du sol (indicateurs de la fertilité des sols) a été expliquée par des facteurs en lien avec des pratiques de gestion des parcelles tels le labour (ou absence de labour) et la fertilisation organique. Les sols des collines (*tanety*) présentent un potentiel de séquestration du carbone organique grâce aux cultures fourragères pérennes. De plus, les *tanety* ont généralement des teneurs moyennes en carbone organique et en éléments nutritifs du sol plus élevées que les bas-fonds. Les apports en éléments nutritifs pourraient alors être mieux orientés pour le maintien de la fertilité des bas-fonds.

Au sein des exploitations, les conséquences des pratiques (e.g. fertilisation organique et absence ou présence de labour) sur la durabilité environnementale (fertilité des sols) sont particulièrement visibles à l'échelle du paysage (*tanety* vs rizière) ou des parcelles. La durabilité environnementale des parcelles de bas-fonds pourrait être remise en cause par des cultures successives de riz (base de l'alimentation malgache) et par le peu d'apports directs de fertilisants organiques ou minéraux. Ces pertes de fertilité peuvent résulter d'un déséquilibre répété entre les apports et les exportations des parcelles en biomasses et éléments nutritifs. Cependant la durabilité est aussi à évaluer à l'échelle globale de l'exploitation. En effet, ces exportations de biomasses depuis les parcelles peuvent aussi demeurer au sein l'exploitation, par exemple en étant déplacées d'une parcelle vers une autre (e.g. utilisation de résidus pour un mulch) ou d'un sous-système vers un autre (e.g. cultures pour l'alimentation de l'élevage). Ainsi, dans les exploitations mixtes d'agriculture-élevage, la question de la durabilité environnementale se pose aussi en termes de recyclage des biomasses et des éléments nutritifs au sein du système global (e.g. retour l'élevage vers les cultures). Par ailleurs, le recyclage des biomasses et des éléments nutritifs pourrait avoir aussi des répercussions sur des composantes de la durabilité socio-économique, tels la sécurité alimentaire et le revenu agricole des exploitations.

Chapitre 4 :
Recyclage de l'azote et
intensification des exploitations
d'agriculture-élevage des hauts
plateaux de Madagascar :
une application
du Network Analysis

La diversité des pratiques précédemment décrite (Chapitre 2 et Chapitre 3) est susceptible d'induire des différences en termes de durabilité environnementale (fertilité des sols, recyclage des éléments nutritifs, efficacité azotée des exploitations) et de durabilité socio-économique (création d'emplois, autosuffisance alimentaire, marge brute agricole). En effet, le Chapitre 3 met en évidence, au sein des exploitations, une hétérogénéité de la fertilité des sols d'origine anthropique, i.e. induite par des pratiques de mode de gestion des parcelles. De plus, les pratiques de fertilisation (organique ou minérale) et d'alimentation des animaux (Chapitre 2) peuvent affecter la productivité des systèmes (e.g. rendement en grains, production de lait) et donc la sécurité alimentaire et le revenu agricole des exploitations. Enfin, une des étapes clé du recyclage des éléments nutritifs au sein des exploitations d'agriculture-élevage étant la gestion des effluents d'élevage (Chapitre 1), la variabilité des pratiques de gestion des effluents peut entraîner des pertes variables en éléments nutritifs et rendre ainsi le processus de recyclage plus ou moins efficace.

Pour les exploitations familiales des hauts plateaux malgaches, exploitations à faible niveau d'intrant, une amélioration de la durabilité pourrait être envisagée via une intensification durable de ces systèmes de production. Cette intensification pourrait être permise par une augmentation des imports en éléments nutritifs et/ou une meilleure conservation des éléments nutritifs (ici l'azote). Elle pourrait concerner en particulier la culture du riz (base de l'alimentation humaine et organisant le calendrier cultural et les besoins en main d'œuvre, Chapitre 2) ou l'atelier de production laitière (pilier de l'économie de ces exploitations mixtes, Chapitre 2).

Objectif de l'étude

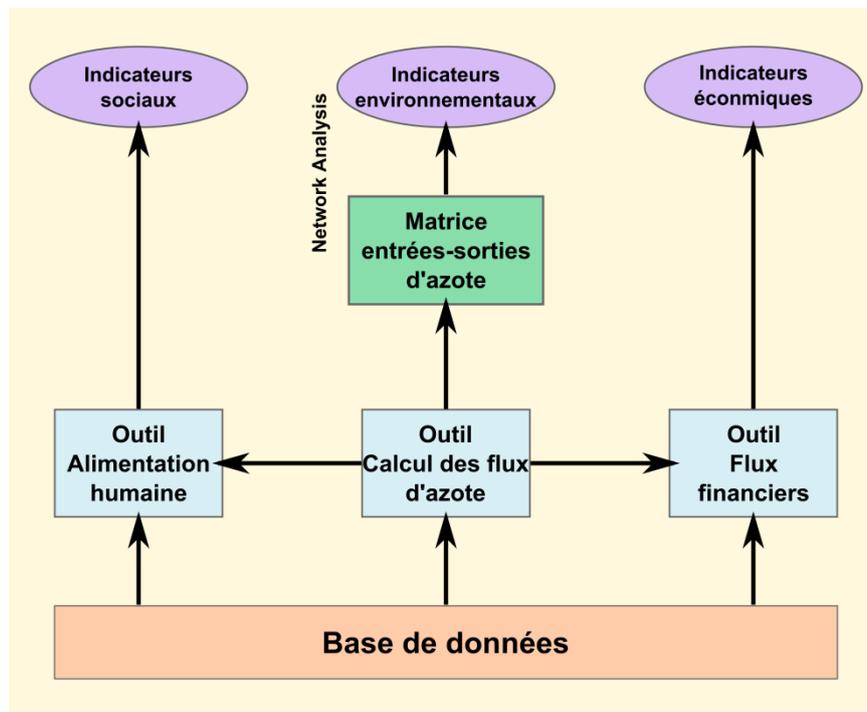
L'objectif de ce chapitre est d'évaluer la durabilité des exploitations d'agriculture-élevage des hauts plateaux grâce au calcul de divers indicateurs (sociaux, économiques et environnementaux) et de tester des scénarios d'amélioration de la durabilité de ces exploitations en termes de recyclage de l'azote, d'autosuffisance alimentaire, de productivité et de rentabilité économique.

Méthodologie

Un outil d'analyse de la durabilité a été développé afin de calculer des indicateurs sociaux, économiques et environnementaux pour chaque exploitation d'agriculture-élevage étudiée. Cet outil d'analyse met en relation la base de données issue des enquêtes et de la littérature, un outil de calcul des flux d'azote au sein de l'exploitation, les matrices entrées-sorties du Network Analysis et deux autres outils pour les calculs de l'autosuffisance alimentaire et d'indicateurs économiques. L'organisation de cet outil d'analyse de la durabilité est illustrée ci-après.

Pour les quatre exploitations étudiées, le recyclage de l'azote, l'autosuffisance alimentaire, la productivité et la rentabilité économique ont été calculés pour la situation observée. Ces indicateurs ont été aussi calculés pour quatre scénarios d'intensification :

- *+concentrate*, augmentation de la quantité d'aliments concentrés distribuée aux vaches laitières (complémentation) ;
- *+mineral fertilizer*, apport d'engrais minéral (urée) sur les cultures de riz de bas-fond;
- *+manure management*; amélioration de la gestion des effluents d'élevage (couverture du tas de fumier, incorporation rapide dans le sol du fumier épandu) ;
- *+{concentrate, manure management}*, combinaison des pratiques de complémentation et de gestion des effluents.



Organisation générale de l'outil d'analyse de la durabilité des exploitations d'agriculteur-éleveur des hauts plateaux de Madagascar.

Principaux résultats

L'amélioration de la gestion des effluents (*+manure management*), à elle seule, a un impact positif sur la marge brute agricole et augmente fortement le taux de recyclage de l'azote. Les pratiques de fertilisation minérale des rizières sont peu rentables et entraînent d'importantes pertes d'azote. Les pratiques de complémentation associées à l'amélioration de la gestion des effluents (*+{concentrate, manure management}*) présentent le meilleur résultat en termes de productivité agricole, de marge brute, d'autosuffisance alimentaire et de durabilité environnementale (recyclage de l'azote, bilan azoté du sol).

Conclusion

Les pratiques de conservation de l'azote constituent une première étape d'amélioration de la durabilité environnementale et économique des exploitations d'agriculture-élevage malgaches. Dans le contexte des hauts plateaux de Madagascar, l'augmentation des imports d'azote dans les systèmes d'agriculture-élevage s'est avérée plus durable via l'élevage (complémentation) que via les cultures vivrières (fertilisation minérale).

Ce Chapitre 4 est adapté de l'article soumis et accepté par *Agricultural System* :

Alvarez S., M.C. Rufino, J. Vayssières, P. Salgado, P. Tiftonell, E. Tillard, and F. Bocquier. Whole-farm nitrogen cycling and intensification of crop-livestock systems in the highlands of Madagascar: an application of network analysis.

Whole-farm nitrogen cycling and intensification of crop-livestock systems in the highlands of Madagascar: an application of network analysis

Alvarez S.^{a*}, M.C. Rufino^b, J. Vayssières^a, P. Salgado^a, P. Tittone^{c, d}, E. Tillard^a, and F. Bocquier^{e, f}.

^a Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux, Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), 7 ch de l'IRAT, 97410 Saint-Pierre, Réunion

^b International Livestock Research Institute (ILRI). P.O. Box 30709, Nairobi, Kenya

^c Systèmes de Culture Annuels, CIRAD, TA B02/102 Av. Agropolis, 34398, Montpellier cedex 5, France

^d Biological Farming Systems, Wageningen University, P.O. Box 430, 6700AK Wageningen, The Netherlands

^e Montpellier SupAgro, UMR868 Sciences Animales, 2 place P. Viala, 34060 Montpellier, France

^f Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux, Institut National de Recherche Agronomique (INRA), 2 place P. Viala, 34060 Montpellier, France

*Corresponding author: stephanie.alvarez@cirad.fr

Abstract

Food insecurity, soil fertility depletion and strong competition for biomass are commonly observed in smallholder crop-livestock systems. The objective of this study was to explore options to improve farm-level nitrogen cycling, productivity and economic performance through the analysis of N flows within four contrasting crop-livestock farm systems of Madagascar highlands. Farms were conceptualized as networks where the compartments were the household and their farming activities, all connected by N flows. Indicators assessing network size and cycling, and the organisation and diversity of the N flows, were compared with system productivity, food self-sufficiency, and gross margins for the current situation and under four scenarios of intensification i) dairy production increased by increasing N inputs as supplementary feed; ii) crop production increased by increasing N inputs as mineral fertilizer; iii) manure management improved to increase N conservation during storage and application to soils; (iv) a combination of the two most economically attractive scenarios (i and iii). The four case study farms represent local diversity differing widely in terms of network size, with total annual system N throughput ranging from 113 to 1037 kg N per capita, and in terms of N cycling, from 3 to 41 kg N per capita per year. They differed less in terms of external dependence, from 0.26 to 0.41 kg N kg N⁻¹. Improving N conservation through improved manure management (scenario iii) had a positive impact on gross margin, and this in combination with increased concentrate supply (scenario iv) led to increases in whole-farm N use efficiencies from 2 to 50%, in N cycling from 9 to 68% and in food self-sufficiency from 12 to 37% across farm types. Gross margin was the most sensitive indicator to changes in management. Intensification through scenario iv had the highest impact on farm productivity, gross margin, food self-sufficiency, and environment sustainability (N use efficiency, capacity of the soil to stock N).

Keywords: smallholder systems, N flows, N efficiency, food self-sufficiency, crop-livestock integration, gross margin

1. Introduction

Madagascar exhibited one of the fastest human population growth rates in recent years, increasing by about 85% from 1990 to 2010 (World Bank, 2012). Local food demand increased during the same period, by about 60% and 16% for rice and animal products, whereas the area of arable land available per smallholder family decreased from 0.29 to 0.19 ha i.e., 34 % (FAO, 2012a). The increasing pressure on land resources resulted in accelerated soil fertility depletion and a consequent decline in the per capita food production. During the 2000s prevalence of malnourishment in Madagascar was about 38%, whereas severe soil water erosion and soil degradation were reported (Nyssen et al., 2009). Soil nitrogen (N) availability has been singled out as the major constraint to crop production in the Malagasy highlands, with rates of soil depletion of about 30 kg N ha⁻¹ year⁻¹ (Liu et al., 2010).

In these systems, N losses through harvest, erosion, leaching and gaseous emissions are not compensated by external N input use. Animal manure represents the main nutrient input in smallholder farms (Braun et al., 1997; Sheldrick et al., 2003), as cash-constrained farmers face increasing relative prices of mineral fertilizers on local markets (FAO, 2012a). Consequently, the small amounts of N inputs that farmers are able to access must be judiciously used in ways that lead to high overall use efficiency at farm system level. This implies increasing not only the total throughflow of N in the system, which may be triggered by external N inputs, but also improving recycling and therefore conserving N within the system.

Livestock-mediated nutrient cycling through manure management and livestock feeding strategies are key entry points for improving N cycling and overall use efficiency (Powell et al., 2010; Smith et al., 2009). Other means of increasing N throughflow and cycling in farming systems include crop residue management, such as mulching in combination with non-tillage, legume intercrops and improved fallows (e.g., Campiglia et al., 2011; Place et al., 2003; Tittonell et al., 2012). Altogether these practices may have a positive impact on productivity, N flows and N use efficiency at the farm level.

Nutrient balances are commonly used as indicators of agricultural externalities or pollution in developed countries, or as indicators of soil nutrient depletion in developing countries (e.g., Stoorvogel and Smaling, 1990; Tittonell et al., 2005). The nutrient balance is often regarded as a 'black-box', because it neither considers internal nutrient flows nor N dissipations (Cobo et al., 2010; Van Beek et al., 2009). Nevertheless, internal N flows are those that farmers can control to increase productivity and could have an impact on overall N use efficiency (Rufino et al., 2009a). Management options can be evaluated if farms are characterised as networks, in which the various activities of the farm are represented as nodes and the N flows between them as interconnections. Describing the network of N flow within a system can help to identify weaknesses and critical points to target interventions (Küstermann et al., 2010). Network analysis allows to quantify the degree of integration and diversity of the farming system using a set of indicators (Rufino et al., 2009a). The objective of the present study was to analyse N flows of crop-livestock systems of the Madagascar highlands and their relationship with productivity and food self-sufficiency to explore management options which may improve farm economic performance.

2. Material and methods

2.1 Farming systems

The study was conducted in the area around Antsirabe (19°51'S; 47°01'E), in the Vakinankaratra region of the Malagasy highlands (1200-1550 m.a.s.l.). The climate is characterized by warm and rainy summers from November to April (average rainfall of 1300 mm and temperature of 19.2°C) and cool and dry winters from May to October (188 mm and 15.0°C). Dominant soil types in the region are Ferralsols with moderate P fixation capacity and high erodability (Braun et al., 1997) coexisting with soils derived from more recent volcanic activity (Cambisols, Andosols).

Agriculture is mainly practiced on smallholder farms with dominance of mixed crop-livestock systems. Paddy rice is the most important crop for food consumption and for sales (Rakoto Ramiarantsoa, 1995) with an annual production of 4.5 million tons in 2009 (FAO, 2012a). A range of upland crops are grown on the convex hill slopes, known locally as *tanety*. These include maize (*Zea mays*), beans (*Phaseolus* spp.), potato (*Solanum tuberosum*), sweet potato (*Ipomoea batatas*), cassava (*Manihot esculenta*) and forages (*Brachiaria* spp., *Pennisetum purpureum* Schumach. cv. *Kizoz* i.e., elephant grass). In the valley bottoms and lowlands, temperate crops such as barley (*Hordeum vulgare*) and wheat (*Triticum aestivum*) or temperate fodders such as oat (*Avena sativa* L.) and annual ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) are cultivated during winter after the rice harvest. Patches with natural vegetation on *tanety* (*Heteropogon contortus*, *Aristida* spp. and sparse trees) are traditionally grazed by livestock.

Livestock production is dominated by small herds with less than five heads, ranging from low-productive native zebu cattle to intensive dairy based on European pure-bred cattle (i.e., Norwegian Red and Holstein). Feeding practices vary according to feed availability and milk production. Crop residues and native grasses are mainly used in the smallest dairy farms, while fodder crops and concentrate feeds are used by the intensified dairy farms.

This study was conducted on four case farms located in four villages within a radius of 25 km around Antsirabe. The farms are representative of the diversity of crop-livestock farming systems according to a typology of farms (crops and animals; n = 55) based on cropping, breeding and manure management practices (Alvarez, 2012). The four types represented here were described as: (i) type 1, large livestock farms with European cattle breeds (> eight animals) and significant diversification with poultry and pigs activities; (ii) type 2, farms with fewer European dairy cows (about two) and with significant diversification with pigs activity; (iii) type 3, farms with small upland areas and dairy animals fed forage ad libitum; (iv) type 4, farms with very small herds composed of zebu crossbred (about one cow) with low milk production (≤ 7 L per day per cow) and no temperate fodders in lowlands.

2.2 Integrated Analysis

2.2.1 System conceptualization

The four smallholder farms were conceptualized as systems composed by several compartments which represent the main farm activities (crop and livestock activities, milk processing, feed and manure storage) and the household (family members and permanent workers). The compartments are units which produce and consume biomass and/or provide financial resources to the household. The farm is represented as a network where the links between compartments represent biomass flows within the farm. Biomass imports (food, feed purchases, pasture) and exports (crops, milk,

animal sales) are represented as inflows and outflows, respectively, between farms and the external environment. The losses of biomass and nutrients (i.e., dissipation by volatilization, runoff, leaching, animal deaths) were also taken into account as an outflow from the compartments. In this analysis, we express flows in kg of N per year, and stock and compartmental size in kg of N. A more detailed description of the system conceptualization method is given by Rufino et al. (2009a).

2.2.2 N balances, N use efficiency and productivity and profitability indicators

Total N import (IN) is the total amount of N imported from off-farm on an annual basis. The total N export (EN) is the sum of N contained in sold items (crops, grains, milk and other animal products, manure); thus N losses (e.g., volatilization, leaching, human waste) are not included as components of EN. The partial farm gate N balance ($\text{kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) is the difference between IN and EN expressed per cropped unit area and per year. The full N balance ($\text{kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) is the difference between IN and total N output (i.e., EN plus N losses). The whole-farm nitrogen use efficiency is defined as the ratio between EN and IN.

Paddy rice and milk are the two main farm products which contribute to food consumption and household income. Rice yields ($\text{t DM ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) and milk production ($\text{kg FM cow}^{-1} \text{ year}^{-1}$) are used to assess farm productivity. Food self-sufficiency is calculated as the ratio of edible energy (in kcal) of the total food produced on-farm (edible grains and tubers, milk, eggs, beef, pig and poultry meat) to energy requirements of the household members. The daily food availability (in $\text{kcal capita}^{-1} \text{ day}^{-1}$) is the amount of total food consumed on the farm (i.e., food produced more purchased minus food sold). Data on food conversion into energy (kcal) were obtained from FAO tables (FAO, 2012a). The energy requirement of the household is based on the standard nutritional requirement, 2100 kcal $\text{capita}^{-1} \text{ day}^{-1}$ (Shapouri et al., 2010) multiplied by the number of members per household including permanent workers. The cost of food production was calculated as the ratio between total agricultural expenditures (expressed in US\$) and total edible production of farm (expressed in 1000xkcal i.e., Mcal).

The agricultural gross margin is the difference between the total of agricultural revenues (i.e., sales of milk, animals, rice grains, cash crop, manure) and the total of agricultural expenditures (i.e., purchases of feed concentrates, fodder, animals, veterinary cares, mineral fertilizer, pesticides, labours, food).

2.2.3 Network size, dependence and cycling indicators

Seven network analysis indicators were selected for this study. Throughput (T..) is the sum of all N flows within the system. Total system throughflow (TST) is the sum of all compartmental throughflows within the system, and it represents the mobile N pool within the system. System dependence (D) on imports from the external environment is defined as the ratio between IN and TST (i.e., the part of total system throughflow which came from imports). TSTc is the total cycled system throughflow. The Finn's cycling index (FCI) is the proportion of TST that is recycled within the system (i.e., ratio between TSTc and TST), and it was proposed to assess the degree of integration in agro-ecosystems (Rufino et al., 2009a). FCI takes values between 0 and 1, with extremes indicating either no recycling or complete recycling. The average mutual information (AMI) and the statistical uncertainty (H_R) are used to assess the organisation and diversity of the network connections, respectively. AMI (expressed in bits) quantifies the organisation of the flows in the network, measuring the information associated with the exchange of N within the system. H_R is the upper bound for AMI, and represents the diversity of flows given a certain amount of throughput. If in a

system the total flow is divided equally between all compartments, and all compartments are connected, then AMI will be zero or very close to zero. Conversely if few flows connect few compartments, the value of AMI will approach its upper boundary (H_R). For more details on network analysis indicators and the ways to calculate them, refer to Rufino et al. (2009a) and Appendix 2.

2.3 Data collection and N flow calculation

2.3.1 Data collection

The on-farm participant-observation method (Malinowski, 2003) was used to gather technical data and farmers' operational decisions at the farm level (i.e., farm activities, crop-livestock interactions, biomass flows, social and economic constraints). The participant-observation occurred in 2009, during winter (July), and led to quantify the biomass flows of the previous cropping year for each of the four selected smallholder farms.

Forages and manure samples were collected from March 2010 to February 2011. Samples were dried, weighed to determine dry matter (DM) and stored for further nitrogen (N) analysis using near infrared spectroscopy (FOSS-NIRSystems 5000, Silver Spring, MD, USA). The NIRS prediction referential used in the present study consisted of large forage and manure database pairing reflectance values and chemical analyses for N concentrations (Tran et al., 2009). Additional data on DM and N concentration of food, feed and forages were collected from the literature (Appendix 1). The DM and N values were used to convert the fresh biomass flows into nitrogen flows, and thus, to construct N flow networks for the four farms.

2.3.2 Assumptions used for calculations of biomass and N flows

Table 1 summarizes the main structure and activities of each farm and the data sources used. The main calculations of biomass and N flows are presented in Appendix 3. The straw yields of barley and wheat were determined using harvest indices from the literature (Amin et al., 1992; Jalil and Ghani, 1982). Feed refusal rates were used to estimate the amount of feed transferred directly to the manure storage. Negligible, intermediate (0.5-2%) and high (2.5-6%) refusal rates were assumed for concentrates and brewer's grain, for fresh forages and for straws.

Animal excreta deposited off-farm by zebu cattle or by free range poultry were considered as dissipations. Human excreta were not used as organic fertilizers so considered as a dissipation. Ammonia volatilization from animal housing excreta was taken into account for zebu and dairy cattle, pigs and poultry. The urine N excreted in barn is subject to rapid volatilization which could represent 4 to 46% of total urine N excreted (Rufino et al., 2006). Nitrogen losses in the barn typically range from 8 to 50 % of total N excreted by animals, according to housing facilities (Rotz, 2004), and are mainly due to ammonia volatilization. We assumed that emission rates of volatilization in barn for cattle, poultry and pigs were 27, 25 and 36% respectively (cf. Appendix 3).

As pigs, poultry and cattle manure were mixed, the N losses during manure storage were calculated for the entire mixed farmyard manure storage. N emission rates of farmyard manure storage ($ER_{\text{manure storage}}$) were measured in the four farms and were respectively 41, 54, 25 and 94% for farm 1 to 4 (Salgado, unpublished results; cf. Appendix 3). Emission rates were used to quantify ammonia volatilization in fields after farmyard manure application ($ER_{\text{manure volatilization}}$) and mineral fertilization ($ER_{\text{fertilizer volatilization}}$). ER of volatilization in field after manure and mineral are 15% of N applied (cf. Appendix 3).

Table 1: Main biomass flows related to farm activities and the data sources

Farm activities	Units	Farm 1	Farm 2	Farm 3	Farm 4	Data sources
Food and fodder crops						
Rice ⁽¹⁾	ha	4.0	2.2	2.8	1.2	Survey
	t DM ha ⁻¹ year ⁻¹	1.7	2.3	2.0	1.9	Survey
Maize	ha	4.0	0.4	0.3	1.0	Survey
	t DM ha ⁻¹ year ⁻¹	7.3 ⁽²⁾	2.3 ⁽¹⁾	2.3 ⁽¹⁾	2.0 ⁽¹⁾	Yield measurement
Oat - Rye-grass	ha	1.6	0.4	0.7	/	Survey
	t DM ha ⁻¹ year ⁻¹	4.3	3.7	4.2	/	Survey
Elephant grass	ha	3.0	0.9	0.3	/	Survey
	t DM ha ⁻¹ year ⁻¹	19.0	3.0 ⁽³⁾	11.0	/	Survey
Brachiaria	ha	/	0.5	/	0.04	Survey
	t DM ha ⁻¹ year ⁻¹	/	2.6 ⁽⁴⁾	/	3.0 ⁽⁵⁾	Survey and (a)
Fodder radish	ha	1.0	/	/	/	Survey
	t DM ha ⁻¹ year ⁻¹	8.4	/	/	/	Survey
Sweet potatoes	ha	/	1.0	/	0.3	Survey
	t DM ha ⁻¹ year ⁻¹	/	2.8	/	1.8	Survey
Potatoes	ha	/	0.7	0.3	0.06	Survey
	t DM ha ⁻¹ year ⁻¹	/	5.5	5.7	1.4	Survey
Wheat	ha	/	0.8	/	/	Survey
	t DM ha ⁻¹ year ⁻¹	/	2.2	/	/	(b)
Barley	ha	/	/	0.4	/	Survey
	t DM ha ⁻¹ year ⁻¹	/	/	2.6	/	Survey
Animal farming						
Dairy cow	average nb year ⁻¹	21.0	4.0	6.0	2.0	Survey
Average milk production	L cow ⁻¹ day ⁻¹	13.4	7.1	4.9	2.2	Calculations
Zebu	average nb year ⁻¹	6	4	6	/	Survey
Pork	average nb year ⁻¹	12.5	4.5	1.4	1.0	Survey
Poultry	average nb year ⁻¹	277	50	45	20	Survey
Fodder imports						
Rice straw	t DM year ⁻¹	33.0	/	10.8	/	Survey
Brewer's grains	t DM year ⁻¹	19.0	1.1	1.4	/	Survey
Concentrate	t DM year ⁻¹	53.3	0.5	3.8	/	Survey
Exports						
White rice	t FM year ⁻¹	1.4	0.7	2.0	/	Survey
Potatoes tuber	t DM year ⁻¹	/	0.6	1.7	/	Survey
Wheat or barley grain	t DM year ⁻¹	/	1.5	0.9	/	Survey
Milk	t FM year ⁻¹	76.5	8.2	8.5	1.1	Calculations
Pigs	t FM year ⁻¹	5.6	0.8	0.3	0.1	Calculations
Poultry animals	t FM year ⁻¹	1.3	/	0.08	0.005	Calculations

(1): grain yield; (2): whole plant (stems and ears) yield for silage; (3): elephant grass used as plot edge; (4): brachiaria crop under direct-sowing mulch-based cropping systems with low density; (5): small plot of brachiaria used for seed production; (a): reference from GSDM et al., 2008 (Guide pour les Hautes Terres de Madagascar); (b): reference from Malagasy Ministry of Agriculture and Fisheries (MAEP, <http://www.maep.gov.mg/filtecble.htm>).

In Africa, N losses by leaching in cultivated fields ranges from 24 to 40% of N applied and from 3 to 11% of N applied during the rainfall and the dry season, respectively (Vayssières and Rufino, 2012). Leaching rate used here were 7 or 32% of N applied respectively during rainfall or dry seasons (cf.

Appendix 3). N losses by runoff were calculated using the erosion rates (R_{erosion}) estimated by Douzet et al. (2008 and 2010) for cropping systems. No runoff on terraced fields was assumed, and the erosion rate on tanety was 10.0, 3.0 and 2.3 t DM soil ha⁻¹ year⁻¹ for annual rainfed crop on conventional ox-plough tillage, perennial fields and for DMC systems, respectively (cf. Appendix 3). The flows of N deposition, N₂ fixation or sedimentation in the landscape were considered negligible and therefore not estimated.

2.4 Scenarios

The current systems with their resources and management practices were used as baseline. Four scenarios were designed to explore intensification: i) N input for dairy cows is increased by increasing the concentrate feed supply (+concentrate); ii) N input for rice production is increased by increasing mineral fertilizer supply (+mineral fertilizer); iii) improvement of N conservation during manure management (+manure management) and iv) the combination of the first and third scenarios (+{concentrate, manure management}). For the four scenarios we assumed a linear of response to N fertilizers applications. In +concentrate, dairy production is increased by increasing N input through additional concentrate feed (0.3 kg FM of provender and 0.9 kg FM of brewer's grains per cow per day). The additional feed supplementation was supposed to be the same for the four farms. It was assumed that the genetic potential of the cows allows for an increase in milk production of about 2 litres (L) per cow with the above mentioned additional feed supply (cf. Appendix 5, Hoden et al., 1998). In +mineral fertilizer, rice production is increased by adding urea. Assuming that N was the most limiting factor for crop production, an additional application of 200 kg FM urea ha⁻¹ would lead to an increase of the grain yield about 1 t ha⁻¹ (Husson et al., 2009). In +manure management, N conservation is enhanced through improvements in manure management: i) covering manure heap during storage (Rufino et al., 2007) and ii) rapid incorporation of manure into the soil (Smith et al., 2009). Covering the manure heap during storage leads to a decrease of 22% of N losses (Rufino et al., 2007), and the rapid incorporation of manure in soil (within 48 hours) reduces N losses by volatilization by 31% (Smith et al., 2009). The scenario +{concentrate, manure management} combined the main assumptions described previously for each of these two scenarios. Indirect effects and feedbacks induced by scenarios on animal feeding, N excreted, N applied in field, milk and crop productivity, were taken into account (cf. Appendix 5). More details on assumptions, calculations and scenarios are presented in Appendix 3 and Appendix 5.

Scenarios were assessed using the changes in indicators values compared to the baseline as reference. Additional indicators were constructed for the analysis of scenario impacts: the marginal response to incremental N on TST and on the capacity of N soil stock. The marginal responses to incremental N at farm scale (in US\$ per kg N per year) is the change in gross margin in response to an annual 1 kg N increase in TST. The capacity of soil N stock is the number of years that soil N stock could still provide N assuming a linear depletion over time with no additional N inputs (based on soil N balance of baseline).

3. Results

3.1 System characterisation and major biomass flows

In all farms, rice occupied a large part of the cultivated land (29-58%), and cash crops (wheat, barley or potatoes) were produced on lowland soils (Table 2 and Appendix 2). Milk was produced by dairy cattle; cows were supplemented with purchased concentrate feeds. Local zebu cattle kept for

ploughing and/or as capital saving were fed on communal grasslands in the *tanety* and sometimes supplemented when ploughing the land.

The four case study farms differed in the amount of resources and farming practices. Specific characteristics of each farm were:

Farm type 1: Purchased concentrate feeds represented the largest proportion (about 70%) of N imports. Milk was entirely processed on-farm into cheese, butter and cream. Additional off-farm milk was purchased for processing purposes. By-products of milk processing (whey and buttermilk) were used to feed pigs in addition to other feed supplements. Rice represented about 90% of the energy intake of the household. Rice surpluses sold at the market provided less than 1% of the family income. Most farm income (74%) was generated from dairy activity.

Farm type 2: This farm was specialized on rice and upland food crops, and their dairy cows fed mainly on native grass, forages and rice straw produced on-farm, and on few concentrate feeds. Fattening pigs were fed with farm products (sweet potatoes, potatoes and maize), rice bran and brewer's grain, and poultry were free ranging. Large amounts of mineral fertilizer (urea and NPK) were used (around 28% of total N imports) and applied mainly on oat-ryegrass (after each cut) and wheat. Most of the food consumed by the household (95%) was produced on-farm. Farm income was composed mainly by sales of milk and pigs, and additional cash came from selling cows or from casual off-farm activity of the household head.

Farm type 3: Native grasses represented the largest part of the N feed inputs and almost one-half of N imports of the farm. The average N stock of the soil of the entire farm (2 t N ha^{-1} on the first 20 cm of soil layer) was low compared to the other three case study farms. Mineral fertilizer (urea and NPK) were applied mainly on oat-ryegrass (after each cut) and barley. Most household food was produced on-farm and based on rice (about 67% of the energy intake). Almost half of the farm income was made from milk sales and one-quarter from sales of potatoes. Rice surpluses and finished pig sales each generated about 10% of the farm income.

Farm type 4: Cattle fed mostly on native grasses (cut-and-carry system), i.e., about 60% of dry matter intake and N imports, and on rice straw (about 25% of dry matter intake). Grass biomass collected from communal land was used as animal bedding and for composting with manure. Cropping was mainly for self-consumption, and few fodder crops were grown to feed cows, to sell seeds (*Brachiaria*) and to stabilize the edges of terraces (*Setaria*). About one-third of the manure was sold. Main sources of income were seasonal milk sales, one finished pig per year and maize grain. No rice was sold.

Based on cropped area, cattle herd size and ratio between land and labour, (Table 2) the farm type 1 was characterized as the wealthiest type, farm type 2 and 3 as medium types (with intermediate size of land and cattle herd, respectively), and farm type 4 as the poorest type. The relatively wealthy farm type 1 cropped an area 2-5 times larger than that of the other farm types, including irrigated rice (4 ha) and fodder crops. In all farms, manure from cattle, pigs and poultry was mixed, stored in a heap and used as fertilizer on food or fodder crops. All farms used mineral fertilizers (urea, NPK) on the rice nurseries, fodder or cash crops, but the amounts used were very small (0.5 kg N ha^{-1}) for the poorest farm type 4. The main source of farm income varied between farm types, from selling dairy products or cash crops to casual employment off-farm. All farms hired salaried labour for transplanting and harvesting rice.

Table 2: Main characteristics of the crop-livestock case-study farms from the Malagasy highlands and their major N inflows and soil N stock

Farm	Cropped area	Household size	Land : labour ratio	Salaried labour	Cropped area with rice	Cattle herd size	Livestock	Livestock density	Farm income from dairy ⁽¹⁾	Farm income from animals	Total N imports	Imported N fertilizer ⁽²⁾	Imported N feed ⁽²⁾	Imported N food ⁽²⁾	Feed supplement N in IN	Native grass N in IN	Soil N stock ⁽³⁾
	ha	capita	ha capita ⁻¹	man-days	%	LUs	LUs	LUs ha ⁻¹	%	%	kg N ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	kg N LU ⁻¹	kg N capita ⁻¹	%	%	t N ha ⁻¹
Farm 1	13.6	17	0.8	1 315	29	34	40	2.9	74	99	296	14	89	0.75	71.2	13	3.5
Farm 2	6.9	12	0.6	1 000	32	7	8	1.2	33	79	101	28	40	0.30	8.4	55	3.6
Farm 3	4.8	9	0.5	1 535	58	12	12	2.5	45	62	133	19	91	0.60	15	53	2.0
Farm 4	2.7	9	0.3	385	45	3	3	1.1	39	79	96	0.5	30	0.24	0.0	98	3.4

LU: Livestock unit; (1): animal sales are not considered here; (2): imported during one year; (3): total nitrogen stock for the 0-20 cm soil layer (Alvarez, 2012).

The number of compartments per farm was comparable across the four case studies and ranged from 14 to 19; the poorest farm (farm type 4) presented the lowest compartments number. Farms types 2 and 3 had higher number of flows (Appendix 2). The proportion of internal N flowing to the household compartment relative to the livestock compartment increased from the wealthiest (1%) to the poorest (34%) farm. On farm type 1, nearly 25% of the internal N flows from livestock returned to silage maize and oat-ryegrass through manure applications to these crops.

3.2 Nitrogen imports, N balances and N use efficiency

Total N imports (IN) were largest for farm type 1, 2-4 times larger than that of farm types 2 and 3 (Table 3). N imported by animal feeds represented the largest proportion of IN except for farm type 4 (its largest N import was from the native grass for composting). N import through mineral fertilization represented about 28% of total N imports for farm type 2. Household N food imports were less than 1% of IN for the four farms. The partial farm gate N balance (i.e., IN – EN) was positive for all farms (Figure 1), with high (> 200 kg N ha⁻¹) and comparable values for farm types 1 and 3. Farm type 1 exhibited greater total N losses (N emissions, runoff, leaching, off-farm animal excreta, human excreta and dead animals), twice larger than those from other farm types. The full N balance was largest for farm type 3 (130 kg N ha⁻¹) and smallest for farm type 4 (-58 kg N ha⁻¹). On farm type 4, N losses represented 49% of the total N throughflow (TST) and about 75% of losses occurred during manure storage. The overall N use efficiency at farm scale ranged from 0.10 to 0.20 (Table 3). The highest efficiency for farm type 2 was due to a greater capacity to mobilize farm N resources, illustrated by negative soil N balance and negative N balance for the dairy herd (Figure 1), while little N was imported. Farm type 3 had the lowest N efficiency due to high dependency on external N imports, but the largest positive full N balance.

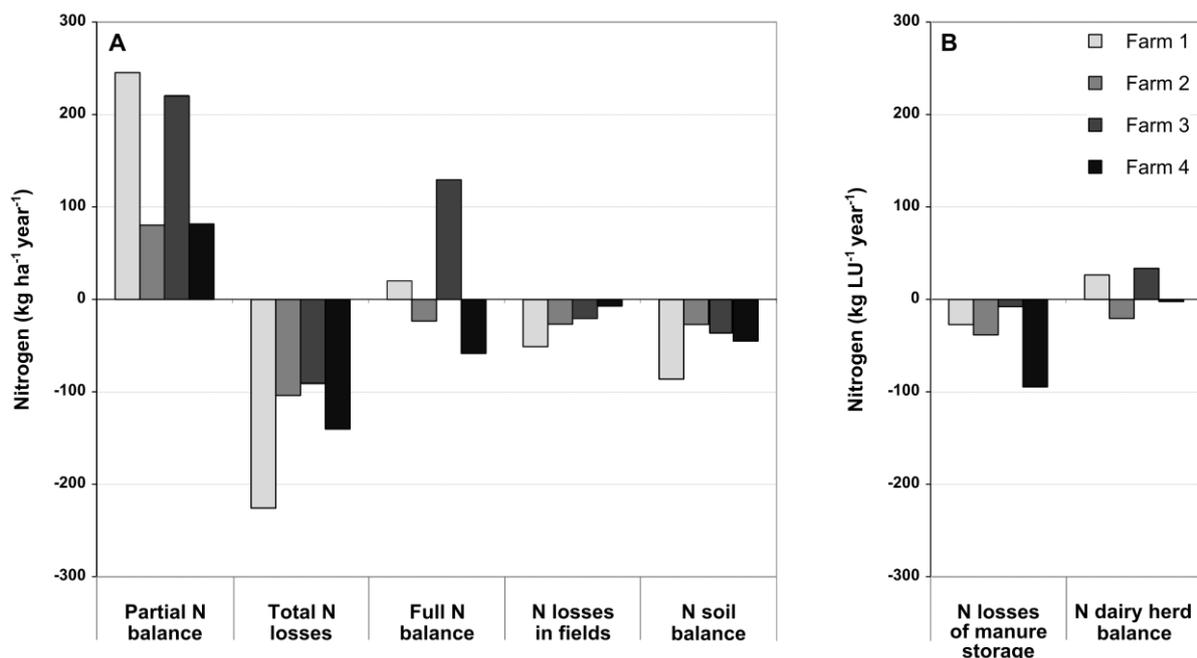


Figure 1: Nitrogen balances and losses related to whole farm or cropped area (A), and to livestock (B) observed in the four crop-livestock farms of the Malagasy highlands.

3.3 Network size, integration, diversity and organisation

The total system throughput (T..) and throughflow (TST) of N expressed per household member indicated that N network size of the wealthier farm type 1 was 5 and 3 times larger than the medium class farm types 2 and 3 and about 9 times larger than the poorest farm type 4 (Table 3). The four farm types depended on imported N (IN) to support the system throughflow, and the maximum dependence (D) was 41% on farm type 3. Farm type 1 had the greatest IN but also the lowest dependence on external N. The total amount of N cycled (TSTc) varied from 3 to 41 kg N capita⁻¹ year⁻¹. The degree of system integration, measured by the Finn's cycling index, was relatively small and comparable for the four farms (2.5 to 4.4%). The wealthier farm type 1 recycled N slightly more efficiently, 4.4% of the TST. The values of the average mutual information (AMI) and the statistical uncertainty (H_r) indicated that the poorest farm had a less organised N flow network and a lower diversity in network connections compared with the other three farms.

3.4 System productivity and economic performance

Total crop and animal biomass production per capita (in kg N capita⁻¹ year⁻¹) and milk productivity (in kg FM raw milk cow⁻¹ year⁻¹) increased substantially from the poorer to the wealthier farm types (Table 3). The food self-sufficiency ratio (food energy produced / food energy requirement) increased from the poorest to the wealthiest farm type. In all farms the food self-sufficiency ratio was above one and, at least 88% of the food consumed by the household was produced on farm (Table 3). The average daily food availability (i.e., food produced more purchased minus food sold) was lowest for farm type 4 (1709 kcal capita⁻¹ day⁻¹). That value was slightly below the minimum human dietary energy requirements of 1760 kcal capita⁻¹ day⁻¹ (FAO Hunger Map 2010), although the farm type 4 produced 1.9 times more edible energy than their requirements (based on 2100 kcal capita⁻¹ day⁻¹).

The cost of food production decreased from farm type 1 to farm type 4 (Table 3), as did the relative importance of milk in the total production (about 63, 14, 22 and 8%, for farm types 1, 2, 3 and 4, respectively). Agricultural gross margin decreased from the wealthier farm type 1 to the poorer farm type 4 (Table 3). Gross margin per capita of farm type 1 was about 150 times higher than that of farm type 4. The livestock activities provided the largest part of farm income across farm types (62-99%), and the relative importance of dairy sales in total farm income was particularly high for farm types 1 (74%) and 3 (45%). The second income-generating activity was pig farming, with respectively 15, 24 and 27% of total farm income on farm types 1, 2 and 4, and sales of cash-crops (potatoes and barley grain) on farm type 3 (28%). Farm type 2 derived 21% of their total income from selling cattle.

Farm type 1 had high values for all productivity indicators, food self-sufficiency and agricultural gross margin, but also high N losses to environment and dependence on external inputs. Farm type 2 had the highest farm N use efficiency. Farm type 3 had the greatest partial N balance but also the highest dependence on imported N. Farm type 4 presented the lowest values for most indicators and large N losses in comparison to its total N throughflow. Agricultural gross margin was directly dependent on the exported production that would hence not be recycled within farm. Thus farm type 2 could have high revenues provided by herd destocking and relatively low N recycling (low FCI).

Table 3: Indicators of external N imports, soil N stock, N network analysis, farm productivity and economics

Indicators	Units	Farm 1	Farm 2	Farm 3	Farm 4
External N imports, N use efficiency at farm level, and soil N stock					
IN	kg N capita ⁻¹	239	56	133	29
Proportion of N feed on IN	%	87.3	45.2	90.6	35.3
Proportion of N fertilizer on IN	%	4.6	27.9	7.5	0.5
Proportion of N food on IN	%	0.4	0.7	0.5	0.8
Farm N efficiency	kg N / kg N	0.17	0.20	0.12	0.15
Soil N stock	kg N capita ⁻¹	2.8	2.0	1.1	1.0
N network size, dependence on external N imports, N cycling and organization					
T..	kg N capita ⁻¹	1 037	216	364	113
TST	kg N capita ⁻¹	934	181	325	86
D	kg N / kg N	0.26	0.31	0.41	0.33
TSTc	kg N capita ⁻¹	41	4	13	3
FCI	%	4.4	2.5	4.0	3.5
AMI	bits	1.9	1.4	1.5	1.2
H _R	bits	3.3	3.4	3.1	2.6
System productivity, household food characteristics and economics					
Total N contained in the biomass produced ⁽¹⁾	kg N capita ⁻¹	170	41	54	18
Milk productivity	kg raw milk year ⁻¹ cow ⁻¹	5 059	2 676	1 832	822
Food Self-Sufficiency ratio	kcal produced / kcal required	7.5	4.7	4.4	1.9
Average household food availability ⁽²⁾	kcal day ⁻¹ capita ⁻¹	2 297	3 183	2 529	1 709
Self-consumption ratio ⁽³⁾	% (kcal produced / kcal consumed)	93	95	88	93
Rice proportion in the diet	% (kcal rice / kcal consumed)	89	56	67	54
Food production cost ⁽⁴⁾	US\$ Mcal ⁻¹	0.42	0.10	0.14	0.04
Agricultural Gross Margin ⁽⁵⁾	US\$ year ⁻¹ capita ⁻¹	1 545	66	118	10

IN: total N imports; T.. : total system throughput; TST: system throughflow ; D: dependence; TSTc: total N recycled; FCI; Finn's cycling index; AMI: average mutual information; H_R: statistical uncertainty.

(1): edible plant biomass production and animal products (milk and meat); (2): household food produced and purchased, calculated considering different rates of presence for family member (i.e. 1) and for permanent worker (i.e. 0.7); (3): self-consumption ratio calculated as the proportion of food produced on the total food consumption; (4): ratio between total agricultural expenditures and total edible production of farm; (5): the minimum wage is about 71 000 Ar (i.e. about 36 US\$) per month for agricultural workers (<http://www.minimum-wage.org>, 2012), or 436 US\$ per year.

3.5 Scenario exploration

3.5.1 Impacts on productivity, N efficiency and network analysis indicators

The differences between scenarios were largest for farm types 3 and 4 (Figure 2 and 3). The main changes observed across scenarios were: (i) increase in farm productivity under +concentrate and +{concentrate, manure management}; (ii) increase in FCI and decrease in N losses during manure storage under +manure management and +{concentrate, manure management}; (iii) a small increase

in D and in the partial farm N balance under +mineral fertilizer, despite the increase of N losses in fields. Increased milk production resulted in an increase of food self-sufficiency ratio. Through the four scenarios AMI did not change much (Figure 2). It was the same for H_R that only varied from 0 to $\pm 3.7\%$ of the baseline. Milk production increased about 2.2 times more than the baseline on farm type 3 under scenario +{concentrate, manure management}. This was associated with a marked increase in N use efficiency and a decrease in N losses during manure storage. Such effects were also pronounced on farm type 4 under scenarios +concentrate, +{concentrate, manure management} and +mineral fertilizer (Figure 2). Farm N use efficiency tended to be higher under +{concentrate, manure management} and +concentrate than under +mineral fertilizer or +manure management (Figure 3). The variations in food self-sufficiency and N network size (TST) were relatively small and seemed to be slightly larger under both +{concentrate, manure management} and +concentrate scenarios. The increase of the total N recycled (TSTc) was higher under both +manure management and +{concentrate, manure management} scenarios. TSTc did not change under +mineral fertilizer. Indicators calculated for farm type 1 were less sensitive to variation across scenarios, and the main changes observed corresponded to FCI under +{concentrate, manure management} and +manure management scenarios.

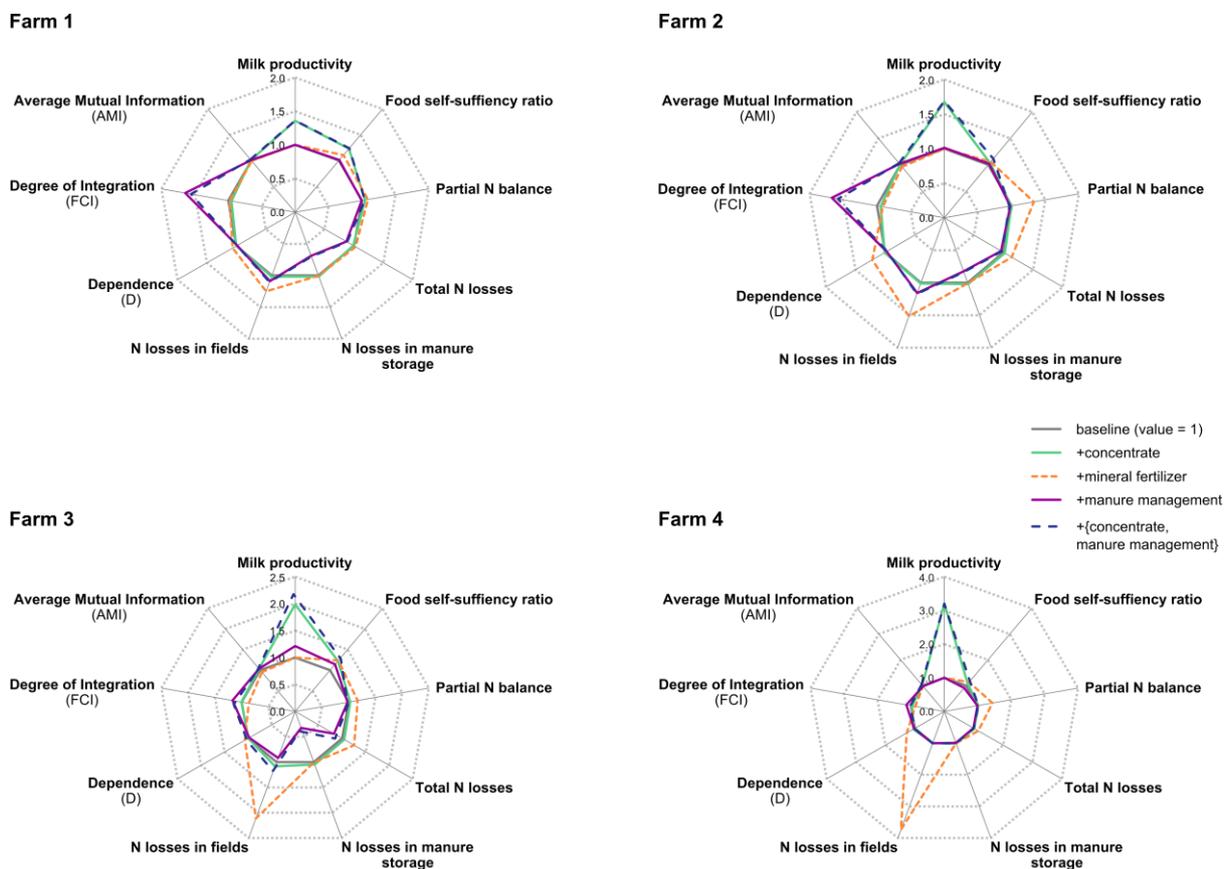


Figure 2: Relative changes to baseline of scenarios on productivity, food self-sufficiency, N balance and N losses, and network analysis indicators for the four crop-livestock farms of the Malagasy highlands. The four scenarios were: (+concentrate) increase N inputs as supplementary feeds; (+mineral fertilizer) increase N inputs as mineral fertilizer; (+manure management) improve N conservation during manure storage and manure soil application; and (+{concentrate, manure management}) both improve manure management and increase feed supplementation. Indicator value observed in baseline was the reference value (i.e. baseline = 1) in the four radial diagrams.

3.5.2 Economic impacts of scenarios

In the four scenarios, the largest changes were observed for agricultural gross margin, with an increase in most cases except for +mineral fertilizer scenario on farm type 2 (Figure 3). The scenarios +concentrate and +{concentrate, manure management} induced the highest increase on gross margin, with a particularly strong positive effect for the poorest farm. The adoption of practices to reduce N losses in the barn, during manure storage and at manure spreading (scenario +manure management) allowed an increase of gross margin 1-2 times higher than the baseline. The scenario +mineral fertilizer increased the gross margin at best 1.7 times, but generated financial losses for farm type 2. The marginal response to incremental N at farm scale varied also across farm types and scenarios (Figure 3). Scenarios +concentrate and +{concentrate, manure management} led to highest economic gains, with gross margin increasing from 7.2 to 16.6 US\$ per additional unit of TST. Gains were generally small or even negative under scenarios +mineral fertilizer and +manure management. Only on farm type 3, the changes in productivity under +manure management were large enough to induce economic gains, as a small relative variation of TST (plus 92 kg N) generated a large increase in agricultural gross margin through milk sales.

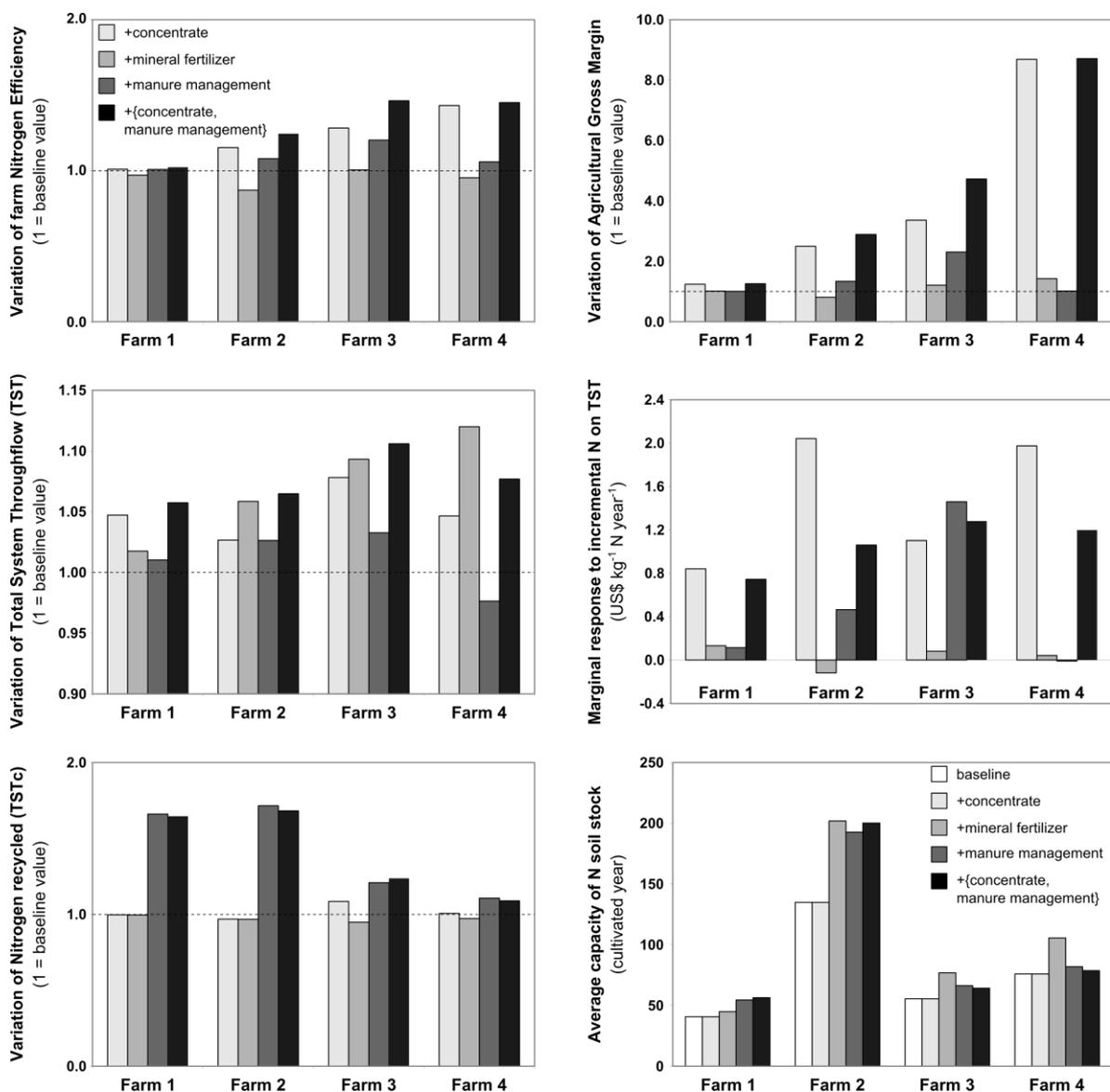


Figure 3: Impacts of scenarios on the farm N efficiency, the N network size (TST), the amount of N recycled (TSTc), the agricultural gross margin and its response to incremental N within total system throughflow (TST), and the capacity of soil N stock for the four case studies of Madagascar and according the four scenarios.

3.5.3 Impacts of scenario on soil N stock

Farm types 1, 2, 3 and 4 removed approximately 2.5, 0.7, 1.8 and 1.3% of the soil N stock annually, respectively. The soil N stock could still provide N to the system during 41, 135, 55 and 76 years, respectively, at the above mentioned rates of soil N removal. That capacity of soil N stock would increase under all scenarios on these four farms (Figure 3). The addition of N inputs with urea under scenario +mineral fertilizer would lead to small increases in the soil N balance and consequently in soil N stocks from about 10 to 50% for farms. The N conservation practices simulated under +manure management and +{concentrate, manure management} would allow increasing soil N stocks by about 38, 51, 18 and 4% for farm types 1, 2, 3 and 4, respectively.

3.6 Sensitivity analysis

Sensitivity analysis were performed on prices (Table 4 and Appendix 7), and on emission rates and rice yields (Table 5). The fluctuations of 20% around current prices of products (rice and milk) and inputs (urea and concentrate), only impacted on the gross margin across farm types (Table 4 and Appendix 7). Because dairy is the main source of agricultural income, effects on agricultural gross margin were higher with fluctuations on price of milk and of concentrate feed. The change of $\pm 20\%$ of current price on rice, milk, urea and concentrate did not change the economic advantage of scenarios involving concentrate feed *versus* urea (Appendix 7).

Table 4: Relative variations of the agricultural gross margin (in % of the reference value) according to the variations of $\pm 20\%$ of product and input prices, across the four farms and for the four scenarios

Farms	Agricultural gross margin variations			
	Rice prices $\pm 20\%$	Milk prices $\pm 20\%$	Urea prices $\pm 20\%$	Concentrate prices $\pm 20\%$
1	0% to $\pm 1\%$	$\pm 26\%$ to $\pm 31\%$	0% to $\pm 1\%$	$\pm 13\%$ to $\pm 14\%$
2	$\pm 2\%$ to $\pm 17\%$	$\pm 31\%$ to $\pm 53\%$	$\pm 3\%$ to $\pm 24\%$	$\pm 3\%$ to $\pm 6\%$
3	$\pm 2\%$ to $\pm 18\%$	$\pm 25\%$ to $\pm 46\%$	0% to $\pm 9\%$	$\pm 6\%$ to $\pm 21\%$
4	0% to $\pm 32\%$	$\pm 30\%$ to $\pm 57\%$	0% to $\pm 25\%$	0% to $\pm 4\%$
Average	$\pm 5\%$	$\pm 36\%$	$\pm 4\%$	$\pm 8\%$

Despite the uncertainty in emission rates and the large fluctuation of total N losses, the indicators of network analysis (IN, TST, D, AMI, H_R) were in general marginally impacted except for FCI. FCI was directly affected by the increase or decrease of N recycled in the system (Table 5). Following the fluctuation of total N losses, the higher variation observed in sensitivity analysis concern agricultural gross margin.

Climate variability was not directly taken into account in our study. The sensitivity analysis on rice yield variation provides however indirect information about impacts of climate fluctuation affecting production (Table 5). Despite rice yield fluctuation of $\pm 20\%$ of, performance indicators were marginally affected and the scenarios including concentrate supplementation were still the most profitable.

Table 5: Variation of network analysis indicators, total N losses, self-sufficiency and agricultural gross margin (in % of the reference value), across the four farms and the four scenarios with fluctuation of N losses rates and of rice yield

Parameters	IN	TST	D	FCI	AMI	H _R	Total N losses	Self-sufficiency	Gross margin
Farm 1									
ER cattle in barn									
<i>8% and 50% of total N excreted by animals</i>	0%	0% to ±2%	0% to ±2%	0% to ±3%	±3% to ±4%	0% to ±2%	±17% to ±42%	0%	0%
ER manure storage									
<i>±20% of emission rate during storage</i>	0%	±1% to ±2%	±1% to ±2%	±9% to ±39%	±1% to ±2%	0%	±9% to ±10%	0% to ±1%	0%
ER manure volatilization									
<i>10 and 30 % of N applied</i>	0%	0% to ±1%	0% to ±1%	±1% to ±5%	0% to ±1%	0% to ±1%	±2% to ±8%	0% to ±3%	0% to ±1%
R leaching									
<i>24 & 3% and 40 & 11% of applied N in rainfall & dry season</i>	0%	0% to ±1%	0% to ±1%	±1% to ±5%	0% to ±1%	0%	±3% to ±7%	0% to ±1%	0% to ±1%
Rice yield									
<i>±20% of rice yield</i>	0%	0%	±1%	0%	0%	0%	0%	±4% to ±5%	±1%
Farm 2									
ER cattle in barn									
<i>8% and 50% of total N excreted by animals</i>	0%	±3% to ±7%	±3% to ±7%	±7% to ±12%	±4% to ±5%	0% to ±1%	±11% to ±26%	0%	0%
ER manure storage									
<i>±20% of emission rate during storage</i>	0%	0% to ±1%	0% to ±1%	0% to ±11%	0% to ±1%	0% to ±1%	±6% to ±9%	0%	0% to ±2%
ER manure volatilization									
<i>10 and 30 % of N applied</i>	0%	0% to ±1%	0% to ±1%	±1% to ±5%	0% to ±1%	0% to ±1%	±1% to ±4%	0% to ±3%	0% to ±17%
R leaching									
<i>24 & 3% and 40 & 11% of applied N in rainfall & dry season</i>	0%	0% to ±1%	0% to ±1%	±2% to ±6%	±1%	0%	±3% to ±5%	0% to ±2%	0% to ±9%
Rice yield									
<i>±20% of rice yield</i>	0% to ±1%	±1%	±1% to ±2%	±2% to ±6%	0% to ±1%	0% to ±1%	0% to ±1%	±5% to ±6%	±2% to ±9%

Parameters	IN	TST	D	FCI	AMI	H _R	Total N losses	Self-sufficiency	Gross margin
Farm 3									
ER cattle in barn <i>8% and 50% of total N excreted by animals</i>	0%	0%	0%	0% to ±3%	0% to ±2%	0%	±15% to ±44%	0% to ±2%	0% to ±9%
ER manure storage <i>±20% of emission rate during storage</i>	0%	0% to ±1%	0% to ±1%	0% to ±8%	0% to ±1%	0% to ±1%	±10% to ±19%	0% to ±4%	0% to ±21%
ER manure volatilization <i>10 and 30 % of N applied</i>	0% to ±1%	0% to ±1%	0% to ±2%	±2% to ±5%	0% to ±1%	0% to ±1%	±2% to ±8%	0% to ±5%	0% to ±23%
R leaching <i>24 & 3% and 40 & 11% of applied N in rainfall & dry season</i>	0% to ±1%	0% to ±1%	0% to ±1%	±1% to ±7%	0% to ±1%	0%	±3% to ±8%	0% to ±5%	0% to ±24%
Rice yield <i>±20% of rice yield</i>	±2%	±1%	±3% to ±4%	0% to ±1%	0% to ±1%	0% to ±1%	0%	±7% to ±10%	±6% to ±29%
Farm 4									
ER cattle in barn <i>8% and 50% of total N excreted by animals</i>	0%	±3% to ±9%	±3% to ±9%	±4% to ±11%	±6% to ±7%	0% to ±1%	±8% to ±20%	0%	0%
ER manure storage <i>±20% of emission rate during storage</i>	0%	0% to ±1%	0% to ±1%	±1%	0%	0%	±1%	0%	0%
ER manure volatilization <i>10 and 30 % of N applied</i>	0%	0% to ±1%	0% to ±1%	±1% to ±5%	0% to ±1%	0%	0% to ±2%	0%	0%
R leaching <i>24 & 3% and 40 & 11% of applied N in rainfall & dry season</i>	0%	0%	0%	±3% to ±4%	0% to ±2%	0%	±1% to ±3%	0% to ±3%	0% to ±27%
Rice yield <i>±20% of rice yield</i>	0%	±2% to ±3%	±2% to ±3%	±3% to ±4%	±2% to ±3%	±1%	0%	±8% to ±9%	0% to ±16%

4. Discussion

Network analysis of these smallholder crop-livestock farms of Madagascar revealed new insights on how N inputs are used to sustain primary and animal productivity across diverse farm types. In addition to the information that can be obtained through calculating partial nutrient balances, network analysis provides insight on internal flows under the direct control by farmers and thus susceptible to improvement through appropriate management. In this sense, network analysis is not only a diagnosis tool as the nutrient balance but also a tool to explore alternative management scenarios. The results of our simulations indicate that a set of manure management practices (+manure management) could impact positively on the degree of crop-livestock integration and on the global farm N efficiency, decreasing total system N losses. These practices coupled with feed quality improvement (+{concentrate, manure management}) showed the greatest benefits for economic performance, livestock productivity (increased milk production), farmers' livelihood (increased food self-sufficiency and gross margin), and environment sustainability (decreased N losses and increase of soil N stock capacity).

4.1 N balances as indicators

While partial N balances calculated across Africa varied widely, from -70 to $140 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, full N balances ranged from -145 to $68 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, with less than 10% of cases of positive balances (Cobo et al., 2010). The difference between partial and full N balances resides in the estimation of N losses through gaseous emissions, leaching or soil erosion, and N inputs through atmospheric deposition or symbiotic N fixation, all of which are seldom measured in smallholder systems and less subject to direct control by farmers (Tittonell et al., 2006). Although most studies agree that balances are generally negative and soil nutrient depletion takes place at alarming rates (e.g., Gachimbi et al., 2005; Hailelassie et al., 2005; Nkoya et al., 2005; Van den Bosch et al., 1998), the absolute value of the N balance depends largely on the assumptions made in their calculation, and thus they are simply anecdotal. In the farms from the Madagascar highlands studied here, partial N balances calculated at farm level were all positive (80 to $246 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) across farm types, but full N balances ranged from -58 to $130 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$. This indicates that N exports from the four case study farms were generally smaller than N imports but that N losses were large (large gaps between partial N balance and full N balances), suggesting varying degrees of N conservation in the system.

N balances alone makes it difficult to compare contrasting farm system because they do not reveal the actual size of N input and N output (e.g., a balance of -10 kg year^{-1} could result from 100 kg N inputs minus 110 kg N outputs, or from 10 kg N minus 20 kg N). The positive partial N balances calculated here resulted from N imports in animal feed, particularly N input in native grass (13 to 98% of total IN), an important fertility transfer from communal grasslands on *tanety*. High farm N use efficiency could be associated with a negative full N balance; e.g., farm type 2, with the highest farm N efficiency and a negative full N balance (Table 3, Figure 1). Earlier assessments in this region of Madagascar indicated a decrease in soil N stocks per capita from wealthier to poorer farm due partly to differences in resource availability, notably land area, proportion of fodder production and manure application by wealthier farmers (Alvarez, 2012). Direct-sowing mulch based cropping systems (DMC), which may lead to reducing N losses by erosion at field scale, had little impact on the soil N balance at farm scale in our case studies due to the small areas cropped in this way. The positive impact of DMC on limiting runoff and erosion (Douzet et al., 2008 and 2010) could be noticeable if larger areas with DMC were used. But uncertainties remain: DMC practices or crop

residue mulch may have positive, negative or no effects on N losses by volatilization, denitrification and leaching (e.g., Jian-She et al., 2011; Mkhabela et al., 2008; Rochette et al., 2009; Yadvinder et al., 2005).

4.2 Network analysis indicators

The size of the N network of the farms studied here (TST from 86 to 934 kg N capita⁻¹ year⁻¹) was much larger than the estimations by Rufino et al. (2009b) on nine crop-livestock smallholder farms varying in resource endowment in Ethiopia, Zimbabwe and Kenya (TST from 10 to 130 kg N capita⁻¹ year⁻¹); as in our study, the N network size and the AMI of increased from the poorer to the wealthier farms. Dependence on external imports (D) in mixed farms of Malagasy highlands ranged from 26 to 41 % and was lower than those reported by Rufino et al. (2009b), i.e., 66 to 77%, as a result of using more resources produced on-farm, notably fodder crops. In our study, N recycled within the system represented 2.5 to 4.4%, whereas it ranged more widely from 0.9 to 11% of total system throughflow (TST) on the African systems assessed by Rufino et al. (2009b). Unlike the African cases, all our case study farms met their food requirements with energy and protein produced on farm. Only the poorest farm in our case had a food self-sufficiency ratio close to one, i.e., right at the minimum level dietary energy requirements defined by FAO for Madagascar (2008; 1760 kcal capita⁻¹ day⁻¹). Obviously not all the food produced on-farm was used for self-consumption on these market-oriented farms.

4.3 Impacts of scenarios

The N efficiency of milk production (i.e., the ratio between milk N and N intake by cows) was low and ranged from 7 to 14% and from 12 to 20% for the baseline and +concentrate scenario, respectively. The additional concentrate feed used under +concentrate and +{concentrate, manure management} was of relatively high quality (high crude protein content and digestibility). Consequently, a large part of additional feed N (74%) was transformed into N output (milk), which resulted in improving N use efficiency at livestock and at farm system level. The efficiency of conversion of N in the additional concentrate (38 g N cow⁻¹ day⁻¹) into N in additional milk (25 g N cow⁻¹ day⁻¹) was about 65 %. This agrees with Powell et al. (2010) and Saleem (1998) who proposed improving feed quality as a way to limit livestock-related N losses to improve N use efficiency. The remainder N in additional feed (26%) was excreted and recycled through improved manure management, which was better under +{concentrate, manure management} due to a reduction of N losses. The low impact of additional fertilizer supply (+mineral fertilizer) on farm N use efficiency was essentially related to N losses associated with urea application. Around 47% of the N applied in urea was lost, 15 % by volatilization and 32% by leaching (i.e., application of 200 kg urea ha⁻¹ resulted in only 49 kg N ha⁻¹ available for crop uptake. The efficiency of conversion of N taken up by plants into crop N was about 29% for paddy rice, lower than the efficiency of conversion of additional N in concentrates fed to cows. However, the ratio between additional N in rice grain and straw and additional N uptake ranged from 47 to 74%.

Despite increasing overall farm production and improving the food self-sufficiency ratios, the additional cost of using mineral N fertilizer was not offset by the additional rice yields obtained, as reflected by the changes in the gross margin. Investing in concentrate N was economically more efficient than investing in urea N. While the price obtained by farmers from selling rice and milk were 0.28 and 0.25 US\$ kg⁻¹, respectively the unitary price of urea was about 5 times greater than that of concentrate feed (0.88 *versus* 0.16 US\$ kg FM⁻¹). Calculating prices as per unit of N indicates that

purchasing N in urea comes about four times less expensive than in concentrate feed (1.9 US\$ kg N⁻¹ and 8.5 US\$ kg N⁻¹, respectively). The price of N in milk (49.8 US\$ kg N⁻¹) doubled that of N in rice grain (25.4 US\$ kg N⁻¹). At farm scale, simulated application of 200 kg urea ha⁻¹ generated a benefit of about 35 US\$ ha⁻¹ year⁻¹ from selling rice surplus (about 760 kg FM of rice grain ha⁻¹). Under the +concentrate and +{concentrate, manure management} scenarios, the direct benefit resulting from additional milk sales was 222 US\$ cow⁻¹ year⁻¹. For farm type 3, for example, the total direct benefit from additional rice sales under +mineral fertilizer was 96 US\$ year⁻¹ while that from milk sales under +concentrate was 1330 US\$ year⁻¹. Indirect effects and feedbacks (e.g., improvement of the quality and quantity of manure which led to increasing forage and cash-crop yields) enhanced the economic differences between scenario +mineral fertilizer and scenarios +concentrate and +{concentrate, manure management}. Additional N input generated on average 38.2 and 44.1 US\$ kg N⁻¹ under +concentrate and +{concentrate, manure management}, and only 0.5 US\$ kg N⁻¹ under +mineral fertilizer.

Improving N conservation (+manure management), which was the least expensive of the scenarios simulated here may be already a first step for farm profitability improvement. Across scenarios, the agricultural gross margin was sensitive to changes in feed supplementation (Table 3). On farm type 3, for example, purchasing concentrate feeds under +concentrate allowed doubling milk sales and the additional income from milk was about 3.8 times larger than the baseline gross margin. It is apparently more attractive for local smallholders to invest in dairy intensification than in mineral fertilisers for rice. Such investments are however often limited by lack of liquidity, or just because smallholder households cannot afford to wait for the return on investment through milk sales while still having to meet other household needs for cash. The cost of credit, which is nowadays in the order of 3% per month over a period of 36 months, is often prohibitive for smallholders. On the other hand, the relative advantage of dairy compared to rice farming is determined by the currently favourable concentrate-to-milk price ratios. In 2009, the economic crisis of Madagascar and the disruption of the dairy sector due to the closing of the main dairy processing industry in the country revealed the fragility of the Malagasy dairy sector. Milk prices decreased from an average of 0.31 US\$ per litre to about 0.05 US\$ per litre in a few weeks, and smallholder farms were forced to decrease dairy production to reduce costs (no concentrate supplementation and/or animals' sales) until prices recovered sufficiently. The wealthiest farmers (case of farm type 1) could resist such price fluctuations through on-farm milk processing.

The analyses done in this study relied on a number of crucial assumptions. While average values were used for N contents in different materials, Mulier et al. (2003) reported that up to 10% error on nutrient contents in manure, plant products and concentrate feed are common, even when using accurate chemical analysis for their determination. The physiological limits for plant and animal production are far from being reached in these smallholder rice and dairy systems (Tsujiimoto et al., 2009). Biological responses to additional N supply were thus simulated as linear. Long-term interactions between the livestock and the cropping systems were not simulated, as for example long-term organic matter accumulation in soils induced by manure application. A way to improve our analysis could be the dynamic simulation of biophysical feedbacks within the farming system over time, taking into account non-linearity and long-term effects.

Conclusion

Although the size of the N network and the overall productivity of smallholder crop-livestock farms in the highlands of Madagascar increased with farm resource endowment, all case study farms analysed here presented a high level of self-sufficiency (<1% of total N imports in food) and a positive partial N balance at farm scale. Positive partial N balances were associated with large animal feed imports, especially native grass imports from communal grazing areas. Animal production generated the main part of the total farm income in all case studies, and the specialized dairy system exhibited the highest production cost. Simulations indicated that small improvements in manure management can have a positive impact on the agricultural gross margin, up to twice the gross margin of the baseline. Improving manure management led to reduced N losses, and to increased crop-livestock integration and global farm N efficiency. Increasing the use of mineral N fertilisers on rice led to greater food production but increased total N losses, and was less profitable and N-efficient than increasing the supply of concentrate feeds to dairy cattle. The latter combined with improving manure management practices showed the greatest simulated impact on milk productivity, livelihoods and environment sustainability. In a context of data scarcity, network analysis proved to be a useful approach to explore ways to improve whole-farm N cycling and use efficiency under smallholder conditions, thereby enhancing farm profitability.

References

- Alvarez, S., Tittonell, P., Tillard, E., Albrecht, A., Scopel, E., and Bocquier, F., 2012. Inherent and farmer-induced soil variability in smallholder crop-livestock systems in the highlands of Madagascar. *Agric. Ecosyst. Environ.* (submitted).
- Amin, R., Zia, M.S., and Akhtar, A., 1992. Wheat response to zinc and copper fertilization at Swat. *Pakistan J. Agric. Res.* 13, 221-226.
- Andrieu, J., Demarquilly, C., and Sauvant, D., 1988. Tables de la valeur nutritive des aliments. In: Jarrige, R. (Ed.), *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. INRA, Paris, France, pp. 351-443.
- Bouwman, A.F. and Van der Hoek, K.W., 1997. Scenarios of animal waste production and fertilizer use and associated ammonia emission for the developing countries. *Atmos. Environ.* 31, 4095-4102.
- Bouwman, A.F., Beusen, A.H.W., Van der Hoek, K.W., Asman, W.A.H., and Van Drecht, G., 2006. Global Inventory of Ammonia Emissions from Global Livestock Production and Fertilizer Use. In: Aneja, V.P., Schlesinger, W.H., Knighton, R., Jennings, G., Niyogi, D., Gilliam, W., and Duke, C.S. (Eds.), *Workshop on Agricultural Air Quality: State of the Science*. 5-8 June 2006, pp. 180-185.
- Braun, A. R., Smaling, E. M. M., Muchugu, E. I., Shepherd, K. D., and Corbett, J. D., 1997. Maintenance and improvement of soil productivity in the highlands of Ethiopia, Kenya, Madagascar and Uganda., *African Highlands Initiative (AHI) Technical Report Series no.6*. African Highlands Initiative AHI Coordinating Office, ICRAF, Nairobi, Kenya, 149 p.
- Campiglia, E., Mancinelli, R., and Radicetti, E., 2011. Influence of no-tillage and organic mulching on tomato (*Solanum Lycopersicum L.*) production and nitrogen use in the mediterranean environment of central Italy. *Sci. Hortic.* 130, 588-598.
- Cobo, J.G., Dercon, G., and Cadisch, G., 2010. Nutrient balances in African land use systems across different spatial scales: A review of approaches, challenges and progress. *Agric. Ecosyst. Environ.* 136, 1-15.
- Dourmad, J.Y., Guingand, N., Latimier, P., and Sève, B., 1999. Nitrogen and phosphorus consumption, utilisation and losses in pig production: France. *Livest. Prod. Sci.* 58, 199-211.
- Douzet, J.M., Muller, B., Scopel, E., Albrecht, A., Rakotoarisoa, J., and Rakotoalibera, M.H., 2008. Réduction du ruissellement et de l'érosion par les systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale pour les cultures pluviales des hautes terres malgaches. *Terre malgache*, 99-103.
- Douzet, J.M., Scopel, E., Muller, B., Rakotoarisoa, J., Albrecht, A., and Drazafindramanana, N.C., 2010. Effects of direct seeding mulch-based cropping systems on water runoff and erosion under rainfed conditions in the highlands of Madagascar. *Étude et Gestion des Sols* 17, 131-140.
- DTU Food, 2012. Danish Food Composition Databank - Ed. 7.01 . <http://www.foodcomp.dk>
- FAO, 1983. Utilisation rationnelle du charbon de bois. *Techniques simples de carbonisation*, 41 ed. FAO, Rome, Italy, 152 p.
- FAO, 2008. FAO methodology for the measurement of food deprivation: Updating the minimum dietary energy requirements. FAO Statistics Division, Roma, Italy
- FAO, 2010. FAO Hunger Map 2010: Prevalence of undernourishment in developing countries. www.fao.org/hunger
- FAO, 2012a. FAOSTAT. <http://faostat.fao.org/default.aspx>

FAO, 2012b. Animal Feed Resources Information System (AFRIS). FAO, Rome, Italy. <http://www.fao.org/ag/AGA/AGAP/FRG/AFRIS/>

FAO/IFA, 2001. Global estimates of gaseous emissions of NH₃, NO and N₂O from agricultural land. FAO, Rome, Italy.

Feedbase, 2012. Economic and technical feed data. <http://www.feedbase.com>

Fernandez-Rivera, S., Williams, T.O., Hiernaux, P., and Powell, J.M., 1995. Faecal excretion by ruminants and manure availability for crop production in semi arid West Africa. In: Powell, J.M., Fernandez-Rivera, S., Williams, T.O., and Renard, C. (Eds.), *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of Sub-Saharan Africa Volume II: Technical Papers*. Proceedings of an International Conference held in Addis Ababa, Ethiopia, 22-26 November 1993 ILCA, Addis Ababa, Ethiopia, pp. 149-170.

Gachimbi, L.N., Keulen, H.V., Thurairaja, E.G., Karuku, A.M., Jager, A.d., Ngululu, S., Ikombi, B.M., Kinama, J.M., Itabari, J.K., and Nandwa, S.M., 2005. Nutrient balances at farm level in Machakos (Kenya), using a participatory nutrient monitoring (NUTMON) approach. *Land Use Policy* 22, 13-22.

GSDM, TAFA, and FIFAMANOR, 2008. Guide pour les Hautes Terres de Madagascar. Conduite des systèmes de culture sur couverts végétaux et affouragement des vaches laitières. GSDM - TAFA - FIFAMANOR, Antsirabe.

Hailelassie, A., Priess, J., Veldkamp, E., Teketay, D., and Lesschen, J.P., 2005. Assessment of soil nutrient depletion and its spatial variability on smallholders mixed farming systems in Ethiopia using partial versus full nutrient balances. *Agric. Ecosyst. Environ.* 108, 1-16.

Hoden, A., Coulon, J.B., and Favardin, P., 1988. Alimentation des vaches laitières. In: Jarrige, R. (Ed.), *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. INRA Editions, Paris, pp. 135-158.

Husson, O., Charpentier, H., Naudin, K., Moussa, N., Michellon, R., Andrianasolo, H., Razanamparany, C., Rakotoarinivo Rakotondramanana, C., Enjalric, F., and Séguy, L., 2009. Manuel pratique du semis direct à Madagascar. Volume II. Chapitre 2. Le choix des itinéraires techniques. 76 p.

Imbeah, M., 1998. Composting piggery waste: A review. *Bioresour.Technol.* 63, 197-203.

INRA, 1989. Tables de composition des matières premières. In: Quæ (Ed.), *Alimentation des animaux monogastriques*. INRA, Paris, France, pp. 163-239.

Jalil, A. and Ghani, C.A., 1982. Yield and quality of barley as affected by different doses of urea. *Pakistan J. Agric. Res.* 3, 26-30.

Jian-She, Z., Fu-Ping, Z., Jin-Hua, Y., Jin-Ping, W., Ming-Li, C., Li, C.F., and Cao, C.G., 2011. Emissions of N₂O and NH₃, and nitrogen leaching from direct seeded rice under different tillage practices in central China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 140, 164-173.

Karue, C.N., Evans, J.L., and Tillman, A.D., 1973. Voluntary Intake of Dry Matter by African Zebu Cattle. Quality of Feed and the Reference Base. *J. Anim. Sci.* 36, 1181-1185.

Küstermann, B., Christen, O., and Hülsbergen, K.-J., 2010. Modelling nitrogen cycles of farming systems as basis of site- and farm-specific nitrogen management. *Agric. Ecosyst. Environ.* 135, 70-80.

Liu, J., You, L., Amini, M., Obersteiner, M., Herrero, M., Zehnder, A.J.B., and Yang, H., 2010. A high-resolution assessment on global nitrogen flows in cropland. *PNAS* 107, 8035-8040.

- Malinowski, B., 2003. The subject, method and scope of this inquiry. In: Routledge (Ed.), *Argonauts of the Western Pacific: An Account of Native Enterprise and Adventure in the Archipelagoes of Melanesian New Guinea (1922)*, 11th ed. Taylor and Francis, pp. 1-20.
- Meisinger, J.J. and Jokela, W.E., 2000. Ammonia Volatilization from Dairy and Poultry Manure. In: NRAES (Ed.), *Proc. Conf. Managing Nutrients and Pathogens from Animal Agriculture, USA, NE Region Agr. Eng. Serv.* 130, pp. 334-354.
- Mkhabela, M.S., Madani, A., Gordon, R., Burton, D., Cudmore, D., Elmi, A., and Hart, W., 2008. Gaseous and leaching nitrogen losses from no-tillage and conventional tillage systems following surface application of cattle manure. *Soil Tillage Res.* 98, 187-199.
- Möller, K. and Stinner, W., 2009. Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides). *Eur. J. Agron.* 30, 1-16.
- Mulier, A., Hofman, G., Baecke, E., Carlier, L., De Brabander, D., De Groote, G., De Wilde, R., Fiems, L., Janssens, G., Van Cleemput, O., Van Herck, A., Van Huylenbroeck, G., and Verbruggen, I., 2003. A methodology for the calculation of farm level nitrogen and phosphorus balances in Flemish agriculture. *Eur. J. Agron.* 20, 45-51.
- Nkonya, E., Kaizzi, C., and Pender, J., 2005. Determinants of nutrient balances in a maize farming system in eastern Uganda. *Agric. Syst.* 85, 155-182.
- Nyssen, J., Poesen, J., and Deckers, J., 2009. Land degradation and soil and water conservation in tropical highlands. *Soil Tillage Res.* 103, 197-202.
- Pastor-Villegas, J., Pastor-Valle, J.F., Rodriguez, J.M.M., and Garcia, M.G., 2006. Study of commercial wood charcoals for the preparation of carbon adsorbents. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 76, 103-108.
- Petit, M., 1988. Alimentation des vaches allaitantes. In: Jarrige, R. (Ed.), *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. INRA Editions, Paris, pp. 158-184.
- Place, F., Barrett, C.B., Freeman, H.A., Ramisch, J.J., and Vanlauwe, B., 2003. Prospects for integrated soil fertility management using organic and inorganic inputs: evidence from smallholder African agricultural systems. *Food Policy* 28, 365-378.
- Powell, J.M., Gourley, C.J.P., Rotz, C.A., and Weaver, D.M., 2010. Nitrogen use efficiency: A potential performance indicator and policy tool for dairy farms. *Environ. Sci. Policy* 13, 217-228.
- Rakoto Ramiarantsoa, H., 1995. *Chair de la terre, oeil de l'eau... Paysanneries et recompositions de campagnes en Imerina (Madagascar)*. Editions de l'Orstom, Paris, 370 p.
- Rochette, P., Angers, D.A., Chantigny, M.H., MacDonald, J.D., Bissonnette, N., and Bertrand, N., 2009. Ammonia volatilization following surface application of urea to tilled and no-till soils: A laboratory comparison. *Soil Tillage Res.* 103, 310-315.
- Rotz, C.A., 2004. Management to reduce nitrogen losses in animal production. *J. Anim. Sci.* 82, 119-137.
- Rufino, M.C., Tittonell, P., van Wijk, M.T., Castellanos-Navarrete, A., Delve, R.J., de Ridder, N., and Giller, K.E., 2007. Manure as a key resource within smallholder farming systems: Analysing farm-scale nutrient cycling efficiencies with the NUANCES framework. *Livest. Sci.* 112, 273-287.
- Rufino, M.C., Hengsdijk, H., and Verhagen, A., 2009a. Analysing integration and diversity in agro-ecosystems by using indicators of network analysis. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 84, 229-247.

- Rufino, M.C., Tiftonell, P.A., Reidsma, P., López-Ridaura, S., Hengsdijk, H., Giller, K.E., and Verhagen, A., 2009b. Network analysis of N flows and food self-sufficiency - a comparative study of crop-livestock systems of the highlands of East and southern Africa. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 85, 169-186.
- Rufino, M.C., Rowe, E.C., Delve, R.J., and Giller, K.E., 2006. Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop-livestock systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 112, 261-282.
- Saleem, M., 1998. Nutrient balance patterns in African livestock systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 71, 241-254.
- Schouw, N.L., Danteravanich, S., Mosbaek, H., and Tjell, J.C., 2002. Composition of human excreta -- a case study from Southern Thailand. *Sci.Total Environ.* 286, 155-166.
- Shapouri, S., Rosen, S., Peters, M., Baquedano, F., and Allen, S., 2010. Food security assessment, 2010-20. USDA, Washington.
- Sheldrick, W., Keith Syers, J., and Lingard, J., 2003. Contribution of livestock excreta to nutrient balances. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 66, 119-131.
- Smith, E., Gordon, R., Bourque, C., Campbell, A., Gqnermont, S., Rochette, P., and Mkhabela, M., 2009. Simulated management effects on ammonia emissions from field applied manure. *J. Environ. Manage.* 90, 2531-2536.
- Sommer, S.G., Schjoerring, J.K., and Denmead, O.T., 2004. Ammonia Emission from Mineral Fertilizers and Fertilized Crops. *Adv. Agron.* 82, 557-622.
- Stoorvogel, J. J. and Smaling, E. M. A., 1990. Assessment of soil nutrient depletion in sub-Sahara Africa: 1983-2000., Volume II. Nutrient balances per crop and per Land Use System., 4 ed. Soil and Water Research, Wageningen, The Netherlands, 158 p.
- Tiftonell, P., Vanlauwe, B., Leffelaar, P.A., Shepherd, K.D., and Giller, K.E., 2005. Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya: II. Within-farm variability in resource allocation, nutrient flows and soil fertility status. *Agric. Ecosyst. Environ.* 110, 166-184.
- Tiftonell, P., Leffelaar, P.A., Vanlauwe, B., van Wijk, M.T., and Giller, K.E., 2006. Exploring diversity of crop and soil management within smallholder African farms: A dynamic model for simulation of N balances and use efficiencies at field scale. *Agric.Syst.* 91, 71-101.
- Tiftonell, P., Scopel, E., Andrieu, N., Posthumus, H., Mapfumo, P., Corbeels, M., van Halsema, G.E., Lahmar, R., Lugandu, S., Rakotoarisoa, J., Mtambanengwe, F., Pound, B., Chikowo, R., Naudin, K., Triomphe, B., and Mkomwa, S., 2012. Agroecology-based aggradation-conservation agriculture (ABACO): Targeting innovations to combat soil degradation and food insecurity in semi-arid Africa. *Field Crop Res.* 132, 168-174.
- Tran, Hiep, 2009. Qualification en Spectrométrie dans le Proche Infrarouge (SPIR) de l'azote et des fibres des ressources alimentaires et de leur utilisation digestive par le bétail laitier en milieu tropicaux (Réunion - Vietman). Université de la Réunion, Saint Denis (La Réunion), France, 163 p.
- Troccon, J.L., Berge, Ph., and Agabriel, J., 1988. Alimentation des veaux et génisses d'élevage. In: Jarrige, R. (Ed.), Alimentation des bovins, ovins et caprins. INRA Editions, Paris, pp. 201-212.
- Tsujimoto, Y., Horie, T., Randriamihary, H., Shiraiwa, T., and Homma, K., 2009. Soil management: The key factors for higher productivity in the fields utilizing the system of rice intensification (SRI) in the central highland of Madagascar. *Agric. Syst.* 100, 61-71.

USDA Nutrient Data Laboratory, 2012. National Nutrient Database for Standard Reference. <http://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/list>

Van Beek, C., Onduro, D., Gachimbi, L., and de Jager, A., 2009. Farm nitrogen flows of four farmer field schools in Kenya. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 83, 63-72.

Van den Bosch, H., Gitari, J.N., Ogaro, V.N., Maobe, S., and Vlaming, J., 1998. Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON): III. Monitoring nutrient flows and balances in three districts in Kenya. *Agric. Ecosyst. Environ.* 71, 63-80.

Vayssières, J. and Rufino, M.C., 2012. Managing nutrient cycles in crop and livestock systems with green technologies. In: Boye, J.I. and Arcand, Y. (Eds.), *Green Technologies in Food Production and Processing*. Springer New York, New York, USA, pp. 151-182.

World Bank, 2012. Data World Bank. <http://data.worldbank.org/indicator>

Yadvinder, S., Bijay, S., and Timsina, J., 2005. Crop Residue Management for Nutrient Cycling and Improving Soil Productivity in Rice-Based Cropping Systems in the Tropics. *Adv. Agron.* 85, 269-407.

Conclusion du chapitre 4

Cette étude a montré que la taille du réseau d'azote et la productivité globale des exploitations familiales d'agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar augmentent avec la taille de leur structure. Les quatre cas d'étude semblent autosuffisants d'un point de vue alimentaire (i.e. FSS ≥ 1) et ils ont des bilans partiels d'azote positifs à échelle de l'exploitation. Ces bilans partiels d'azote positifs sont associés à d'importantes importations d'aliments pour l'élevage, et en particulier des importations de végétaux provenant de terres communales. L'exploitation avec le système laitier le plus spécialisé est aussi soumise aux coûts de production les plus élevés. Les simulations ont indiqué qu'une légère amélioration de la gestion des effluents peut conduire à une réduction des pertes d'azote et à l'augmentation de l'intégration agriculture-élevage et de la marge brute agricole. L'augmentation de l'utilisation des engrais minéraux azotés pour la culture du riz a conduit à une augmentation de la production alimentaire, mais aussi à celle des pertes totales d'azote. Ce scénario s'est révélé moins rentable que l'augmentation de l'achat de concentrés pour l'alimentation des vaches laitières. L'augmentation de la complémentation associée à l'amélioration des pratiques de gestion des effluents ont montré les meilleurs résultats en termes d'autosuffisance alimentaire, de revenu agricole et de durabilité environnementale. Par ailleurs, l'utilisation de modèles de simulation non-linéaires et pluriannuels pourrait permettre l'amélioration de cette étude. Cependant, dans un contexte peu documenté comme celui des hauts plateaux de Madagascar, le développement d'outil de simulation s'appuyant sur le Network Analysis, s'est avéré être une approche utile pour explorer des options d'amélioration de la durabilité des exploitations d'agriculture-élevage.

Chapitre 5 :

Discussion générale

Discussion générale

L'objectif principal de ce travail de thèse était de montrer que la diversité des pratiques de gestion de la biomasse au sein des exploitations familiales d'agriculture-élevage de la région du Vakinankaratra à Madagascar conditionnait la durabilité des systèmes d'exploitation, en agissant sur la fertilité des sols et le recyclage des éléments nutritifs et en améliorant le revenu de l'exploitation et sa sécurité alimentaire.

Nous aborderons dans la discussion les quatre hypothèses que ce travail se proposait d'analyser :

- (1) les objectifs de production et les stratégies des exploitants du Vakinankaratra induisent une diversité des pratiques de gestion de la biomasse au sein des exploitations d'agriculture-élevage ;
- (2) l'accès aux intrants, tels que les engrais minéraux, étant généralement limité, l'élevage bovin joue un rôle primordial dans le maintien ou la restauration de la fertilité des sols par le recyclage des fumiers. Toutefois, les pratiques de gestion de ces matières organiques peuvent accentuer l'hétérogénéité de la fertilité des sols ;
- (3) l'analyse des flux d'azote et du bilan azoté au sein de l'exploitation génèrent des indicateurs utiles pour évaluer le rôle de l'élevage dans le recyclage des éléments nutritifs ;
- (4) la méthode du « Network Analysis » (Rufino et al., 2009) permet d'évaluer l'impact de changements dans la gestion de la biomasse sur l'efficacité azotée, la productivité et la rentabilité économique de l'exploitation.

Le travail de collecte et d'analyse des informations mené dans les exploitations a permis d'améliorer significativement les connaissances sur les pratiques de gestion de la biomasse et la durabilité des exploitations familiales d'agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar. Nous reviendrons sur la diversité des pratiques de gestion de la biomasse (Hypothèse 1), le lien entre les pratiques de gestion de la biomasse et les indicateurs de durabilité environnementale (Hypothèses 2 et 3) et le lien entre les pratiques de gestion de la biomasse et les indicateurs de durabilité socio-économique (Hypothèse 4). Ce travail a également permis d'identifier certaines limites méthodologiques, liées à la faible disponibilité des données et au contexte d'agriculture familiale. Il permet néanmoins de dresser certaines perspectives encourageantes sur l'amélioration de l'outil d'analyse développé et sur la valorisation possible des résultats.

1 Relations entre les pratiques de gestion de la biomasse et la durabilité des exploitations familiales d'agriculture-élevage

1.1 Diversité des exploitations d'agriculture-élevage et pratiques de gestion de la biomasse

Dans un premier temps nous avons caractérisé les exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra par une étude typologique et décrit le fonctionnement et les pratiques de gestion pour quatre exploitations types (Chapitre 2). Cette phase a impliqué un travail d'analyses statistiques, d'enquêtes par immersion et de synthèse.

La typologie des exploitations d'agriculture-élevage a révélé l'existence de cinq types d'exploitations, distincts par leur structure et/ou leurs pratiques de cultures et d'élevage. Ces cinq types d'exploitations d'agriculture-élevage se différencient en particulier par la taille du troupeau laitier

(grand vs très réduit), la race majoritaire du troupeau (européenne vs zébu), le mode d'alimentation (fourrages distribués à volonté vs alimentation au pâturage), les cultures fourragères (prédominantes sur tanety et cultivées bas-fond vs non prédominantes sur tanety et absentes sur bas-fond) et le niveau de diversification de l'élevage (élevage de volailles et/ou de porcs). Ainsi, les composantes de l'élevage se sont avérées être les principales clés de détermination des différents types d'exploitations d'agriculture-élevage, les pratiques culturales ne se distinguant que par l'importance des cultures fourragères.

Les enquêtes par immersion dans quatre exploitations types ont permis de rassembler des connaissances précises sur l'agriculture familiale malgache concernant les objectifs et les pratiques des exploitants, et le fonctionnement des systèmes d'exploitation (Chapitre 2). Ces informations ont permis de confirmer l'Hypothèse 1 : pour les quatre cas étudiés, les exploitations ayant pour objectif une augmentation de la production laitière s'orientent vers une alimentation à base de fourrages cultivés, en saison humide et sèche, et l'utilisation de compléments. La diversification de l'élevage s'accompagne de l'augmentation des surfaces cultivées en patate douce pour l'alimentation des porcs. La diversification du revenu de l'exploitation par des cultures de rentes se traduit par une fertilisation ciblée de ces parcelles cultivées en contre-saison (Tableau 1).

Tableau 1 : Rappel des principaux objectifs des exploitations familiales d'agriculture-élevage et des pratiques d'alimentation de l'élevage bovin laitier, de gestion des effluents et de fertilisation.

Expl.	Objectifs	Pratiques de gestion de la biomasse
1	<p><i>Croissance :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> augmenter taille troupeau lait augmenter production laitière augmenter surfaces agricoles augmenter élevage porcin 	<p><i>Alimentation :</i> provende + drèche (laitier et porcin) ; fourrages cultivés (toute l'année) ; résidus de culture ; pas d'utilisation de <i>bozaka</i></p> <p><i>Gestion des effluents :</i> litière (fine) de <i>bozaka</i> sur sol bétonné ; retrait fréquent et stockage en tas à l'air libre</p> <p><i>Fertilisation :</i> important épandage sur cultures fourragères</p>
2	<p><i>Diversification :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> augmenter élevage porcin augmenter activité off-farm augmenter surfaces agricoles 	<p><i>Alimentation :</i> drèche + patate douce ; <i>bozaka</i> ; fourrages cultivés (toute l'année) ; résidus de culture</p> <p><i>Gestion des effluents :</i> litière de <i>bozaka</i> sur sol dallé ; retrait fréquent et stockage en tas à l'air libre</p> <p><i>Fertilisation :</i> priorité aux cultures de rente et fourragères en contre-saison. Pratique SCV sur riz pluvial</p>
3	<p><i>Amélioration et diversification :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> augmenter production laitière augmenter qualité laitière augmenter surfaces agricoles 	<p><i>Alimentation :</i> provende + drèche ; fourrages cultivés (toute l'année) ; <i>bozaka</i> ; résidus de culture</p> <p><i>Gestion des effluents :</i> litière de aliments refusés + paille de riz sur sol dallé ; retrait fréquent et stockage en tas à l'air libre</p> <p><i>Fertilisation :</i> priorité aux cultures de rente et fourragères en contre-saison</p>
4	<p><i>Subsistance :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> conserver surfaces agricoles augmenter élevage porcin diminuer élevage laitier 	<p><i>Alimentation :</i> <i>bozaka</i>, résidus de culture, patate douce ; fourrages (saison humide)</p> <p><i>Gestion des effluents :</i> litière d'aliments refusés + paille de riz, retrait 2-3 fois par semaine, stockage en tas à l'air libre, compostage avec <i>bozaka</i>, vente du fumier</p> <p><i>Fertilisation :</i> priorité au maïs et pomme de terre (poquet). Pratique SCV sur maïs</p>

Alim : alimentation ; Efl : gestion des effluents ; Fert : fertilisation/amendement

1.2 Pratiques de gestion de la biomasse et durabilité environnementale des exploitations familiales d'agriculture-élevage

La durabilité environnementale a d'abord été caractérisée par des indicateurs de l'état de fertilité des sols (en particulier C, N, P, pH) des exploitations d'agriculture-élevage (Chapitre 3). La quantification des flux d'azote au sein des exploitations (Chapitre 4) a permis dans un second temps

de vérifier le rôle de l'animal dans le maintien de la fertilité des sols (Hypothèse 2) et de calculer divers indicateurs environnementaux. Les indicateurs environnementaux calculés sont : bilans azotés du sol, bilans azotés à l'échelle de l'exploitation, efficacité azotée globale, niveau de recyclage de l'azote (TSTc), degré d'intégration des flux (FCI), diversité des flux (H_R) et leur degré d'organisation (AMI). Ces derniers (TSTc, FCI, H_R et AMI) sont issus de la méthode du Network Analysis (NA) et permettent d'évaluer la « Résilience, la fiabilité et l'adaptabilité » des systèmes d'exploitations (Tableau 3 du Chapitre 1).

La détermination des flux d'azote au sein des exploitations a été indispensable pour une analyse fine des indicateurs environnementaux et en particulier la quantification du recyclage de l'azote au sein des exploitations (Hypothèse 3). En effet, les bilans azotés partiels et l'efficacité azotée globale sont utiles et fréquemment utilisés pour comparer des systèmes d'exploitation. Cependant, ils ne permettent pas toujours d'interpréter à eux seuls les différences observées. Ainsi un bilan azoté partiel positif peut correspondre à un système agricole présentant des niveaux d'intrants et de production faibles ou bien élevés mais avec dans les deux cas des sorties d'azote inférieures aux entrées d'azote. De même, une efficacité d'azote élevée peut correspondre à un système agricole qui exploite de façon « minière » sa ressource sol (i.e. utilise peu d'intrants) et/ou exporte une partie importante de sa production (déstockage d'animaux ou de grains). La connaissance des flux d'azote internes à l'exploitation est donc essentielle à l'interprétation de ces indicateurs.

Des changements dans les pratiques d'alimentation des vaches laitières (augmentation ou utilisation de concentrés), dans la gestion des effluents d'élevage (couverture du fumier lors du stockage et enfouissement rapide) et la gestion de la fertilisation (application d'urée sur le riz) ont été simulés. Ces changements de pratiques se sont traduits par des variations dans les flux d'azote, lesquelles ont été intégrées dans les matrices utilisées dans le NA pour calculer l'impact de ces changements sur les indicateurs de durabilité environnementale (Hypothèse 4).

La caractérisation de l'état de la fertilité des sols des exploitations familiales a révélé des sols hétérogènes, relativement plus riches en carbone organique (en moyenne 27 g.kg^{-1}) et en azote total (en moyenne $1,9 \text{ g.kg}^{-1}$) que certains sols étudiés au Kenya, au Zimbabwe, en Ouganda, au Mali et au Burkina Faso (Tableau 2). Cependant, tout comme la plupart des pays africains (Liu et al., 2010), les exploitations familiales ont des bilans azotés du sol négatifs (Chapitre 4). Ces pertes d'azote au niveau du sol révèlent une « exploitation minière » de la ressource sol, semblable à celles décrites dans d'autres exploitations familiales africaines (Esilaba et al., 2005 ; De Jager et al., 2001 ; Nkonya et al., 2005 ; Sheldrick et Lingard, 2004 ; Stoorvogel and Smaling, 1990). Toutefois, bien que tous les bilans azotés du sol soient négatifs dans notre étude, certaines exploitations présentent des bilans complets d'azote positifs à l'échelle de l'exploitation (Chapitre 4). Ces résultats sont liés à la présence en même temps d'activités d'élevage et de cultures au sein des exploitations, ce qui permet d'augmenter le stock d'azote via la constitution et l'accroissement d'un troupeau (ici des bovins). Ainsi, les importations d'aliments pour l'élevage (*bozaka* extérieur et/ou compléments) contribuent à rendre les bilans complets d'azote positifs mais ne suffisent pas à combler (via les fumiers) les exportations d'azote du sol. Ces bilans complets d'azote, reflétant l'accroissement du troupeau bovin, sont pour cette raison davantage sensibles aux mouvements des animaux (ventes et achats) qu'aux flux d'azote du sol.

Tableau 2 : Comparaison des teneurs de carbone (C) organique et azote (N) total du sol pour les exploitations des hauts plateaux malgaches et celles de certains pays d'Afrique

Pays	C organique du sol $g.kg^{-1}$	N total du sol $g.kg^{-1}$	Référence
<i>Madagascar</i>	2-60	0.1-4.2	Alvarez et al., 2012 (Chapitre 3)
<i>Kenya</i>	1-24	0.1-2.4	Braun et al., 1997 ; Sanchez et al., 2003 ; Tiftonnell et al., 2005 ; Tiftonnell et al., 2007
<i>Zimbabwe</i>	2-15	0.1-1	Zingore et al., 2007b
<i>Uganda</i>	13-44	1-3.5	Braun et al., 1997
<i>Mali</i>	2-3	0.1-0.3	Samaké et al., 2005
<i>Burkina Faso</i>	2-22	0.2-1.8	Bationo et al., 2007

Par ailleurs, les pertes d'azote du sol (volatilisation, érosion, lixiviation) restent généralement inférieures ou égales aux pertes d'azote durant le stockage du fumier ; respectivement 5-26% et 22-75% de l'ensemble des pertes (Chapitre 4). L'amélioration de la gestion des effluents d'élevage et en particulier du stockage du fumier, se révèle donc être la clé pour une efficacité azotée accrue des exploitations d'agriculture-élevage (diminution importante des pertes d'azote, conservation et recyclage de la ressource fumier). Les simulations d'une amélioration des pratiques de gestion des effluents (stockage du fumier et épandage) ont montré une augmentation de la capacité du stock d'azote du sol et du niveau de recyclage des exploitations (Chapitre 4). De plus, dans deux cas sur quatre, l'amélioration simulée des pratiques de stockage et d'épandage du fumier a eu un impact positif plus important ou similaire sur le stock d'azote du sol que celui d'une augmentation de la fertilisation minérale. L'amélioration des pratiques de gestion des effluents d'élevage permet de réduire une grande part des pertes d'azote dans les systèmes d'exploitation, tandis que la fertilisation minérale s'accompagne dans tous les cas d'une augmentation des pertes d'azote aux champs par émission, lixiviation et érosion. Rufino (2008) insiste sur l'importance du contrôle des pertes d'éléments nutritifs dès les premières étapes de la gestion des effluents d'élevage, i.e. dès l'excrétion animale et jusqu'à la mise en stock. En effet, l'exploitation 4 est celle qui a les taux de pertes d'azote les plus forts au niveau de l'étable ; une part importante de l'azote étant déjà perdue, peu d'azote pourra alors être économisé par l'amélioration des pratiques du stockage et de l'épandage du fumier. Cette exploitation présente donc l'impact le plus réduit sur le stock d'azote du sol (+ 3%) suite à l'amélioration des pratiques du stockage et de l'épandage du fumier.

Les pertes d'azote au cours des différentes étapes de transfert, depuis l'animal jusqu'à la parcelle, pourraient être en partie compensées par une amélioration des pratiques d'alimentation (i.e. augmentation de la complémentation). L'amélioration de la qualité de l'alimentation animale (plus de protéines, meilleure digestibilité) avait été décrite comme favorisant une augmentation de l'efficacité azotée des exploitations (Oenema, 2006; Powell et al. 2010; Saleem, 1998). Dans notre étude, l'augmentation de la complémentation n'a montré à elle-seule qu'une légère augmentation de l'efficacité azotée des exploitations (Chapitre 4). Cependant, ces pratiques de complémentation associées à l'amélioration des pratiques de gestion des effluents, se sont révélées être les plus efficaces en terme d'utilisation de l'azote à l'échelle globale de l'exploitation. Ainsi, le rôle de l'élevage dans le maintien de la fertilité du sol via l'amélioration du recyclage des éléments nutritifs peut être assuré par des pratiques de gestion des effluents limitant les pertes d'azote et amplifié par une amélioration de la qualité de l'alimentation (Hypothèse 2).

Pour l'ensemble des exploitations, des bilans azotés du sol différents ont été observés pour chaque type de cultures (Figure 1). Les cultures de riz ont un bilan d'azote négatif alors que les cultures de contre-saison (cultures de rente ou fourrages tempérés) montrent un bilan d'azote systématiquement positif. Ce résultat peut s'expliquer par les apports ciblés de fertilisants organiques et minéraux aux cultures de rentes et aux fourrages de contre-saison (Chapitre 1). De même, à l'échelle parcellaire, les pratiques de semis direct sous couverture végétale (SCV), l'absence de culture (e.g. bois, friches), et une fertilisation organique intense ont montré des effets positifs significatifs sur la teneur en carbone organique et en azote total du sol. Inversement, les parcelles de rizières (avec ou sans culture de contre saison) présentent des teneurs en carbone organique et en azote total du sol significativement inférieures aux parcelles de *tanety* (Chapitre 2). Ainsi, ces pratiques (fertilisations ciblées, SCV, absence de culture, culture de riz) induisent une hétérogénéité entre les parcelles d'une même exploitation (en termes de teneur en azote total et en carbone organique du sol), amplifiant alors l'hétérogénéité intrinsèque (Hypothèse 2). Or, la teneur en matière organique du sol est un indicateur à long terme de la durabilité environnementale (Schiere et al., 2002).

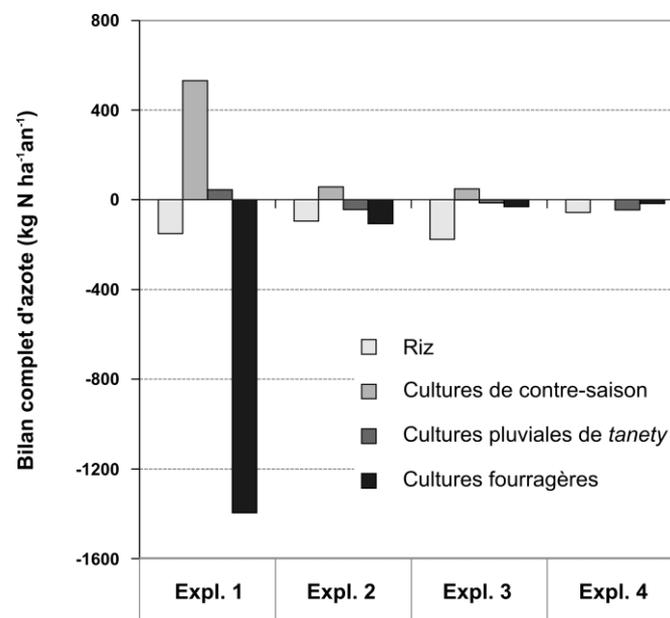


Figure 1 : Bilans azotés du sol par types de cultures (riz, cultures de contre-saison, cultures sur *tanety*, cultures fourragères sur *tanety*) pour les quatre exploitations d'agriculture-élevage étudiées (Expl. : Exploitation)

Cependant, les effets positifs de ces pratiques sur les teneurs en azote du sol sont estompés à l'échelle de l'exploitation (bilan azoté du sol négatif). Ceci pourrait s'expliquer par le faible nombre de parcelles concernées par ces pratiques en comparaison avec les surfaces de rizières présentant des bilans négatifs. Par ailleurs, malgré le fait que les cultures de contre-saison (avec bilan azoté positif) soient mises en place sur les mêmes parcelles de bas-fond que le riz (avec bilan azoté négatif), les bilans azotés des bas-fonds demeurent négatifs ; la fertilisation de ces parcelles pour les cultures de contre-saison ne parviennent donc pas à couvrir les exports en azote engendrés par la culture de riz. Les rizières de bas fond sont les « terres des ancêtres », les plus anciennement cultivées. Dans ces parcelles, les exportations d'azote annuelles engendrées par les cultures (riz et contre-saison), répétées depuis de nombreuses années, et non compensées par des apports de fertilisants adéquats, peuvent expliquer les teneurs en azote du sol significativement plus basses en comparaison avec celles des parcelles de *tanety* (Chapitre 3). Ces résultats viennent contredire l'idée selon laquelle les terres ancestrales sont les « plus fertiles ». Il faut néanmoins nuancer ce constat

dans la mesure où l'accès à l'eau et les phénomènes de sédimentation n'ont pas été pris en compte dans les bilans.

Ainsi l'analyse des pratiques à l'échelle parcellaire permet de mettre en évidence des effets qui pourraient être non perceptibles à l'échelle globale de l'exploitation.

1.3 Pratiques de gestion de la biomasse et durabilité socio-économique des exploitations familiales d'agriculture-élevage

Plusieurs indicateurs ont été utilisés pour évaluer la durabilité économique et sociale : le revenu de l'exploitation, la main d'œuvre (hectare par unité de travail et main-d'œuvre extérieure), la marge brute agricole par unité de travail, le coût total de production, la dépendance aux intrants azotés et l'autosuffisance alimentaire de la famille (Chapitre 4). D'autres indicateurs, tels que le temps nécessaire pour surmonter un événement catastrophique (ici la crise de la filière lait) et le ratio bénéfice sur coût des activités agricoles, ont été décrits dans le Chapitre 2. Un nouvel indicateur a été développé afin d'intégrer des variables environnementales et économiques : la réponse de la marge brute agricole à une augmentation de la quantité d'azote circulant dans le système d'exploitation (exprimé en \$ US par kg d'azote par an). Les simulations d'amélioration des pratiques d'alimentation, de gestion des effluents d'élevage et de fertilisation ont montré des changements dans les indicateurs de durabilité économique et sociale (Hypothèse 4).

Le poids économique des activités d'élevage est prépondérant pour les quatre exploitations familiales d'agriculture-élevage enquêtées. Le revenu agricole des exploitations est majoritairement constitué par les ventes de lait. Cependant, la diversification du revenu par les ventes de porcs et de cultures de rente engendre une part non négligeable du revenu de l'exploitation (entre 16 et 47% des recettes agricoles, Chapitre 2). Le changement des pratiques d'alimentation du troupeau laitier (i.e. augmentation de la complémentation) induit une augmentation de la production laitière, qui induit à son tour une augmentation de l'autosuffisance alimentaire et de la marge brute agricole des exploitations (Chapitre 4). Cette augmentation de marge brute agricole est d'autant plus forte que l'effectif du troupeau laitier est élevé.

Par ailleurs, il s'est avéré plus rentable d'importer l'azote dans le système par les pratiques d'alimentation (augmentation des compléments) que par les pratiques de fertilisation minérale (achat d'urée). Ceci est dû au prix élevé du kilogramme d'urée par rapport à celui du kilogramme de concentré, et à la faible réponse des rendements en riz aux apports d'urée face à celle des vaches laitières aux apports de concentrés. Par ailleurs, l'effet des apports d'azote minéral sur les cultures de riz est fortement amoindri par les pertes d'azote par volatilisation et lixiviation. L'analyse de sensibilité sur les prix des produits (riz, lait) et des intrants (urée, concentrés) et sur les taux de pertes d'azote (émissions gazeuses ou lixiviation) confirme l'avantage économique de l'importation de l'azote dans l'exploitation via l'élevage bovin (utilisation d'aliments concentrés) que via la culture du riz (application d'urée).

Les pratiques d'amélioration de la gestion des effluents n'ont montré qu'un faible impact sur l'économie de l'exploitation (Chapitre 4). Cette augmentation de la marge brute agricole résultait d'un effet indirect : l'augmentation de la quantité d'azote recyclé qui induit une augmentation de l'azote apporté aux cultures, qui induit à son tour une augmentation des rendements et donc des ventes de produits vivriers. Le coût de l'amélioration de la gestion des effluents a été considéré comme négligeable dans notre étude (e.g. achat d'une couverture pour le tas de fumier). Cependant, ces pratiques d'amélioration de la gestion des effluents, et en particulier l'enfouissement rapide du

fumier épandu sur les parcelles, pourraient nécessiter une réorganisation importante du travail voire une augmentation du temps de travail dans l'exploitation (Ruben et al., 2006 ; Saleem, 1998).

En résumé, cette étude a mis en évidence l'existence d'une grande diversité des pratiques d'alimentation des animaux, de gestion des effluents d'élevage et de fertilisation au sein des exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra. Une hétérogénéité de la fertilité des sols d'origine anthropique a été révélée. L'amélioration des pratiques d'alimentation du troupeau bovin laitier associée à l'amélioration des pratiques de gestion des effluents permettent d'améliorer la durabilité environnementale (efficacité azotée globale, recyclage de l'azote, bilan azoté du sol), économique (marge brute) et sociale (sécurité alimentaire) des exploitations. Cependant des études supplémentaires pourront être consacrées à préciser les estimations des rendements et les flux d'azote au niveau du sol, et à prendre en compte la non-linéarité des processus biophysiques.

2 Limites méthodologiques

2.1 Hypothèses et simplifications

L'analyse globale de la durabilité à l'échelle des exploitations familiales d'agriculture-élevage a mobilisé un grand nombre d'informations touchant à divers domaines :

- détermination des structures et du fonctionnement des exploitations ;
- quantification des flux de matières ;
- détermination des teneurs en azote des éléments (e.g. fourrages, fèces, concentré, aliments) ;
- estimation des émissions gazeuses et autres pertes en azote ;
- caractérisation de la fertilité des sols ;
- quantification des flux financiers (entrées et sorties d'argent) ;
- détermination de la qualité de l'alimentation humaine (quantités consommées et apports énergétiques des aliments).

Cependant dans un contexte africain généralement peu documenté, cette analyse globale a impliqué des simplifications et des hypothèses lors de sa construction.

Estimations des données

La quantification de certains rendements et flux de biomasse a été approximée à partir d'informations collectées auprès des agriculteurs. En cas d'absence de données d'enquêtes ou de mesures, des estimations tirées de la littérature ont été utilisées. C'est le cas notamment des taux de perte d'azote par émission gazeuse, lixiviation ou érosion. Dans la plupart des cas, des taux moyens de pertes d'azote ont été utilisés, alors que les plages de variation de ces taux étaient généralement décrites comme très larges (Oenema and Heinen, 1999 ; Vayssières and Rufino, 2012).

Non prise en compte de certains flux

De même, certains flux d'azote liés à des transferts au niveau du sol ont été négligés. En effet, la déposition, la sédimentation, la fixation de N₂ (symbiotique et abiotique), la dénitrification sont des flux d'azote qui n'ont pas été pris en compte dans cette étude. Certains de ces flux ont été estimés pour Madagascar au niveau national par Stoorgovel et Smaling (1990) avec des valeurs moyennes de 4, 8 et 3 kg N.ha⁻¹.an⁻¹ respectivement pour la déposition, la fixation et la sédimentation. La somme de ces flux entrants s'élève en moyenne à 38 kg N.ha⁻¹.an⁻¹ et à 19 kg N.ha⁻¹.an⁻¹ pour les rizières de bas-fond et les cultures de *tanety* (maïs, légumineuses, patates douces), respectivement (Stoorgovel et Smaling, 1990). Cependant Hofstra et Bouwman (2005) ont suggéré que la dénitrification dans les

rizières (zones humides) était plus élevée que dans les prairies ou dans les autres surfaces cultivées. Ainsi dans le contexte malgache, la dénitrification pourrait être estimée à environ 58 et 17 kg N.ha⁻¹.an⁻¹ respectivement pour les rizières et les surfaces de *tanety* à faible fertilisation azotée. Ces valeurs de dénitrification étant proches de celles des flux d'azote entrants (déposition, fixation et sédimentation), il apparaît acceptable de négliger l'ensemble de ces flux d'azote. De plus, les flux d'azote liés à la fixation symbiotique de N₂ par les légumineuses sont couramment déterminés en fonction des espèces cultivées et des surfaces emblavées (Liu et al., 2010 ; Stoorgovel et Smaling, 1990). Mais l'activité des nodules dépend aussi des conditions environnementales (Aranjuelo et al., 2007; Hungria et Vargas, 2000). Par ailleurs, les pertes d'azote par lixiviation pourraient être atténuées grâce à la récupération de l'azote par les cultures à enracinement profond, telles que le *Brachiaria* spp. ou le *Pennisetum purpureum* (Van den Bosch et al., 1998). Les phénomènes d'érosion peuvent également entraîner des transferts d'azote d'une parcelle à une autre d'une même exploitation, difficilement quantifiables, et pouvant conduire à une surestimation des taux de perte (Schlecht et Hiernaux, 2005). Des investigations supplémentaires semblent ainsi nécessaires pour obtenir des estimations plus précises des différents taux de pertes d'azote dans les exploitations agricoles malgaches.

Non prise en compte d'autres éléments nutritifs majeurs

L'azote est généralement considéré comme un des principaux facteurs limitant des cultures. Cependant, une étude du bilan azoté sur riz pluvial sur les hauts plateaux malgaches indique que les plantes prélèvent peu d'azote par rapport à la quantité disponible dans le sol, suggérant ainsi l'existence d'un facteur limitant autre que l'azote (Rakotoarisoa et al., 2010). Par ailleurs, le phosphore a souvent été reconnu comme un facteur limitant majeur des cultures dans les sols ferrallitiques africains en raison de sa fixation par le fer et/ou l'aluminium du sol (Sanchez et al., 1997 ; Sanchez et al., 2003). Les applications de fumier pourraient permettre d'augmenter la disponibilité du phosphore du sol pour les plantes, soit directement par des apports de phosphore, soit indirectement, par des apports de composés humiques qui limitent les effets fixateurs des sols ferrallitiques (Giller et al., 1997; Palm et al., 1997). L'effet positif de la fertilisation organique sur les teneurs en phosphore du sol a aussi été révélé dans cette étude. Cependant, seulement une faible part de la variabilité des teneurs en phosphore du sol a pu être expliquée (Chapitre 3). La réponse des cultures aux apports d'azote (urée ou fumier) pourrait être alors plus limitée si le phosphore est un facteur limitant. De plus, cette réponse pourrait être différente selon l'origine de l'azote employé (minéral ou fumier). Ceci pourrait encore augmenter l'intérêt économique (marge brute) et environnemental (e.g. efficacité azotée globale) des pratiques de complémentarité associées à l'amélioration des pratiques de gestion des effluents par rapport aux pratiques de fertilisation minérale.

Non linéarité des processus

Les calculs et les simulations s'appuient sur l'hypothèse de linéarité des processus biophysiques. En effet, tout comme le modèle statique NUTMON utilisé au Kenya pour le calcul des bilans en éléments nutritifs des exploitations (de Jager et al., 1998), ou la détermination des bilans complets d'éléments nutritifs pour divers pays d'Afrique (Aticho et al., 2011 ; Lesschen et al., 2007 ; Stoorgovel et Smaling, 1990), les calculs effectués dans cette étude ne tiennent pas compte de la non-linéarité des processus biophysiques (e.g. augmentation des rendements en fonction des éléments nutritifs apportés, production de lait en fonction de l'alimentation, augmentation en éléments nutritifs dans le sol en fonction des apports de matière organique). Ce problème de non-linéarité se pose en particulier lors du changement d'échelle (Bockstaller et al., 2008 ; Cobo et al., 2010). Ainsi, le calcul

des flux à l'échelle de la parcelle, puis l'agrégation de ces résultats parcellaires pour obtenir des flux à l'échelle de l'exploitation peut être une source d'erreur. Par exemple, comme mentionné précédemment, un flux d'azote sortant d'une parcelle telle l'érosion peut être un flux entrant d'azote, telle la sédimentation, pour une parcelle de la même exploitation. De même, les pertes d'azote des élevages ne sont pas proportionnelles à la densité animale (Dalgaard et al., 2011) ; par exemple, un élevage de six animaux pour 40 m² n'entraînera pas deux fois plus de pertes d'azote qu'un élevage à trois animaux pour 40 m². Selon Cobo et al. (2010), les méthodes de changement d'échelle par agrégations linéaires peuvent générer des erreurs plus importantes que celles liées aux estimations des flux à l'échelle de unité (e.g. parcelle, animal). De plus, les effets et les interactions à long terme au sein des exploitations d'agriculture-élevage (par exemple l'accumulation de matière organique dans les sols induite par l'épandage de fumier) n'ont pas pu être pris en compte dans cette étude, qui n'a considéré qu'un cycle annuel pour les observations et les calculs de transferts de nutriment.

Ainsi, la modélisation et les analyses spatiales (« mapping ») pourraient permettre de surmonter les difficultés liées à la non-linéarité des processus, aux changements d'échelle et à la dynamique des échanges des éléments nutritifs sur le long terme (Cobo et al., 2010 ; Dalgaard et al., 2011). Cependant, malgré ces limites méthodologiques et l'incertitude des données, la détermination des flux et le calcul des bilans d'éléments nutritifs se sont révélés être des méthodes utiles pour l'analyse de la gestion des ressources naturelles en Afrique (Cobo et al., 2010).

2.2 Vulnérabilité des exploitations les plus pauvres, instabilité extérieure et aversion aux risques

L'étude de la durabilité des systèmes familiaux d'agriculture-élevage doit aussi prendre en compte des contraintes qui ne sont pas directement liées aux pratiques de gestions des biomasses, telles que des enjeux cachés, une aversion aux risques, un contexte politique ou économique instable. Ces contraintes n'ont pas pu être prises en compte et pourraient remettre en cause la faisabilité des pratiques simulées.

Vulnérabilité de l'Exploitation 4, exploitation la plus pauvre, et problème de durabilité

Par exemple, la question de la durabilité économique se pose pour l'exploitation la plus pauvre, qui présente un fonctionnement de subsistance. En effet, cette exploitation présente une marge brute agricole réduite, un revenu global négatif et un ratio d'autosuffisance alimentaire proche de 1, ratio qui indique que l'ensemble des productions est juste suffisant pour couvrir les besoins alimentaires de la famille en termes d'énergie (Chapitre 2, Chapitre 4). Or, dans cette exploitation, une partie des productions est destinée à la vente. Cet état critique qui en découle, associé à la crise de la filière laitière depuis 2009, s'est traduit par le déstockage important d'animaux bovins entre 2009 et 2011. Il n'est pas impossible d'envisager que dans un tel contexte, des aides financières extérieures (aide d'un proche de la famille) aient pu échapper à l'analyse.

L'impact sur la marge brute agricole de l'amélioration des pratiques de stockage et d'épandage du fumier est particulièrement faible dans cette exploitation la plus pauvre (Chapitre 4). Ceci est probablement lié au fait qu'une grande partie de l'azote excrété (environ 94 %) est perdue avant l'étape du stockage. L'amélioration de la gestion des effluents d'élevage devra donc mettre l'accent sur cette première étape, en améliorant la structure du sol de l'étable, en changeant le type de litière, en renouvelant la litière usagée plus fréquemment (Beauvais, 2010 ; Rufino et al. 2006).

Cependant, les coûts des techniques à mettre en place pour limiter les émissions d'azote pourraient parfois être supérieurs à la valeur de l'azote « économisé » en termes d'engrais (Rotz et al., 2006).

Par ailleurs, la simulation d'une utilisation accrue des aliments concentrés pour l'alimentation des vaches laitières a suggéré une très nette amélioration de la marge brute agricole de cette exploitation. Cependant ce changement dans le mode d'alimentation de l'élevage bovin nécessite d'avoir une capacité de trésorerie suffisante pour « amorcer ce cercle vertueux », ce qui semble difficile à réaliser dans le cas de l'exploitation la plus pauvre d'après le bilan négatif de trésorerie en 2009 (Chapitre 2). De plus, la réponse des vaches laitières, en terme de production de lait, à une amélioration de la ration alimentaire, dépendra de nombreux facteurs et notamment du stade physiologique de l'animal (début ou fin de lactation, gestation). Il est donc possible que cette réponse soit faible pour une exploitation comme celle-ci, où les animaux sont nourris majoritairement de fourrages à faibles valeurs nutritives (*bozaka* et paille de riz). Ainsi selon Aticho et al. (2011), les propositions d'amélioration des pratiques pour une agriculture durable et la sécurité alimentaire des exploitations familiales doivent être adaptées au niveau de la richesse des agriculteurs ; ceci en lien avec le prix des intrants.

Instabilité extérieure et fluctuation des prix

Les exploitations familiales africaines sont couramment exposées à toutes sortes de risques mettant en péril la sécurité alimentaire de la famille : aléas climatiques, maladies ou épidémies (humaine ou animale), pestes, ravageurs, instabilités économiques et/ou politiques. Les exploitations familiales les plus pauvres sont aussi les plus vulnérables (Rufino, 2008). Les prix des intrants payés par les agriculteurs africains sont généralement très élevés et fluctuants (Sanchez et Swaminathan, 2005 ; Morris et al., 2007). A Madagascar, le prix des engrais a été multiplié par deux entre 2008 et 2009, alors que dans le même temps, le prix du lait vendu à Antsirabe passait de 600-500 Ar.L⁻¹ à 150-100 Ar.L⁻¹ suite à la cessation d'activité de la principale entreprise de transformation. Or, les prix des différents intrants (urée, concentrés) et les prix des productions (riz, lait) sur les marchés sont des facteurs qui conditionnent l'avantage économique que peuvent induire les pratiques de complémentation ou les pratiques de fertilisation minérale.

Le déstockage de bovins (observé dans deux exploitations étudiées) peut être utilisé comme une stratégie d'adaptation à une crise sur le long terme (Rufino, 2008). Cependant, recréer le stock de bovins peut s'avérer difficile pour des raisons de trésorerie. L'intérêt pourrait donc se porter sur l'achat de petits animaux, tels que les petits ruminants ou les monogastriques, moins coûteux et plus facilement mobilisables. L'exemple de la trajectoire de l'exploitation la « plus intensive » suggère un rôle primordial de l'activité porcine (naisseur-engraisseur) lors de l'installation et le financement de l'élevage bovin. La proximité des marchés pourrait avoir un rôle dans la rapidité d'adaptation des exploitations face à la crise laitière de Madagascar. En effet les deux exploitations ayant vendu des vaches laitières sont aussi celles qui étaient le plus enclavées. Les deux exploitations n'ayant pas déstocké le troupeau laitier sont l'Exploitation 1 et l'Exploitation 3 : la première, la plus intensive, avait déjà organisé la vente de ses propres produits laitiers (en bord de route nationale) et la seconde, située en bord de nationale, avait attendu une quinzaine de jour avant de retrouver un acheteur régulier, une coopérative laitière située à proximité. La proximité des marchés, le regroupement des exploitations en organisation paysanne ou l'appartenance à une coopérative laitière pourraient être des facteurs de consolidation des exploitants face aux instabilités extérieures fréquentes. Cependant, les contraintes de la sécurité alimentaire de la famille poussent les agriculteurs à développer une aversion aux risques.

Aversion aux risques

La gestion du risque est inhérente à la prise de décisions des exploitations familiales. L'adoption de nouvelles technologies est conditionnée par la capacité de prise de risque de l'exploitant face à un échec potentiel de la technologie (Dercon et Christiaensen, 2011). Les enquêtes auprès des agriculteurs ont révélé une tendance à la fertilisation préférentielle des « meilleures » parcelles de *tanety*, dans le but « d'assurer une bonne récolte » (à dire d'agriculteur). Ces pratiques relèvent d'une possible aversion aux risques chez les agriculteurs et peuvent contribuer à l'accentuation de l'hétérogénéité des niveaux de fertilité des sols. Au Zimbabwe, les pratiques de fertilisation des agriculteurs ont engendré un gradient de fertilité des sols : les parcelles les plus fertiles et les plus souvent fertilisées sont celles qui sont les plus proches des habitations (Zingore et al., 2007a). En conséquence, pour augmenter l'efficacité des apports d'éléments nutritifs, Zingore et al. conseillaient de procéder à des applications ciblées d'engrais minéraux et de fumier qui prennent en compte l'hétérogénéité du sol et, en particulier, la gestion passée des parcelles (Zingore et al., 2007b).

Le contexte économique de la zone d'étude et son éventuelle instabilité peuvent donc jouer un rôle déterminant dans l'adoption des pratiques de gestion des biomasses et les processus d'intensification durable. Selon, McDermott et al., (2010), l'intensification durable des exploitations d'agriculture-élevage doit passer par la production de valeur ajoutée afin de faire face à leur majeure contrainte qu'est le prix élevé des intrants. La mise en place de politiques et d'infrastructures pour la création de marchés et l'amélioration de leur accès aux exploitations sont indispensables à l'adoption de nouvelles technologies (Tittonell, 2007). L'organisation de la filière laitière (e.g. organisations paysannes, coopératives) pourrait être un facteur de stabilisation face aux risques de crises économiques et des aléas climatiques. Cette structuration de la filière pourrait contribuer alors à diminuer l'aversion aux risques qui est présentée comme une des causes du maintien de la pauvreté des exploitations (Dercon et Christiaensen, 2011). En effet, les exploitations les plus pauvres n'ayant aucune assurance en cas d'échec, éviteraient pour cette raison tout risque lié à la mise en œuvre de nouvelles technologies, et préféreraient maintenir des niveaux de productivité limités.

3 Perspectives

Les perspectives de cette étude se déclinent en trois points, l'utilisation et la valorisation de l'outil d'analyse de la durabilité des exploitations malgaches, l'amélioration de l'outil d'analyse et enfin les nouvelles investigations qu'il serait possible d'entreprendre.

3.1 Perspectives d'utilisation de l'outil

L'outil d'analyse de la durabilité des exploitations malgaches et les résultats des explorations d'options d'amélioration des pratiques de gestion de la biomasse pourront être utilisés pour initier des échanges avec les exploitants, afin de les sensibiliser aux pertes d'azote à chacune des étapes de transfert des biomasses et aux bénéfices que pourraient induire des changements dans leur gestion. L'identification par l'agriculteur de cette « richesse perdue » pourrait entraîner une attention nouvelle dans la gestion des biomasses et des changements de pratiques qui lui seraient spécifiques. Le dialogue avec les agriculteurs sera aussi indispensable afin d'évaluer les contraintes à l'adoption de ces options d'amélioration des pratiques de gestion de la biomasse (e.g. temps de travail, trésorerie).

En conservant les principales hypothèses sur les flux de matière et d'azote, les valeurs azotées des biomasses, les grilles de prix et la qualité alimentaire des produits, l'outil d'analyse pourrait permettre d'évaluer l'efficacité azotée et les indicateurs de durabilité d'autres exploitations familiales d'agriculture-élevage des hauts plateaux malgaches, sur la base d'enquêtes rapides ou de courts séjours d'immersion ciblés.

Enfin, avec la participation des agriculteurs, il serait aussi possible de redéfinir de nouvelles options à explorer (qu'ils souhaiteraient tester), en considérant des modifications de la structure des exploitations (e.g. augmentation de la taille du troupeau porcin, modification de l'assolement en contre-saison) et des modifications socio-économiques (e.g. capacité d'investissements, gestion de la main-d'œuvre). Une approche participative, déjà initiée par les immersions, pourrait être mise en place lors de l'amélioration de l'outil d'analyse de la durabilité (Vayssières et al., 2011).

3.2 Perspectives d'amélioration de l'outil

Elargissement de la base de connaissances

Lors du développement de l'outil d'analyse de la durabilité des exploitations malgaches, certaines informations ou connaissances essentielles n'étaient pas disponibles. Pour améliorer la précision des résultats et mieux prendre en compte le contexte environnemental (pédoclimatique, socioéconomique), il serait nécessaire d'acquérir pour Madagascar :

- des références (hauts plateaux) relatives aux flux d'azote du sol ou à l'interface sol-atmosphère (volatilisation, lixiviation, fixation, déposition, sédimentation et dénitrification) et leurs variations saisonnières. Ces données pourraient être obtenues idéalement par des mesures directes, sur les parcelles et sur les stocks de matières organiques de l'exploitation, et/ou indirectement par la calibration de fonctions de transfert (e.g. équation pour la lixiviation dans le sol) ;
- des références relatives aux pertes d'azote au niveau des activités d'élevages (bovin et monogastrique) et leurs facteurs de variation (saison, pratiques de gestion des biomasses), en ciblant tout particulièrement les étapes comprises entre l'excrétion par l'animal et l'épandage sur les parcelles. Ces données pourraient également être obtenues soit par des mesures directes soit par la calibration d'équations de transfert (e.g. équation déterminant la volatilisation ammoniacale en surface du tas de fumier) ;
- des estimations plus précises des rendements pour les fourrages en milieu paysan (kizoz, brachiaria, avoine, ray-grass), par un suivi des parcelles au dans le temps.

Prise en compte de l'hétérogénéité dans l'analyse

En général, des taux moyens ont été utilisés dans l'analyse des flux d'azote (à l'exception des pertes d'azote à l'étable, mesurées pour les quatre exploitations étudiées), rendant de ce fait les simulations des flux déterministes. La prise en compte de la variabilité observée des taux de transfert et de perte à chacune des étapes du cycle de l'azote (Figure 4 dans Chapitre 1) permettrait d'estimer l'incertitude des résultats finaux (variance). Par exemple, la lixiviation de l'azote a été calculée comme une fonction de la quantité d'azote épandue et de la teneur moyenne en azote des sols de l'exploitation. Connaissant les teneurs en azote du sol de chaque parcelle de l'exploitation, il serait alors possible d'estimer de manière plus fine ce flux de lixiviation à l'échelle de l'exploitation en prenant en compte sa variabilité spatiale.

Elaboration d'un modèle dynamique de flux

Enfin, une amélioration possible consisterait à remplacer le module linéaire qui calcule les flux d'azote au sein de l'exploitation pour une année donnée par un modèle dynamique de flux pluriannuel à l'échelle de l'exploitation. Le modèle conceptuel () du fonctionnement des exploitations familiales d'agriculture-élevage des hauts plateaux malgache pourrait servir de base au développement d'un modèle de ce type.

Des modèles de fonctionnement global d'exploitation d'agriculture-élevage ont déjà été développés dans des pays en développement (FARMSIM par Rufino et al., 2007 et Tiftonell et al., 2007) ou des pays industrialisés (e.g. MELODIE par Chardon, 2008 ; IFSM par Rotz et al., 2006 ; GAMEDE par Vayssières et al., 2009). Cependant, il serait nécessaire d'améliorer / détailler et/ou adapter au contexte malgache le module « sol » de ces modèles afin de pouvoir calculer les flux d'azote au niveau du sol, prendre en compte les effets à long terme des pratiques de gestion des biomasses sur l'azote et la matière organique du sol et simuler leurs effets sur les rendements des cultures.

De nombreux modèles de sol ont été développés pour la simulation des cycles du carbone et des nutriments dans le sol (Batlle-Aguilar et al., 2010). Certains sont essentiellement axés sur les processus biophysiques dans le sol (où le couvert végétale est une variable d'environnement) (e.g. Corbeels, et al., 2005 pour CENTURY adapté au sol des forêts ; Pansu et al., 2010 pour MOMOS ; Findeling et al., 2007 pour PASTIS ; Li et al., 2006 pour DNDC), d'autres intègrent simultanément des modules « sol » et « plante » (où la croissance des cultures est simulée en fonction des paramètres du sol) (e.g. Brisson et al., 2003 pour STICS ; Tiftonell et al., 2007 pour FIELD; Wang et al., 2002 pour APSIM). Des connaissances sur la physique des sols (e.g. conductivité hydraulique, rétention en eau du sol, porosité), sur la composition du sol (e.g. matière organique ajoutée, pools labile et récalcitrant de matière organique du sol, rapports C/N des pools, teneurs en lignine, en cellulose des pools), sur l'activité microbienne (e.g. taille de la biomasse microbienne, taux de croissance de la biomasse microbienne, taux de décomposition, taux d'immobilisation) seront à acquérir afin de paramétrer ces types de modèle dans le contexte des hauts plateaux malgaches. La difficulté inhérente de ce type modèle est de trouver un compromis entre la qualité/précision du modèle et sa complexité. Il existe en effet un seuil à partir duquel la qualité de simulation d'un modèle diminue en raison du nombre trop important de paramètres (Tiftonell, 2008). De plus, dans le contexte malgache encore peu documenté, l'acquisition de multiples données détaillées sur les propriétés physiques et biologiques des sols, indispensables pour paramétrer ce type de modèle, peut être confrontée à des contraintes logistiques et de coûts.

Les sorties de ces modèles une fois validés pourraient alors être intégrées à la matrice de flux qui permet de calculer les indicateurs de transfert et d'efficacité dans la méthode du Network Analysis.

Systeme d'exploitation

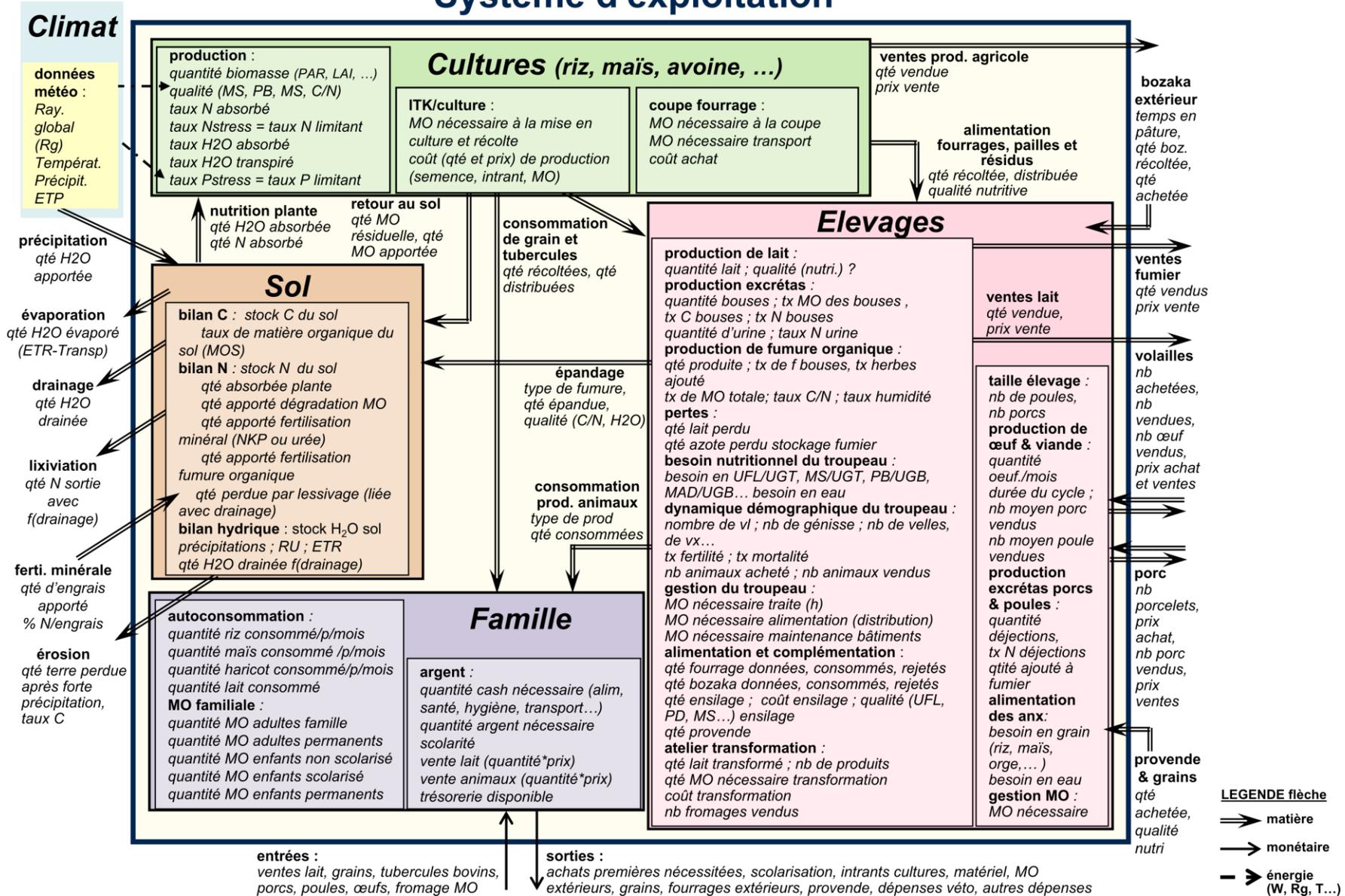


Figure 2 : Modèle conceptuel du fonctionnement des exploitations d'agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar

3.3 Autres développements ultérieurs

Les connaissances acquises lors de cette étude ont permis d'entrevoir certaines contraintes à l'adoption de nouvelles pratiques de gestion de la biomasse ou de nouvelles technologies, comme les objectifs ou enjeux cachés des exploitants, l'aversion aux risques, l'accès au marché, les fluctuations des prix des intrants et des produits.

Ces contraintes pourraient être intégrées dans des modèles d'optimisation (multi-objectifs), afin d'en évaluer les effets sur le revenu des exploitations et les impacts environnementaux (e.g. Bartolini et al., 2007; Dogliotti et al., 2007 ; Groot et al., 2012 ; Van Calker et al., 2004 ; Zander et Kächele, 1999). Ce type de modèle pourrait permettre de tester l'adoption de nouvelles technologies/pratiques ou la mise en place de politiques environnementales tout en trouvant un compromis entre les contraintes socio-économiques et environnementales des exploitations.

De même le rôle des marchés, la fluctuation des prix ou encore la gestion collective d'un bien commun (cas des pâtures sur *tanety*), pourraient être étudiés à l'aide de système multi-agent (SMA). Ce type de modèle permet de tester des options d'améliorations techniques des exploitations agricoles tout en ayant une vision réaliste des conditions socio-économiques et biophysiques des exploitations et en considérant les interactions entre acteurs (Schreinemachers et al., 2007).

Les perspectives en termes de modélisation sont multiples mais demanderont encore un travail lourd d'acquisition de données. Dans un contexte peu documenté, cette étude fournit donc une approche intéressante pour évaluer/simuler des options d'amélioration de la durabilité des exploitations d'agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abegaz, Assefa, 2005. Farm management in mixed crop-livestock systems in the Northern Highlands of Ethiopia. PhD degree Wageningen University, p. 224.
- Adams, W. M., 2006. The future of sustainability: re-thinking environment and development in the twenty-first century. Report of the IUCN Renowned Thinkers Meeting, 29-31 January 2006. IUCN, The World Conservation Union., p. 18.
- Affholder, F., Jourdain, D., Quang, D.D., Tuong, T.P., Morize, M., and Ricome, A., 2010. Constraints to farmers-adoption of direct-seeding mulch-based cropping systems: A farm scale modeling approach applied to the mountainous slopes of Vietnam. *Agricultural Systems* 103, 51-62.
- Alary, V., Affholder, F., Scopel, E., Alvarez, S., Soria, A., Oliveira, M.N., Xavier, J.H.V., and Corbeels, M., 2010. Economic assessment of conservation agriculture options for family farms in Brasil with farm household model. First Latin American and European Congress on Co-Innovation of Sustainable Rural Livelihood Systems, 27-30 April 2010. Uruguay.
- Albrecht, A. and Kandji, S.T., 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 99, 15-27.
- Alvarez, S., 2012 Biomass management on smallholder crop–livestock systems of highlands of Madagascar: effects on farm sustainability (in French). PhD thesis dissertation, Montpellier SupAgro, France. p. 224
- Amin, R., Zia, M.S., and Akhtar, A., 1992. Wheat response to zinc and copper fertilization at Swat. *Pakistan Journal of Agricultural Research* 13, 221-226.
- Ammann, C., Spirig, C., Leifeld, J., and Neftel, A., 2009. Assessment of the nitrogen and carbon budget of two managed temperate grassland fields. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 133, 150-162.
- Andriamanalina, Beby Sehen, 2007. Missions économiques. Fiche de synthèse : La filière lait à Madagascar. Mission économique de Tananarivo, Antananarivo, Madagascar, 4 p.
- Andrieu, J., Demarquilly, C., and Sauvant, D., 1988. Tables de la valeur nutritive des aliments. In: Jarrige, R. (Ed.), *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. INRA, Paris, France, pp. 351-443.
- Aranjuelo, I., Irigoyen, J.J., and Sánchez-Díaz, M., 2007. Effect of elevated temperature and water availability on CO₂ exchange and nitrogen fixation of nodulated alfalfa plants. *Environmental and Experimental Botany* 59, 99-108.
- Aticho, A., Elias, E., and Diels, J., 2011. Comparative analysis of soil nutrient balance at farm level: A case study in Jimma Zone, Ethiopia. *International Journal of Soil Science* 259-266.
- Ayantunde, A.A., De Leeuw, J., Turner, M.D., and Said, M., 2011. Challenges of assessing the sustainability of (agro)-pastoral systems. *Livestock Science* 139, 30-43.
- Banwart, S., 2011. Save our soils. *Nature* 474, 151-152.
- Bationo, A., Lompo, F., and Koala, S., 1998. Research on nutrient flows and balances in west Africa: state-of-the-art. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 71, 19-35.
- Bationo, A. and Buerkert, A., 2001. Soil organic carbon management for sustainable land use in Sudano-Sahelian West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 61, 131-142.

- Bationo, A., Kihara, J., Vanlauwe, B., Waswa, B., and Kimetu, J., 2007. Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. *Agricultural Systems* 94, 13-25.
- Batlle-Aguilar, J., Brovelli, A., Porporato, A., and Barry, D.A., 2010. Modelling soil carbon and nitrogen cycles during land use change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*
- Beauvais, Constance, 2010. Caractérisation des facteurs de variation de la qualité des engrais organiques animaux dans les élevages bovins laitiers du Vakinankaratra, Madagascar. Master degree Montpellier SupAgro, Montpellier, France, p. 67.
- Bedard-Haughn, A., Jongbloed, F., Akkerman, J., Uijl, A., de Jong, E., Yates, and T., Pennock, D., 2006. The effects of erosional and management history on soil organic carbon stores in ephemeral wetlands of hummocky agricultural landscapes. *Geoderma*, 135, 296-306.
- Bekunda, M.A., Bationo, A., and Ssali, H., 1997. Soil Fertility Management in Africa: A Review of Selected Research Trials. In: Buresh, R.J., Sanchez, P.A., and Calhoun, F. (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa*, 51 ed. SSSA, Madison, WI, pp. 63-79.
- Bellon-Maurel, V. and McBratney, A., 2011. Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils - Critical review and research perspectives. *Soil Biology and Biochemistry*, In Press, Corrected Proof.
- Bellows, B., 2001. Nutrient Cycling in Pastures. ATTRA/NCAT. 64 p.
- Bernoux, M., Cerri, C.C., Cerri, C.E.P., Siqueira Neto, M., Metay, A., Perrin, A.S., Scopel, E., Razafimbelo, T., Blavet, D., Piccolo, M.d.C., Pavei, M., and Milne, E., 2006. Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review. *Agronomy for Sustainable Development* 26, 1-8.
- Boardman, J., 2006. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *CATENA*, 68(2-3), 73-86.
- Bockstaller, C., Galan, M.-B., Capitaine, M., Colomb, B., Mousset, J., and Viaux, P., 2008. Comment évaluer la durabilité des systèmes en production végétale ? In: Reau, R. and Doré, T. (Eds.), *Systèmes de culture innovants et durables. Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Educagri Editions, Dijon, pp. 29-52.
- Bockstaller, C., Guichard, L., Makowski, D., Aveline, A., Girardin, P., and Plantureux, S., 2008. Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 139-149.
- Bockstaller, C., Guichard, L., Keichinger, O., Girardin, P., Galan, M.B., and Gaillard, G., 2009. Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 223-235.
- Bouwman, A.F. and Van der Hoek, K.W., 1997. Scenarios of animal waste production and fertilizer use and associated ammonia emission for the developing countries. *Atmos. Environ.* 31, 4095-4102.
- Bouwman, A.F., Beusen, A.H.W., Van der Hoek, K.W., Asman, W.A.H., and Van Drecht, G., 2006. Global Inventory of Ammonia Emissions from Global Livestock Production and Fertilizer Use. In: Aneja, V.P., Schlesinger, W.H., Knighton, R., Jennings, G., Niyogi, D., Gilliam, W., and Duke, C.S. (Eds.), *Workshop on Agricultural Air Quality: State of the Science*. 5-8 June 2006, pp. 180-185.

- Bradford, M.A., Jones, T.H., Bardgett, R.D., Black, H.I.J., Boag, B., Bonkowski, M., Cook, R., Eggers, T., Gange, A.C., Grayston, S.J., Kandeler, E., McCaig, A.E., Newington, J.E., Prosser, J.I., Setälä, H., Staddon, P.L., Tordoff, G.M., Tscherko, D., and Lawton, J.H., 2002. Impacts of Soil Faunal Community Composition on Model Grassland Ecosystems. *Science* 298, 615-618.
- Braun, A. R., Smaling, E. M. M., Muchugu, E. I., Shepherd, K. D., and Corbett, J. D., 1997. Maintenance and improvement of soil productivity in the highlands of Ethiopia, Kenya, Madagascar and Uganda., African Highlands Initiative (AHI) Technical Report Series no.6 African Highlands Initiative AHI Coordinating Office, ICRAF, Nairobi, Kenya., p. 149.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussièrre, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J.P., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., and Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model stics. *European Journal of Agronomy* 18, 309-332.
- Brown, B.J., Hanson, M.E., Liverman, D.M., and Merideth, R.W.Jr., 1987. *Global Sustainability: Toward Definition.*, 11 ed., pp. 713-719.
- Campbell, D.E. and Garmestani, A.S., 2012. An energy systems view of sustainability: Energy evaluation of the San Luis Basin, Colorado. *Journal of Environmental Management* 95, 72-97.
- Campiglia, E., Mancinelli, R., and Radicetti, E., 2011. Influence of no-tillage and organic mulching on tomato (*Solanum Lycopersicum* L.) production and nitrogen use in the mediterranean environment of central Italy. *Scientia Horticulturae* 130, 588-598.
- Cardoso, I.M. and Kuyper, T.W., 2006. Mycorrhizas and tropical soil fertility. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 116, 72-84.
- Carvalho, J.L.N., Raucci, G.S., Cerri, C.E., Bernoux, M., Feigl, B.J., Wruck, F.J., and Cerri, C.C., 2010. Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. *Soil and Tillage Research* 110, 175-186.
- Castoldi, N. and Bechini, L., 2010. Integrated sustainability assessment of cropping systems with agro-ecological and economic indicators in northern Italy. *European Journal of Agronomy* 32, 59-72.
- Chardon, Xavier, 2008. Evaluation environnementale des exploitations laitières par modélisation dynamique de leur fonctionnement et des flux de matières au sein du système : développement et application du simulateur MELODIE. PhD, AgroParisTech, p. 272.
- Cobo, J.G., Dercon, G., and Cadisch, G., 2010. Nutrient balances in African land use systems across different spatial scales: A review of approaches, challenges and progress. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 136, 1-15.
- Conant, R.T. and Paustian, K., 2002. Spatial variability of soil organic carbon in grasslands: implications for detecting change at different scales. *Environmental Pollution* 116, S127-S135.
- Corbeels, M., McMurtrie, R.E., Pepper, D.A., and O'Connell, A.M., 2005. A process-based model of nitrogen cycling in forest plantations: Part I. Structure, calibration and analysis of the decomposition model. *Ecological Modelling* 187, 426-448.
- CPCS, 1967. Commission de Pédologie et Cartographie des sols, Classification des Sols. ENSA, Grigon. 87 p.
- Dabin, B., 1967. Méthode Olsen modifiée. In: Application des Dosages Automatiques à l'Analyse du Sol. Cahiers de l'Ortsom, 257-286.

- Dalgaard, T., Hutchings, N., Dragosits, U., Olesen, J.E., Kjeldsen, C., Drouet, J.L., and Cellier, P., 2011. Effects of farm heterogeneity and methods for upscaling on modelled nitrogen losses in agricultural landscapes. *Environmental Pollution* 159, 3183-3192.
- Dawson, J. J. C. and Smith, P., 2007. Carbon losses from soil and its consequences for land-use management. *Science of The Total Environment*, 382(2-3), 165-190.
- de Jager, A., Kariuku, I., Matiri, F.M., Odendo, M., and Wanyama, J.M., 1998. Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON): IV. Linking nutrient balances and economic performance in three districts in Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 71, 81-92.
- de Jager, A., Onduru, D., van Wijk, M.S., Vlaming, J., and Gachini, G.N., 2001. Assessing sustainability of low-external-input farm management systems with the nutrient monitoring approach: a case study in Kenya. *Agricultural Systems* 69, 99-118.
- de Koning, G.H.J., van de Kop, P.J., and Fresco, L.O., 1997. Estimates of sub-national nutrient balances as sustainability indicators for agro-ecosystems in Ecuador. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 65, 127-139.
- de Rouw, A. and Rajot, J. L., 2004. Soil organic matter, surface crusting and erosion in Sahelian farming systems based on manuring or fallowing. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(2), 263-276.
- de Rouw, A., Huon, S., Soulileuth, B., Jouquet, P., Pierret, A., Ribolzi, O., Valentin, C., Bourdon, E., and Chantharath, B., 2010. Possibilities of carbon and nitrogen sequestration under conventional tillage and no-till cover crop farming (Mekong valley, Laos). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 136(1-2), 148-161.
- Dechert, G., Veldkamp, E., and Brumme, R., 2005. Are Partial Nutrient Balances Suitable to Evaluate Nutrient Sustainability of Land use Systems? Results from a Case Study in Central Sulawesi, Indonesia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72, 201-212.
- Dercon, S. and Christiaensen, L., 2011. Consumption risk, technology adoption and poverty traps: Evidence from Ethiopia. *Journal of Development Economics* 96, 159-173.
- Djigal, D., Saj, S., Rabary, B., Blanchart, E., and Villenave, C., 2012. Mulch type affects soil biological functioning and crop yield of conservation agriculture systems in a long-term experiment in Madagascar. *Soil and Tillage Research* 118, 11-21.
- Dourmad, J.Y., Guingand, N., Latimier, P., and Sève, B., 1999. Nitrogen and phosphorus consumption, utilisation and losses in pig production: France. *Livestock production science* 58, 199-211.
- Douzet, J.M., Muller, B., Scopel, E., Albrecht, A., Rakotoarisoa, J., and Rakotoalibera, M.H., 2008. Réduction du ruissellement et de l'érosion par les systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale pour les cultures pluviales des hautes terres malgaches. *Terre malgache*, 99-103.
- Douzet, J.M., Scopel, E., Muller, B., Rakotoarisoa, J., Albrecht, A., and Drazafindramanana, N.C., 2010. Effects of direct seeding mulch-based cropping systems on water runoff and erosion under rainfed conditions in the highlands of Madagascar. *Étude et Gestion des Sols* 17, 131-140.
- DTU Food, 2012. Danish Food Composition Databank - Ed. 7.01 . <http://www.foodcomp.dk>

- Dugué, P., Vayssières, J., Chia, E., Ouedraogo, S., Havard, M., Coulibaly, D., Nacro, H.B., Sissoko, F., Sangare, M., and Vall, E., 2011. L'intensification écologique : réflexions pour la mise en pratique de ce concept dans les zones de savane d'Afrique de l'Ouest. In: Vall, E., Andrieu, N., Chia, E., and Nacro, H.B. (Eds.), ASAP. Partenariat, modélisation, expérimentation : quelles leçons pour la conception de l'innovation et l'intensification écologique. Actes du séminaire ASAP, novembre 2011, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.
- Erenstein, O., 2003. Smallholder conservation farming in the tropics and sub-tropics: a guide to the development and dissemination of mulching with crop residues and cover crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 100, 17-37.
- Esilaba, A.O., Nyende, P., Nalukenge, G., Byalebeka, J.B., Delve, R.J., and Ssali, H., 2005. Resource flows and nutrient balances for crop and animal production in smallholder farming systems in eastern Uganda. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 109, 192-201.
- FAO, 1983. Utilisation rationnelle du charbon de bois. Techniques simples de carbonisation, 41 ed. FAO, Rome, Italy, 152 p.
- FAO, 2001. The Economics of Conservation Agriculture. Roma, p. 66.
- FAO, 2007. TERRASTAT: Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties version 3.6. In: Land and water Development Division. FAO, Rome, Italy.
- FAO, 2008. FAO methodology for the measurement of food deprivation: Updating the minimum dietary energy requirements. FAO Statistics Division, Roma, Italy
- FAO, 2010. FAO Hunger Map 2010: Prevalence of undernourishment in developing countries. www.fao.org/hunger
- FAO, 2010. The state of Food Insecurity in the World. Addressing food insecurity in protracted crises., p. 62.
- FAO, 2011. FAOSTAT. <http://faostat.fao.org/default.aspx> .
- FAO, 2011. The state of Food Insecurity in the World. How does international price volatility affect domestic economies and food security. p. 55.
- FAO, 2012a. FAOSTAT. <http://faostat.fao.org/default.aspx>
- FAO, 2012b. Animal Feed Resources Information System (AFRIS). FAO, Rome, Italy. <http://www.fao.org/ag/AGA/AGAP/FRG/AFRIS/>
- FAO/IFA, 2001. Global estimates of gaseous emissions of NH₃, NO and N₂O from agricultural land. FAO, Rome, Italy.
- Farage, P.K., Ardö, J., Olsson, L., Rienzi, E.A., Ball, A.S., and Pretty, J.N., 2007. The potential for soil carbon sequestration in three tropical dryland farming systems of Africa and Latin America: A modelling approach. *Soil and Tillage Research* 94, 457-472.
- Feedbase, 2012. Economic and technical feed data. <http://www.feedbase.com>
- Feller, C., 1995. La matière organique sans les sols tropicaux à argile 1:1. Recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. PhD Thesis, Université Louis Pasteur Ortsom, Paris, p. 393.
- Feller, C. and Beare, M. H., 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79(1-4), 69-116.

- Fernandes, E.C.M., Motavalli, P.P., Castilla, C., and Mukurumbira, L., 1997. Management control of soil organic matter dynamics in tropical land-use systems. *Geoderma* 79, 49-67.
- Fernandez-Rivera, S., Williams, T.O., Hiernaux, P., and Powell, J.M., 1995. Faecal excretion by ruminants and manure availability for crop production in semi arid West Africa. In: Powell, J.M., Fernandez-Rivera, S., Williams, T.O., and Renard, C. (Eds.), *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of Sub-Saharan Africa Volume II: Technical Papers. Proceedings of an International Conference held in Addis Ababa, Ethiopia, 22-26 November 1993* ILCA, Addis Ababa, Ethiopia, pp. 149-170.
- Findeling, A., Garnier, P., Coppens, F., Lafolie, F., and Recous, S., 2007. Modelling water, carbon and nitrogen dynamics in soil covered with decomposing mulch. *European Journal of Soil Science* 58, 196-206.
- Gachimbi, L.N., Keulen, H.V., Thurairaja, E.G., Karuku, A.M., Jager, A.d., Nguluu, S., Ikombi, B.M., Kinama, J.M., Itabari, J.K., and Nandwa, S.M., 2005. Nutrient balances at farm level in Machakos (Kenya), using a participatory nutrient monitoring (NUTMON) approach. *Land Use Policy* 22, 13-22.
- Gallenga, G., 2008. L'empathie inversée au cœur de la relation ethnographique. *Journal des anthropologues*, 145-161.
- Galloway, J.N., Townsend, A.R., Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J.R., Martinelli, L.A., Seitzinger, S.P., and Sutton, M.A., 2008. Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science* 320, 889-892.
- Giller, K.E., Cadisch, G., Ehaliotis, C., Adams, E., Sakala, W.D., and Mafongoya, P.L., 1997. Building soil nitrogen capital in Africa. In: Buresh, R.J., Sanchez, P.A., and Calhoun, F. (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa*, 51 ed. SSSA, Madison, WI, pp. 151-192.
- Giller, K.E., Rowe, E.C., de Ridder, N., and van Keulen, H., 2006. Resource use dynamics and interactions in the tropics: Scaling up in space and time. *Agricultural Systems* 88, 8-27.
- Giller, K.E., Witter, E., Corbeels, M., and Tittonell, P., 2009. Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field crops research* 114, 23-34.
- Glover, J.D., Reganold, J.P., and Cox, C.M., 2012. Agriculture: Plant perennials to save Africa's soils. *Nature* 489, 359-361.
- Gobat, J.M., Aragno, M., and Matthey, W., 2010. *Le sol vivant: Bases de pédologie - Biologie des sols*. 3 ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes,
- Gregorich, E.G., Monreal, C.M., Carter, M.R., Angers, D.A., and Ellert, B.H., 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science* 74, 367-385.
- Grosbellet, C., 2008. *Le rôle de la matière organique sur la structure et les propriétés physiques du sol. Evolution et effets sur la structuration du sol de la matière organique apportée en grande quantité* Université d'Angers, pp. 53-70.
- GSDM, TAFA, and FIFAMANOR, 2008. Guide pour les Hautes Terres de Madagascar. Conduite des systèmes de culture sur couverts végétaux et affouragement des vaches laitières. GSDM - TAFA - FIFAMANOR, Antsirabe. p. 90

- Hailelassie, A., Priess, J., Veldkamp, E., Teketay, D., and Lesschen, J.P., 2005. Assessment of soil nutrient depletion and its spatial variability on smallholders mixed farming systems in Ethiopia using partial versus full nutrient balances. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 108, 1-16.
- Henry, M., Valentini, R., and Bernoux, M., 2009. Soil carbon stocks in ecoregions of Africa. *Biogeosciences Discuss.* 6, 797-823.
- Herrero, M., Thornton, P.K., Gerber, P., and Reid, R.S., 2009. Livestock, livelihoods and the environment: understanding the trade-offs. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 1, 111-120.
- Herrero, M., Thornton, P.K., Notenbaert, A.M., Wood, S., Msangi, S., Freeman, H.A., Bossio, D., Dixon, J., Peters, M., van de Steeg, J., Lynam, J., Rao, P.P., Macmillan, S., Gerard, B., McDermott, J., Seré, C., and Rosegrant, M., 2010. Smart Investments in Sustainable Food Production: Revisiting Mixed Crop-Livestock Systems. *Science* 327, 822-825.
- Hoang, V.N., 2011. Measuring and decomposing changes in agricultural productivity, nitrogen use efficiency and cumulative exergy efficiency: Application to OECD agriculture. *Ecological Modelling* 222, 164-175.
- Hoden, A., Coulon, J.B., and Faverdin, P., 1988. Alimentation des vaches laitières. In: Jarrige, R. (Ed.), *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. INRA Editions, Paris, pp. 135-158.
- Hofstra, N. and Bouwman, A., 2005. Denitrification in Agricultural Soils: Summarizing Published Data and Estimating Global Annual Rates. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72, 267-278.
- Hungria, M. and Vargas, M.A.T., 2000. Environmental factors affecting N₂ fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. *Field crops research* 65, 151-164.
- Husson, O., Charpentier, H., Naudin, K., Moussa, N., Michellon, R., Andrianasolo, H., Razanamparany, C., Rakotoarivivo Rakotondramanana, C., Enjalric, F., and Séguy, L., 2009. Manuel pratique du semis direct à Madagascar. Volume II. Chapitre 2. Le choix des itinéraires techniques. 76 p.
- Imbeah, M., 1998. Composting piggery waste: A review. *Bioresource Technology* 63, 197-203.
- INRA, 1989. Tables de composition des matières premières. In: Quæ (Ed.), *Alimentation des animaux monogastriques*. INRA, Paris, France, pp. 163-239.
- INSTAT, 2012. Population & démographie. <http://www.instat.mg/>
- IPPC, 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. 4 ed. IGES, Japan.
- Jalil, A. and Ghani, C.A., 1982. Yield and quality of barley as affected by different doses of urea. *Pakistan Journal of Agricultural Research* 3, 26-30.
- Janzen, H.H., Campbell, C.A., Izaurralde, R.C., Ellert, B.H., Juma, N., McGill, W.B., and Zentner, R.P., 1998. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. *Soil and Tillage Research*, 47(3-4), 181-195.
- Jhonson, C., 2009. *Biology of Soil Science*. Oxford Book Compagy, Jaipur, India,
- Jian-She, Z., Fu-Ping, Z., Jin-Hua, Y., Jin-Ping, W., Ming-Li, C., Li, C.F., and Cao, C.G., 2011. Emissions of N₂O and NH₃, and nitrogen leaching from direct seeded rice under different tillage practices in central China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 140, 164-173.

- Justin, M., 2004. Struggling with Sustainability - Comparative Framework for Evaluating Sustainable Development Programs. *World Development* 32, 2139-2160.
- Karue, C.N., Evans, J.L., and Tillman, A.D., 1973. Voluntary Intake of Dry Matter by African Zebu Cattle. Quality of Feed and the Reference Base. *Journal of Animal Science* 36, 1181-1185.
- Kassam, A., Friedrich, T., Shaxson, F., Reeves, T., Pretty, J., and De Moraes Sá, J.C., 2011. Production Systems for Sustainable Intensification. *Technology Assessment - Theory and Practice (TATuP)* 20, 38-45.
- Kates, R.W., Clark, W.C., Corell, R., Hall, J.M., Jaeger, C.C., Lowe, I., McCarthy, J.J., Schellnhuber, H.J., Bolin, B., Dickson, N.M., Faucheux, S., Gallopin, G.C., Grübler, A., Huntley, B., Jäger, J., Jodha, N.S., Kasperson, R.E., Mabogunje, A., Matson, P., Mooney, H., Moore, B., O'Riordan, T., and Svedin, U., 2001. Sustainability Science. *Science* 292, 641-642.
- Kates, R.W., Parris, T.M., and Leiserowitz, A.A., 2005. What Is Sustainable Development? Goals, Indicators, Values, and Practice. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* 47, 8-21.
- Keating, B. and Carberry, P., 2011. Sustainable intensification and the food security challenge., CIALCA International Conference : Challenges and Opportunities for Agricultural Intensification of the Humid Highland Systems of Sub-Saharan Africa, Kigali, Rwanda, 24-27 Oct. 2011 CIALCA Consortium, Nairobi, Kenya, p. 7.
- Küstermann, B., Christen, O., and Hülsbergen, K.-J., 2010. Modelling nitrogen cycles of farming systems as basis of site- and farm-specific nitrogen management. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 135, 70-80.
- Lal, R., 2008. Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363, 815-830.
- Lavelle, P., Lattaud, C., Trigo, D., and Barois, I., 1995. Mutualism and biodiversity in soils. *Plant and Soil* 170, 23-33.
- Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., and Rossi, J.P., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology* 42, Supplement 1, S3-S15.
- Lebart, L., Piron, M., and Morineau, A., 2006. *Statistique exploratoire multidimensionnelle. Visualisation et inférence en fouille de données.* 4 ed. Dunod. 480 p.
- Lefroy, R.D.B., Bechstedt, H.D., and Rais, M., 2000. Indicators for sustainable land management based on farmer surveys in Vietnam, Indonesia, and Thailand. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 81, 137-146.
- Lekasi, J.K., Tanner, J.C., Kimani, S.K., and Harris, P.J.C., 2003. Cattle manure quality in Maragua District, Central Kenya: effect of management practices and development of simple methods of assessment. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 94, 289-298.
- Lesschen, J., Stoorvogel, J., Smaling, E., Heuvelink, G., and Veldkamp, A., 2007. A spatially explicit methodology to quantify soil nutrient balances and their uncertainties at the national level. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 78, 111-131.

- Li, C., Frohling, S., Crocker, G.J., Grace, P.R., Klír, J., Körchens, M., and Poulton, P.R., 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the DNDC model. *Geoderma* 81, 45-60.
- Li, C., Farahbakhshazad, N., Jaynes, D.B., Dinnes, D.L., Salas, W., and McLaughlin, D., 2006. Modeling nitrate leaching with a biogeochemical model modified based on observations in a row-crop field in Iowa. *Ecological Modelling* 196, 116-130.
- Liu, J., You, L., Amini, M., Obersteiner, M., Herrero, M., Zehnder, A.J.B., and Yang, H., 2010. A high-resolution assessment on global nitrogen flows in cropland. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 8035-8040.
- López-Ridaura, S., van Keulen, H., Van Ittersum, M.K., and Leffelaar, P.A., 2005. Multiscale Methodological Framework to Derive Criteria and Indicators for Sustainability Evaluation of Peasant Natural Resource Management Systems. *Environment, Development and Sustainability* 7, 51-69.
- MAEP, 2012. Filière technique agricole. Le blé. <http://www.maep.gov.mg/filtecble.htm>
- Malinowski, B., 2003. The subject, method and scope of this inquiry. In: Routledge (Ed.), *Argonauts of the Western Pacific: An Account of Native Enterprise and Adventure in the Archipelagoes of Melanesian New Guinea (1922) Taylor and Francis (11th editions)*, pp. 1-20.
- Mando, A., Ouattara, B., Sqdogo, M., Stroosnijder, L., Ouattara, K., Brussaard, L., and Vanlauwe, B., 2005. Long-term effect of tillage and manure application on soil organic fractions and crop performance under Sudano-Sahelian conditions. *Soil and Tillage Research* 80, 95-101.
- Manlay, R.J., Masse, D., Chotte, J.L., Feller, C., Kairq, M., Fardoux, J., and Pontanier, R., 2002. Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna: II. The soil component under semi-permanent cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88, 233-248.
- Mathuva, M.N., Rao, M.R., Smithson, P.C., and Coe, R., 1998. Improving maize (*Zea mays*) yields in semiarid highlands of Kenya: agroforestry or inorganic fertilizers? *Field crops research* 55, 57-72.
- McDermott, J.J., Staal, S.J., Freeman, H.A., Herrero, M., and Van de Steeg, J.A., 2010. Sustaining intensification of smallholder livestock systems in the tropics. *Livestock Science* 130, 95-109.
- McKague, K., Reid, K., and Simpson, H., 2005. Répercussions environnementales de l'utilisation d'azote en agriculture. Fiche technique. p. 4.
- McLatchey, G.P. and Reddy, K.R., 1998. Regulation of Organic Matter Decomposition and Nutrient Release in a Wetland Soil. *Journal of Environmental Quality* 27, 1268-1274.
- Meisinger, J.J. and Jokela, W.E., 2000. Ammonia Volatilization from Dairy and Poultry Manure. *Managing Nutrients and Pathogens from Animal Agriculture*, NRAES-130 ed. NRAES, Ithaca, NY, USA, pp. 334-354.
- Mkhabela, M.S., Madani, A., Gordon, R., Burton, D., Cudmore, D., Elmi, A., and Hart, W., 2008. Gaseous and leaching nitrogen losses from no-tillage and conventional tillage systems following surface application of cattle manure. *Soil Tillage Res.* 98, 187-199.
- Moll, H.A.J., 2005. Costs and benefits of livestock systems and the role of market and nonmarket relationships. *Agricultural Economics* 32, 181-193.

- Möller, K. and Stinner, W., 2009. Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides). *European Journal of Agronomy* 30, 1-16.
- Morris, Michael, Kelly, Valerie A., Kopicki, Ron J., and Byerlee, Derek, 2007. *Fertilizer Use in African Agriculture - Lessons Learned and Good Practice Guidelines*. The World Bank, Washington, DC
- Mulier, A., Hofman, G., Baecke, E., Carlier, L., De Brabander, D., De Groote, G., De Wilde, R., Fiems, L., Janssens, G., Van Cleemput, O., Van Herck, A., Van Huylenbroeck, G., and Verbruggen, I., 2003. A methodology for the calculation of farm level nitrogen and phosphorus balances in Flemish agriculture. *European Journal of Agronomy* 20, 45-51.
- Nambiar, K.K.M., Gupta, A.P., Fu, Q., and Li, S., 2001. Biophysical, chemical and socio-economic indicators for assessing agricultural sustainability in the Chinese coastal zone. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 87, 209-214.
- Nandwa, S.M. and Bekunda, M.A., 1998. Research on nutrient flows and balances in East and Southern Africa: state-of-the-art. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 71, 5-18.
- Nelson, G.C., Rosegrant, M.W., Palazzo, A., Gray, I., Ingersoll, C., Robertson, R., Tokgoz, S., Zhu, T., Sulser, T.B., Ringler, C., and Msangi, S., 2010. *Food security, farming, and climate change to 2050: Scenarios, results, policy options*. IFPRI, Washington, USA.
- Neto, M.S., Scopel, E., Corbeels, M., Cardoso, A.N., Douzet, J.M., Feller, C., Piccolo, M.D. C., Cerri, C.C., and Bernoux, M., 2010. Soil carbon stocks under no-tillage mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrado: An on-farm synchronic assessment. *Soil and Tillage Research*, 110(1), 187-195.
- Nkonya, E., Kaizzi, C., and Pender, J., 2005. Determinants of nutrient balances in a maize farming system in eastern Uganda. *Agricultural Systems* 85, 155-182.
- Nyssen, J., Poesen, J., and Deckers, J., 2009. Land degradation and soil and water conservation in tropical highlands. *Soil and Tillage Research*, 103(2), 197-202.
- Oenema, O. and Heinen, M., 1999. Uncertainties in nutrient budgets due to biases and errors. In: E.M.A. Smaling, O. Oenema & L.O. Fresco (Eds.), *Nutrient disequilibria In agroecosystems. Concepts and case studies*. CABI Publishing, Wallingford, UK, pp. 75-97
- Oenema, O., 2006. Nitrogen budgets and losses in livestock systems. *International Congress Series* 1293, 262-271.
- Omotayo, O.E. and Chukwuka, K.S., 2009. Soil fertility restoration techniques in sub-Saharan Africa using organic resources. *African Journal of Agricultural Research* 4, 144-150.
- Palm, C.A., Swift, M.J., and Woome, P.L., 1996. Soil biological dynamics in slash-and-burn agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 58, 61-74.
- Palm, C.A., Myers, R.J.K., and Nandwa, S.M., 1997. Combined use of organic and inorganic nutrient sources for soil fertility maintenance and replenishment. In: Buresh, R.J., Sanchez, P.A., and Calhoun, F. (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa*, 51 ed. SSSA, Madison, WI, pp. 193-217.
- Rakoto Ramiarantsoa, H., 1995. *Chair de la terre, oeil de l'eau... Paysanneries et recompositions de campagnes en Imerina (Madagascar)*. Editions de l'Orstom, Paris. p. 370

- Palm, C.A., Gachengo, C.N., Delve, R.J., Cadisch, G., and Giller, K.E., 2001. Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic resource database. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 83, 27-42.
- Pansu, M., Sarmiento, L., Rujano, M.A., Ablan, M., Acevedo, D., and Bottner, P., 2010. Modeling organic transformations by microorganisms of soils in six contrasting ecosystems: Validation of the MOMOS model. *Global Biogeochemical Cycles* 24, GB1008.
- Pascual, J.A., Garcia, C., Hernandez, T., Moreno, J.L., and Ros, M., 2000. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes. *Soil Biology and Biochemistry* 32, 1877-1883.
- Pastor-Villegas, J., Pastor-Valle, J.F., Rodriguez, J.M.M., and Garcia, M.G., 2006. Study of commercial wood charcoals for the preparation of carbon adsorbents. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 76, 103-108.
- Petit, M., 1988. Alimentation des vaches allaitantes. In: Jarrige, R. (Ed.), *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. INRA Editions, Paris, pp. 158-184.
- Place, F., Barrett, C.B., Freeman, H.A., Ramisch, J.J., and Vanlauwe, B., 2003. Prospects for integrated soil fertility management using organic and inorganic inputs: evidence from smallholder African agricultural systems. *Food Policy* 28, 365-378.
- Powell, J.M., Gourley, C.J.P., Rotz, C.A., and Weaver, D.M., 2010. Nitrogen use efficiency: A potential performance indicator and policy tool for dairy farms. *Environmental Science & Policy* 13, 217-228.
- Prudencio, C., 1993. Ring management of soils and crops in the west African semi-arid tropics: The case of the mossi farming system in Burkina Faso. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 47(3), 237-264.
- R Core Team (2012). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Version 2.14, Vienna, Austria. URL : <http://www.R-project.org/>
- Rakoto Ramiarantsoa, H., 1995. *Chair de la terre, oeil de l'eau... Paysanneries et recompositions de campagnes en Imerina (Madagascar)*. Editions de l'Orstom, Paris. p. 370
- Rakotoarisoa, J., Oliver, R., Dusserre, J., Muller, B., Douzet, J.M., Michellon, R., Moussa, N., Razafinjara, L.A., Rajeriarison, C., and Scopel, E., 2010. Bilan de l'azote minéral au cours du cycle du riz pluvial sous systèmes de culture en semis direct sous couverture végétale en sol ferrallitique argileux à Madagascar. *Etude et Gestion des Sols* 17, 169-186.
- Ramisch, 2005. Inequality, agro-pastoral exchanges, and soil fertility gradients in southern Mali. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 105(1-2), 353-372.
- Razafimbelo, T.M., Albrecht, A., Oliver, R., Chevallier, T., Chapuis-Lardy, L., and Feller, C., 2008. Aggregate associated-C and physical protection in a tropical clayey soil under Malagasy conventional and no-tillage systems. *Soil and Tillage Research* 98, 140-149.
- Reeves, J. B., 2010. Near- versus mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil analysis emphasizing carbon and laboratory versus on-site analysis: Where are we and what needs to be done? *Geoderma*, 158(1-2), 3-14.
- Reig-Martínez, E., Gómez-Limón, J.A., and Picazo-Tadeo, A.J., 2011. Ranking farms with a composite indicator of sustainability. *Agricultural Economics* 42, 561-575.

- Riquier, J., 1968. Carte pédologique de Madagascar à l'échelle de 1:1000 000. Orstom, Tananarive,
- Rochette, P., Angers, D.A., Chantigny, M.H., MacDonald, J.D., Bissonnette, N., and Bertrand, N., 2009. Ammonia volatilization following surface application of urea to tilled and no-till soils: A laboratory comparison. *Soil Tillage Res.* 103, 310-315.
- Rosegrant, M.W., Paisner, M.S., Meijer, S., and Witcover, J., 2001. Global food projections to 2020: emerging trends and alternative futures. IFPRI, Washington, USA. p. 206
- Rotz, C.A., 2004. Management to reduce nitrogen losses in animal production. *Journal of Animal Science* 82, E119-E137.
- Rotz, C.A., Taube, F., Russelle, M.P., Oenema, J., Sanderson, M.A., and Wachendorf, M., 2005. Whole-farm perspectives of nutrient flows in grassland agriculture. *Crop Science* 45, 2139-2159.
- Rotz, C.A., Oenema, J., and van Keulen, H., 2006. Whole farm management to reduce nutrient losses from dairy farms: A simulation study. *Applied Engineering in Agriculture* 22, 773-784.
- Rovere, R.L., Keulen van, H., Hiernaux, P., Szonyi, J., and Schipper, A., 2008. Intensification scenarios in south-western Niger: Implications for revisiting fertilizer policy. *Food Policy* 33, 156-164.
- Ruben, R., Kruseman, G., and Kuyvenhoven, A., 2006. Strategies for sustainable intensification in East African highlands: labor use and input efficiency. *Agricultural Economics* 34, 167-181.
- Rufino, M.C., Rowe, E.C., Delve, R.J., and Giller, K.E., 2006. Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 112, 261-282.
- Rufino, M.C., Tiftonell, P., van Wijk, M.T., Castellanos-Navarrete, A., Delve, R.J., de Ridder, N., and Giller, K.E., 2007. Manure as a key resource within smallholder farming systems: Analysing farm-scale nutrient cycling efficiencies with the NUANCES framework. *Livestock Science* 112, 273-287.
- Rufino, M. C., 2008. Quantifying the contribution of croplivestock integration to African farming. PhD for Wageningen University, p. 293.
- Rufino, M.C., Hengsdijk, H., and Verhagen, A., 2009a. Analysing integration and diversity in agroecosystems by using indicators of network analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 84, 229-247.
- Rufino, M.C., Tiftonell, P.A., Reidsma, P., López-Ridaura, S., Hengsdijk, H., Giller, K.E., and Verhagen, A., 2009b. Network analysis of N flows and food self-sufficiency - a comparative study of crop-livestock systems of the highlands of East and southern Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 85, 169-186.
- Saggar, S. and Hedley, C.B., 2001. Estimating seasonal and annual carbon inputs, and root decomposition rates in a temperate pasture following field ¹⁴C pulse-labelling. *Plant and Soil* 236, 91-103.
- Saleem, M., 1998. Nutrient balance patterns in African livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 71, 241-254.
- Samad Houssein M., 2009. Diagnostic de la filière lait dans la région Alaotra Mangoro, cas de la zone d'Ambatondrazaka, mémoire de fin d'étude Université d'Antananarivo, Ecole supérieure des sciences agronomiques/ Projet laitier de la région Alaotra-Mangoro et Ile et Vilaine. 77 p.

- Samaké, O., Smaling, E.M.A., Kropff, M.J., Stomph, T.J., and Kodio, A., 2005. Effects of cultivation practices on spatial variation of soil fertility and millet yields in the Sahel of Mali. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 109, 335-345.
- Sanchez, P. A., 1977. Properties and Management of Soils in the Tropics. *Soil Science*, 124(3).
- Sanchez, P.A., Shepherd, K.D., Soule, M.J., Place, F.M., Buresh, R.J., Izac, A.M.N., Mokwunye, A.U., Kwesiga, F.R., Ndiritu, C.G., and Woomer, P.L., 1997. Soil Fertility Replenishment in Africa: An Investment in Natural Resource Capital. In: Buresh, R.J., Sanchez, P.A., and Calhoun, F. (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa*, 51 ed. SSSA, Madison, WI, pp. 1-46.
- Sanchez, P.A., 2002. Soil Fertility and Hunger in Africa. *Science* 295, 2019-2020.
- Sanchez, P.A., Palm, C.A., and Buol, S.W., 2003. Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics. *Geoderma* 114, 157-185.
- Sanchez, P.A. and Swaminathan, M.S., 2005. Hunger in Africa: the link between unhealthy people and unhealthy soils. *The Lancet* 365, 442-444.
- Schlecht, E. and Hiernaux, P., 2005. Beyond adding up inputs and outputs: process assessment and upscaling in modelling nutrient flows. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70, 303-319.
- Schouw, N.L., Danteravanich, S., Mosbaek, H., and Tjell, J.C., 2002. Composition of human excreta -- a case study from Southern Thailand. *Science of The Total Environment* 286, 155-166.
- Scoones, I. and Toulmin, C., 1995. Socio-economic dimensions of nutrient cycling in agropastoral systems in dryland Africa. In: Powell, J.M., Fernandez-Rivera, S., Williams, T.O., and Renard, C. (Eds.), *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of Sub-Saharan Africa Volume II: Technical Papers. Proceedings of an International Conference held in Addis Ababa, Ethiopia, 22-26 November 1993* ILCA, Addis Ababa, Ethiopia
- Scopel, E., Antoine, F., Enrique, C.G., and Marc, C., 2005. Impact of direct sowing mulch-based cropping systems on soil carbon, soil erosion and maize yield. *Agronomy for Sustainable Development* 25, 425-432.
- Shapouri, S., Rosen, S., Peters, M., Baquedano, F., and Allen, S., 2010. Food security assessment, 2010-20. USDA, Washington.
- Sheldrick, W., Keith Syers, J., and Lingard, J., 2003. Contribution of livestock excreta to nutrient balances. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 66, 119-131.
- Sheldrick, W.F. and Lingard, J., 2004. The use of nutrient audits to determine nutrient balances in Africa. *Food Policy* 29, 61-98.
- Simon, J.C., Grignani, C., Jacquet, A., Le Corre, L., and Pagès, J., 2000. Typologie des bilans d'azote de divers types d'exploitation agricole: recherche d'indicateurs de fonctionnement. *Agronomie* 20, 175-195.
- Smaling, E.M.A., Nandwa, S.M., and Janssen, B.H., 1997. Soil fertility in Africa is at stake. In: Buresh, R.J., Sanchez, P.A., Calhoun, F. (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa*. SSSA, Madison, WI, pp. 47-61.
- Smith, E., Gordon, R., Bourque, C., Campbell, A., Gqnermont, S., Rochette, P., and Mkhabela, M., 2009. Simulated management effects on ammonia emissions from field applied manure. *Journal of Environmental Management* 90, 2531-2536.

- Snijders, P., Onduru, D., Wouters, B., Gachimbi, L., Zake, J., Ebanyat, P., Ergano, K., Abduke, M., and van Keulen, H., 2009. Cattle manure management in East Africa: Review of manure quality and nutrient losses and scenarios for cattle and manure management. Report 258. Wageningen UR Livestock Research, p. 25.
- Sommer, S.G. and Hutchings, N.J., 2001. Ammonia emission from field applied manure and its reduction - invited paper. *European Journal of Agronomy* 15, 1-15.
- Sommer, S.G., Schjoerring, J.K., and Denmead, O.T., 2004. Ammonia Emission from Mineral Fertilizers and Fertilized Crops. *Advances in Agronomy* 82, 557-622.
- Stoorvogel, J. J. and Smaling, E. M. A., 1990. Assessment of soil nutrient depletion in sub-Saharan Africa: 1983-2000., Volume II. Nutrient balances per crop and per Land Use System., 4 ed. Soil and Water Research, Wageningen, The Netherlands, p. 158.
- Stoorvogel, J.J., Smaling, E.M.A., and Janssen, B.H., 1993. Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 35, 227-235.
- Tejada, M., Gonzalez, J.L., García-Martínez, A.M., and Parrado, J., 2008. Effects of different green manures on soil biological properties and maize yield. *Bioresource Technology* 99, 1758-1767.
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., Leffelaar, P.A., Shepherd, K.D., and Giller, K.E., 2005. Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya: II. Within-farm variability in resource allocation, nutrient flows and soil fertility status. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 110, 166-184.
- Tittonell, P., Leffelaar, P.A., Vanlauwe, B., van Wijk, M.T., and Giller, K.E., 2006. Exploring diversity of crop and soil management within smallholder African farms: A dynamic model for simulation of N balances and use efficiencies at field scale. *Agricultural Systems* 91, 71-101.
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., de Ridder, N., and Giller, K.E., 2007a. Heterogeneity of crop productivity and resource use efficiency within smallholder Kenyan farms: Soil fertility gradients or management intensity gradients? *Agricultural Systems* 94, 376-390.
- Tittonell, P., Zingore, S., van Wijk, M.T., Corbeels, M., and Giller, K.E., 2007b. Nutrient use efficiencies and crop responses to N, P and manure applications in Zimbabwean soils: Exploring management strategies across soil fertility gradients. *Field crops research* 100, 348-368.
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., Corbeels, M., Giller, K.E., 2008. Yield gaps, nutrient use efficiencies and responses to fertilisers by maize across heterogeneous smallholder farms in western Kenya. *Plant and Soil* 313, 19-37.
- Tittonell, Pablo A., 2008. Msimu wa Kupanda: Targeting resources within diverse, heterogeneous and dynamic farming systems of East Africa. PhD Thesis Wageningen University, The Netherlands. p 320.
- Tittonell, P., Scopel, E., Andrieu, N., Posthumus, H., Mapfumo, P., Corbeels, M., van Halsema, G.E., Lahmar, R., Lugandu, S., Rakotoarisoa, J., Mtambanengwe, F., Pound, B., Chikowo, R., Naudin, K., Triomphe, B., and Mkomwa, S., 2012. Agroecology-based aggradation-conservation agriculture (ABACO): Targeting innovations to combat soil degradation and food insecurity in semi-arid Africa. *Field Crop Res.* 132, 168-174.
- Todorov, V. and Marinova, D., 2011. Modelling sustainability. *Mathematics and Computers in Simulation* 81, 1397-1408.

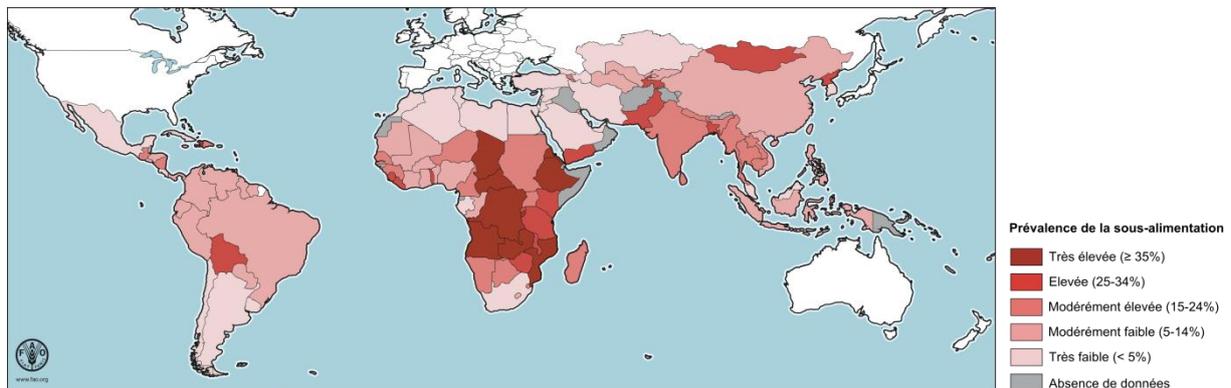
- Tran, Hiep, 2009. Qualification en Spectrométrie dans le Proche Infrarouge (SPIR) de l'azote et des fibres des ressources alimentaires et de leur utilisation digestive par le bétail laitier en milieu tropicaux (Réunion - Vietman). Université de la Réunion, Saint Denis (La Réunion), France, 163 p.
- Troccon, J.L., Berge, Ph., and Agabriel, J., 1988. Alimentation des veaux et génisses d'élevage. In: Jarrige, R. (Ed.), Alimentation des bovins, ovins et caprins. INRA Editions, Paris, pp. 201-212.
- Tsujimoto, Y., Horie, T., Randriamihary, H., Shiraiwa, T., and Homma, K., 2009. Soil management: The key factors for higher productivity in the fields utilizing the system of rice intensification (SRI) in the central highland of Madagascar. *Agricultural Systems* 100, 61-71.
- Udawatta, R.P. and Anderson, S.H., 2008. CT-measured pore characteristics of surface and subsurface soils influenced by agroforestry and grass buffers. *Geoderma* 145, 381-389.
- USDA Nutrient Data Laboratory, 2012. National Nutrient Database for Standard Reference. <http://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/list>
- Vågen, T., Andrianorofanomezana, M.A.A., and Andrianorofanomezana, S., 2006a. Deforestation and cultivation effects on characteristics of oxisols in the highlands of Madagascar. *Geoderma*, 131(1-2), 190-200.
- Vågen, T. and Shepherd, K.D., 2006b. Sensing landscape level change in soil fertility following deforestation and conversion in the highlands of Madagascar using Vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*, 133(3-4): 281-294.
- Valbuena, D., Erenstein, O., Homann-Kee Tui, S., Abdoulaye, T., Claessens, L., Duncan, A.J., Gérard, B., Rufino, M.C., Teufel, N., van Rooyen, A., and van Wijk, M.T., 2012. Conservation Agriculture in mixed crop-livestock systems: Scoping crop residue trade-offs in Sub-Saharan Africa and South Asia. *Field crops research*.
- Van Beek, C., Onduro, D., Gachimbi, L., and de Jager, A., 2009. Farm nitrogen flows of four farmer field schools in Kenya. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 83, 63-72.
- Van Calker, K.J., Berentsen, P.B.M., de Boer, I.M.J., Giesen, G.W.J., and Huirne, R.B.M., 2004. An LP-model to analyse economic and ecological sustainability on Dutch dairy farms: model presentation and application for experimental farm "de Marke". *Agricultural Systems* 82, 139-160.
- Van Cauwenbergh, N., Biala, K., Bielders, C., Brouckaert, V., Franchois, L., Garcia Ciudad, V., Hermy, M., Mathijs, E., Muys, B., Reijnders, J., Sauvenier, X., Valckx, J., Vanclooster, M., Van der Veken, B., Wauters, E., and Peeters, A., 2007. SAFE-A hierarchical framework for assessing the sustainability of agricultural systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 120, 229-242.
- Van den Bosch, H., Gitari, J.N., Ogara, V.N., Maobe, S., and Vlaming, J., 1998. Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON): III. Monitoring nutrient flows and balances in three districts in Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 71, 63-80.
- Vayssières, J., Guerrin, F., Paillat, J.M., and Lecomte, P., 2009. GAMEDE: A global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises Part I - Whole-farm dynamic model. *Agricultural Systems* 101, 128-138.
- Vayssières, J., Vigne, M., Alary, V., and Lecomte, P., 2011. Integrated participatory modelling of actual farms to support policy making on sustainable intensification. *Agricultural Systems* 104, 146-161.

- Vayssières, J. and Rufino, M.C., 2012. Managing nutrient cycles in crop and livestock systems with green technologies. In: Boye, J.I. and Arcand, Y. (Eds.), *Green Technologies in Food Production and Processing* Springer New York, New York, USA, pp. 151-182.
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J., and Skjemstad, J.O., 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131(1-2), 59-75.
- Wang, E., Robertson, M.J., Hammer, G.L., Carberry, P.S., Holzworth, D., Meinke, H., Chapman, S.C., Hargreaves, J.N.G., Huth, N.I., and McLean, G., 2002. Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM. *European Journal of Agronomy* 18, 121-140.
- WCED, 1987. *Brundtland Report. Our Common Future*. Oxford University Press, p. 387.
- Wijnhoud, J.D., Konboon, Y., and Lefroy, R.D.B., 2003. Nutrient budgets: sustainability assessment of rainfed lowland rice-based systems in northeast Thailand. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 100, 119-127.
- World Bank. 2011. Data World Bank. <http://data.worldbank.org/indicator>
- World Bank, 2012. Data World Bank. <http://data.worldbank.org/indicator>
- Yadvinder, S., Bijay, S., and Timsina, J., 2005. Crop Residue Management for Nutrient Cycling and Improving Soil Productivity in Rice-Based Cropping Systems in the Tropics. *Advances in Agronomy*, Volume 85 ed. Academic Press, pp. 269-407.
- Young, A., 1990. *Agroforestry for soil conservation*. 2 ed. CAB International. p. 276.
- Zebrowski, C.I. and Ratsimbazafy, C.I., 1979. Notice explicative n°83, Feuille Antsirabe. In: *Carte pédologique de Madagascar à 1:100 000*. Orstom, Paris. p. 114.
- Zingore, S., Murwira, H.K., Delve, R.J., and Giller, K.E., 2007a. Influence of nutrient management strategies on variability of soil fertility, crop yields and nutrient balances on smallholder farms in Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 119, 112-126.
- Zingore, S., Murwira, H.K., Delve, R.J., and Giller, K.E., 2007b. Soil type, management history and current resource allocation: Three dimensions regulating variability in crop productivity on African smallholder farms. *Field crops research* 101, 296-305.

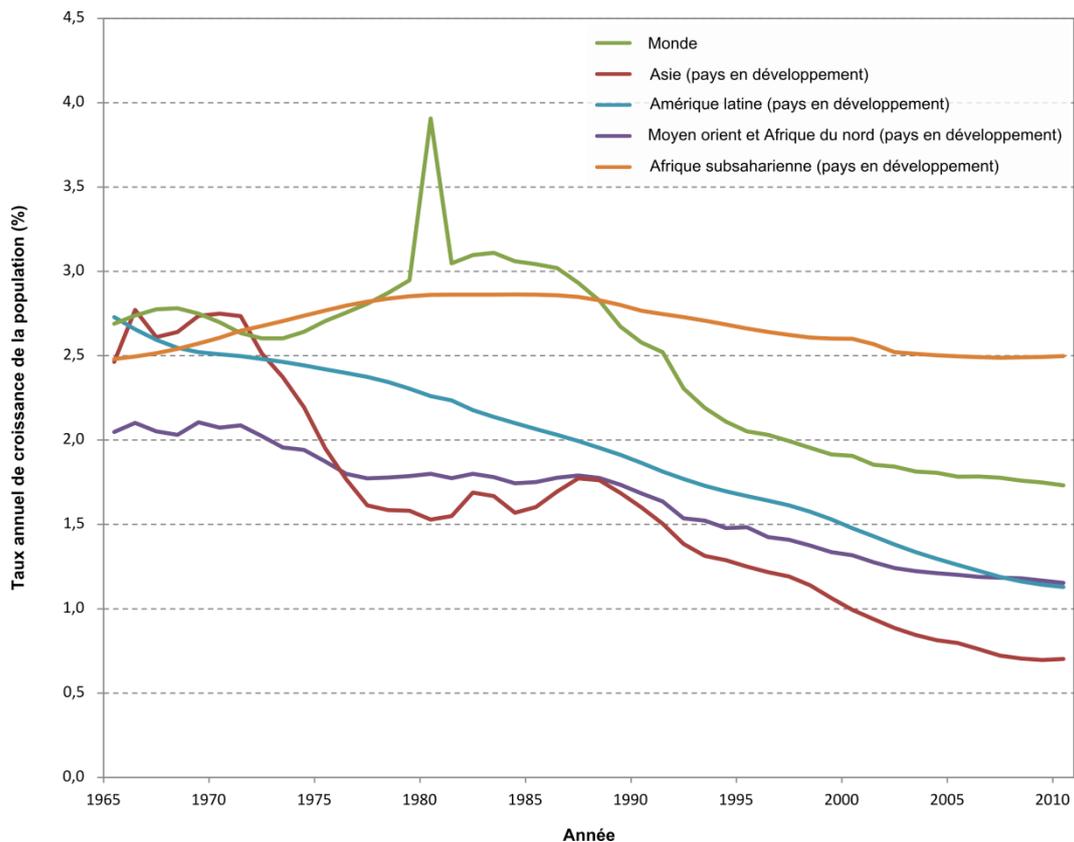
Annexes

Annexes Chapitre 1

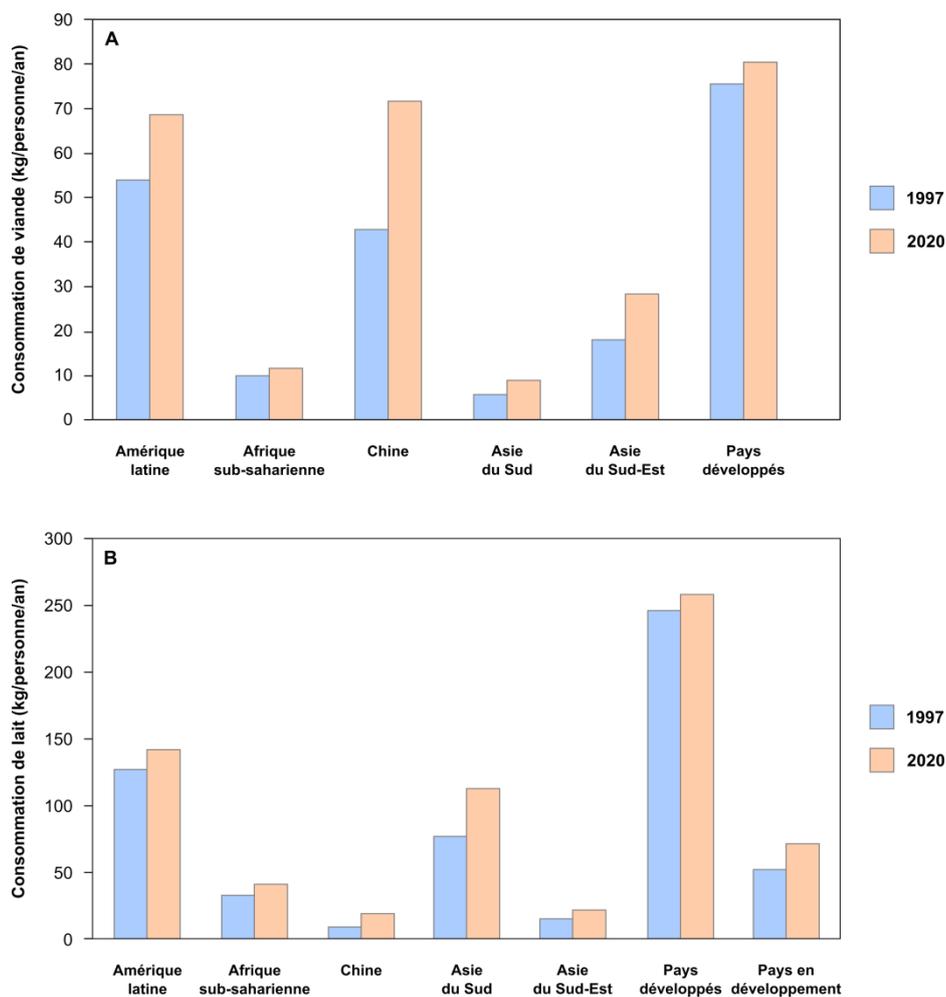
Annexe 1 : Carte de la sous-alimentation au niveau mondiale (Source : www.fao.org/hunger)



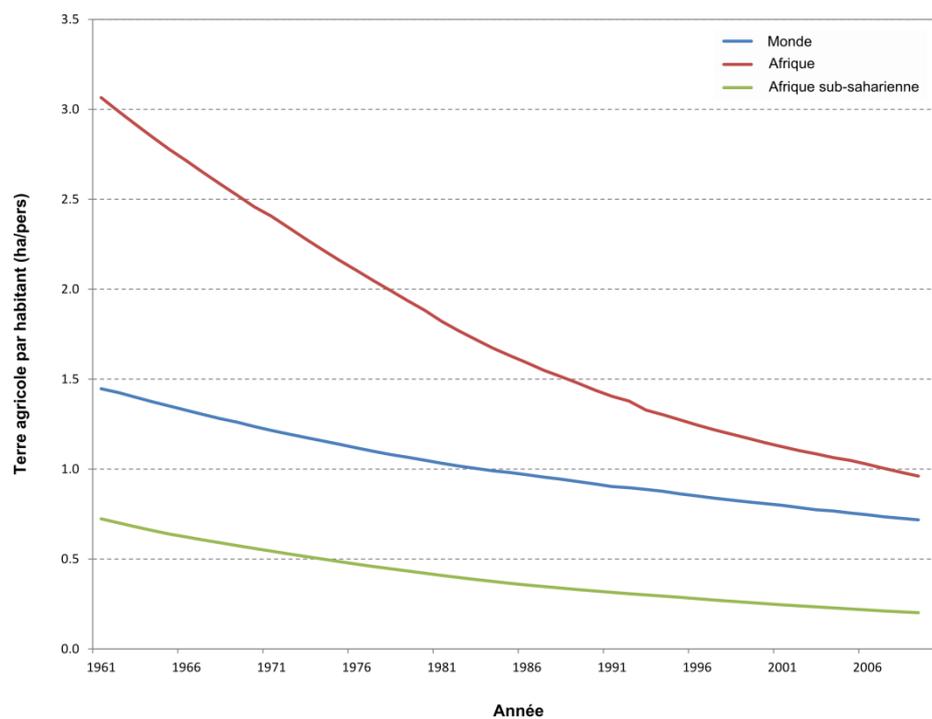
Annexe 2 : Evolution des taux annuels de croissance démographique mondial et des pays en développement (Source : World Bank, 2012).



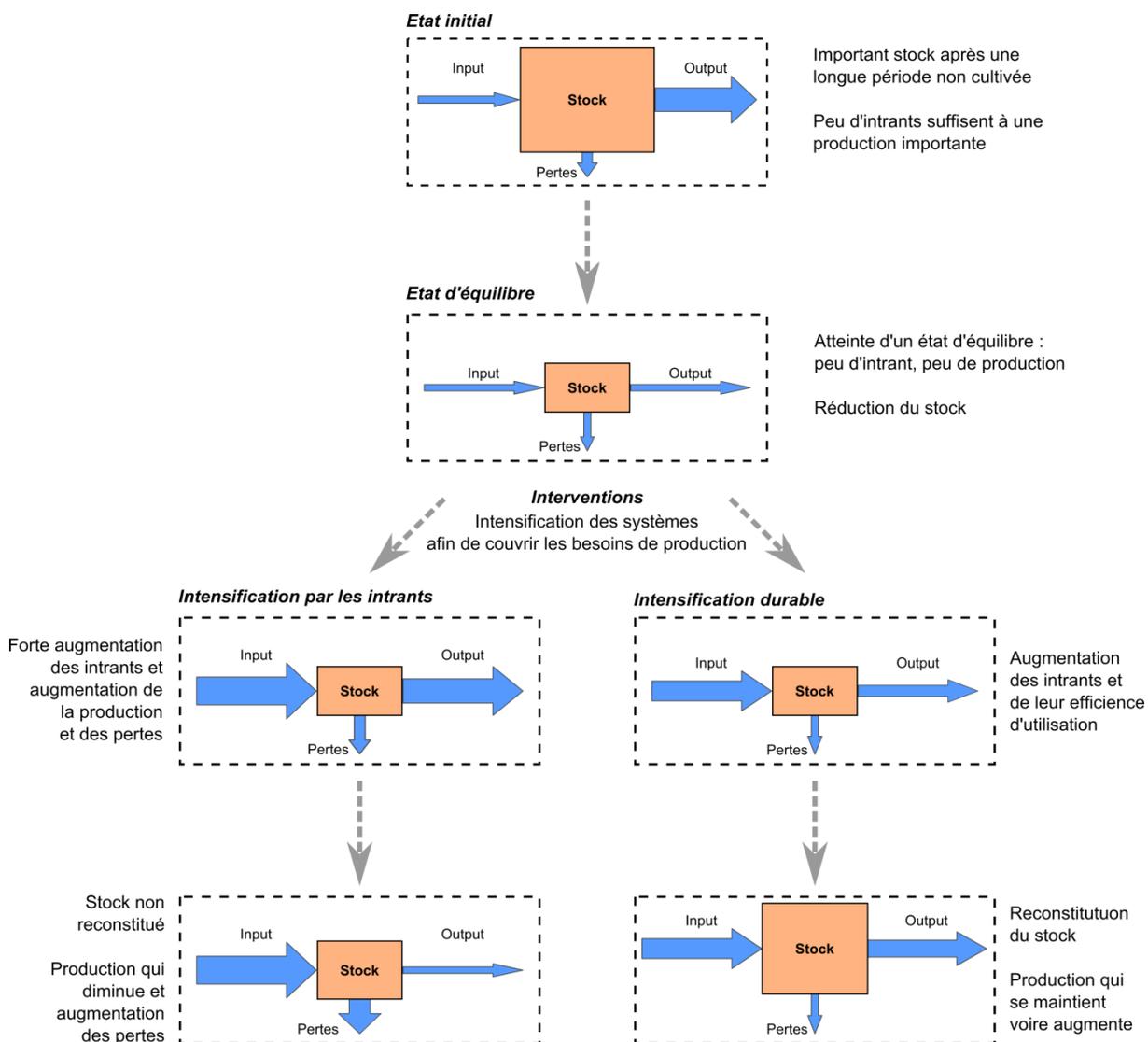
Annexe 3 : Evolution de la consommation en viande (A) et en lait (B) par personne (adapté de Rosegrant, 2001)



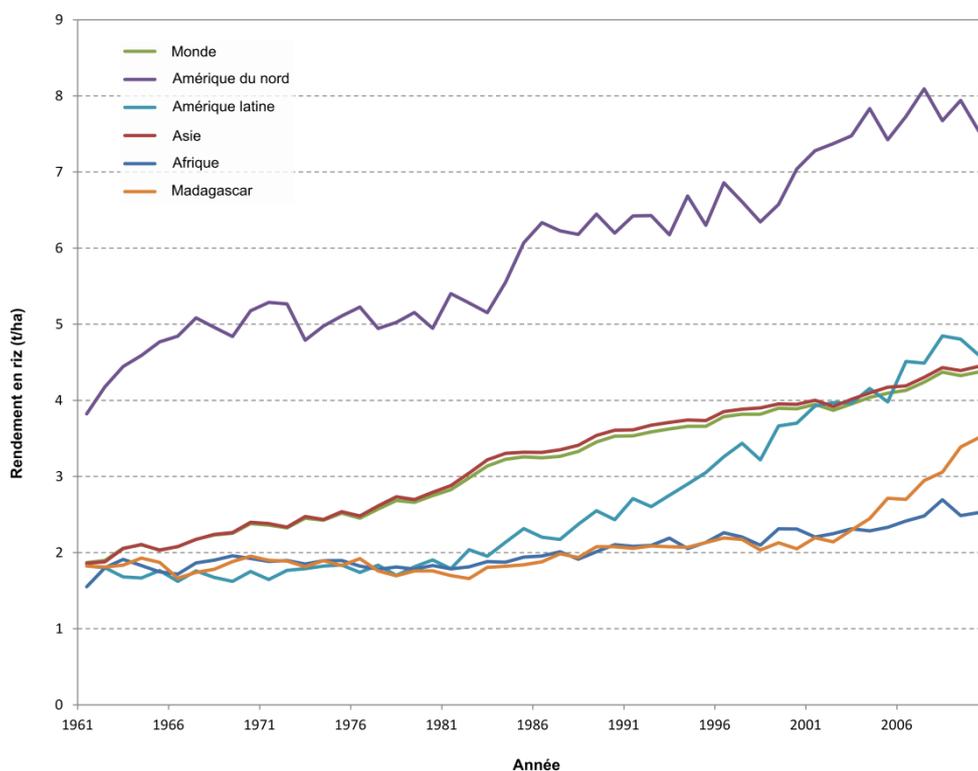
Annexe 4 : Evolution des surfaces agricoles par habitant au niveau mondial et en Afrique (Source : FAO, 2012)



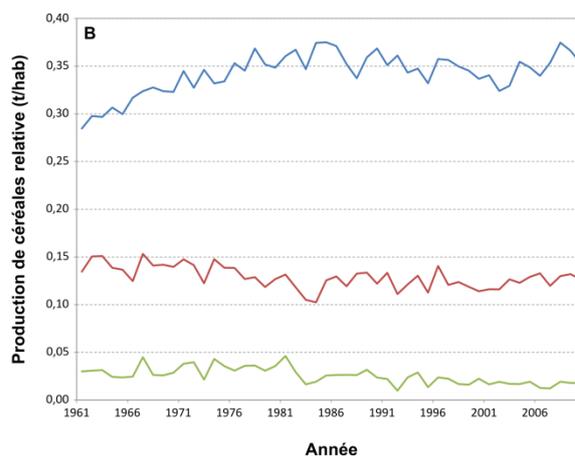
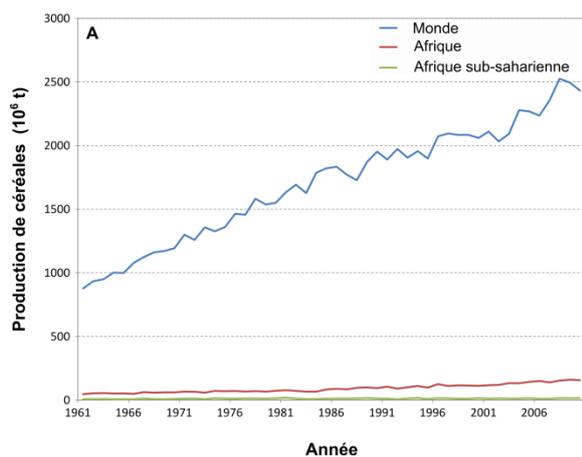
Annexe 5 : Représentation schématique de l'intensification (intensification classique par les intrants et intensification durable) dans le contexte de l'agriculture familiale (adapté de Tittone, 2007).



Annexe 6 : Evolution des rendements en riz entre 1961 et 2009 au niveau mondial et pour Madagascar (Source : FAO, 2012)



Annexe 7 : Evolution de la production mondiale et africaine de céréales, absolue (A) et relative à la population (B) (Source : FAO, 2012)

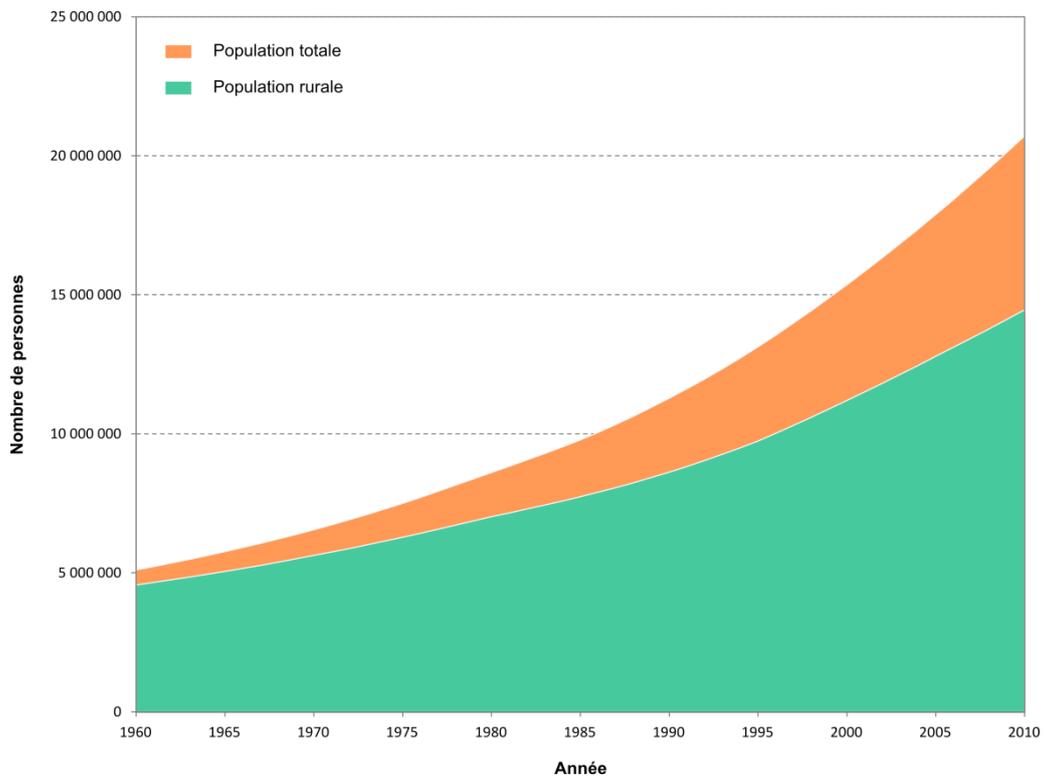


Annexe 8 : Matrice de classification des systèmes d'agriculture-élevage (d'après Schiere et al., 2002)

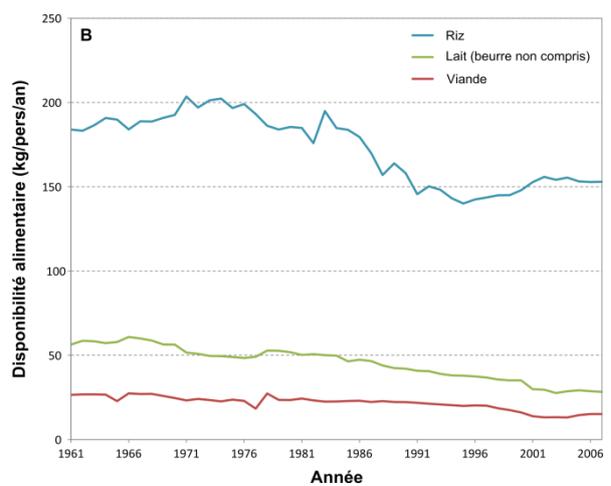
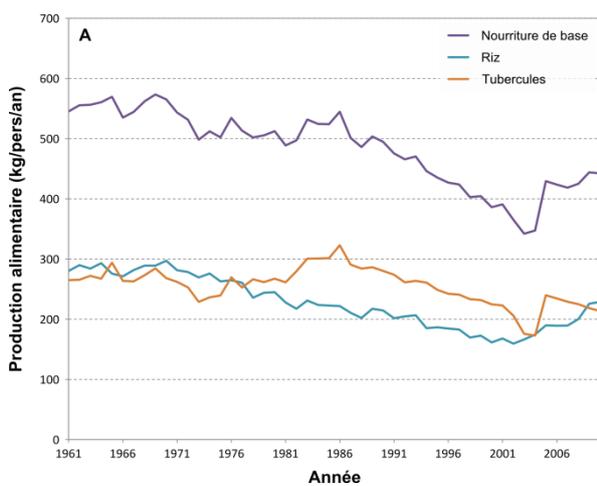
Mode of agriculture	Predominantly livestock	Mixed crop–livestock farming	Predominantly crops
Expansion agriculture (EXPAGR)	Nomadism, transhumance	Draught based on grazing of common lands	Shifting cultivation
	Wool, mutton, beef ranches in Australia and USA Grazing in Amazona Animals on peat soils, highlands and heavy clays: Scotland, Andes, South Holland	Dung from grazing on common land (infield–outfield) Konzentrationswirtschaft Maring pigs/shifting cultivation	Large scale grain production of Argentina, Russia and US Great Plains
Low external input agriculture (LEIA)	Landless animal keeping based on cutting of roadside grasses involution livestock systems	West African agro-pastoral systems	Extensive irrigated rice
		Alpine mixed systems Stall feeding based on roadside grass and crop residues Intensive dung collection during grazing Single yoke draught Thinning/stripping/intercropping of grain crops for fodder	Vegetable growing (in highlands) with no inputs Horticulture
High external input agriculture (HEIA)	Specialised dairy on heavy clay or peat in The Netherlands	Dairy or other livestock under coconuts or fruit trees	Vegetable horticulture
		Cut and carry with fertilised napier Dairy with fertilised fodder on arable soil in The Netherlands, Java Urban dairies, industrialised pig and poultry, feedlots	Greenhouse farming Industrial plantations High yielding varieties in irrigated grain crops
New conservation agriculture (NCA)	Legume based pastures	Straw treatment with ammonia or urea	Ecological farming
	New Zealand legume based dairy Fodder banks in Nigeria DE Marke (The Netherlands)	Specialised, limited input dairy or pig farming Ley systems Flemish system, Norfolk system	Multiple cropping Eastern UK grain systems Tree, fruits, walnuts and vegetables in California
	Dry season fattening	Animal crop systems in Mediterranean Cereal/legume leys Australia Pigs/feedlots with grain growing based on store/feeder animals Amish farming Alley farming with animals Mixed systems on heavy soils in The Netherlands Grass planting + water catchment	Florida fresh-market vegetable production Rice production in California, Lundberg family farms Mixed tree and food crop in humid tropics Alley farming in humid West Africa Rice cultivation pre-high yield varieties

^a It is difficult to draw sharp distinctions in the classification shown in rows 2–4 and columns 1–4.

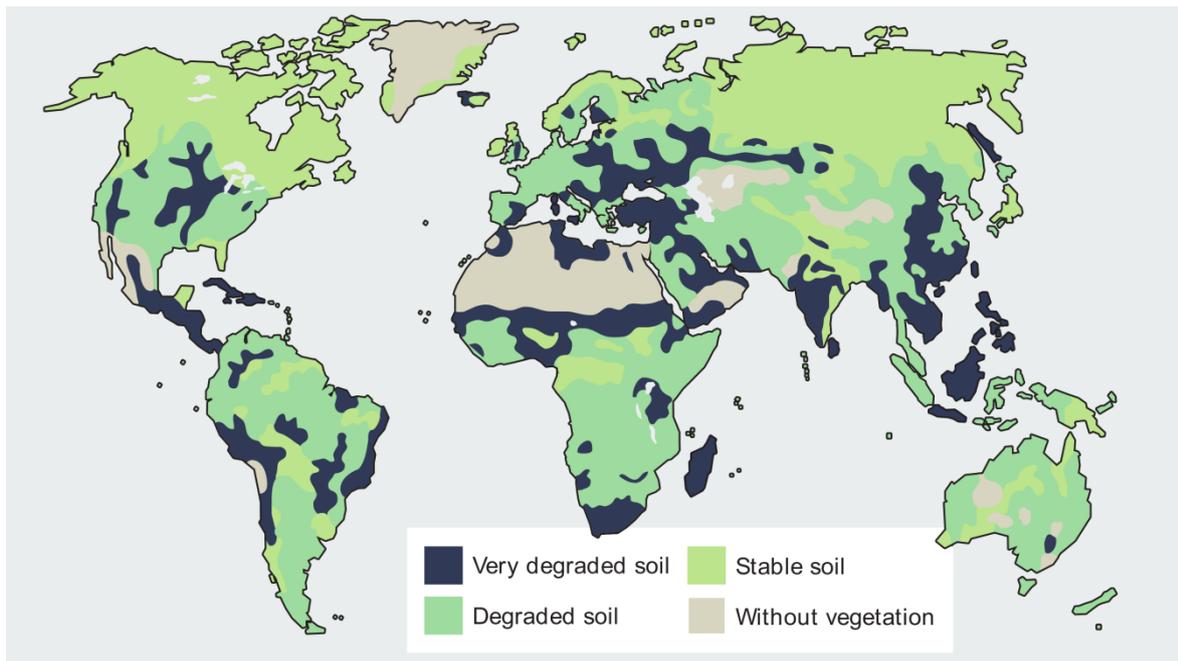
Annexe 9 : Croissance de la population totale et rurale de Madagascar entre 1960 et 2010
 (Sources : World Bank, 2012)



Annexe 10 : Evolution de la production alimentaire de base, en riz et en tubercules (A), et évolution de l'offre alimentaire (i.e. prenant en compte les productions, les importations et les exportations) en riz, lait et viande (B) à Madagascar (Source : FAO, 2012)

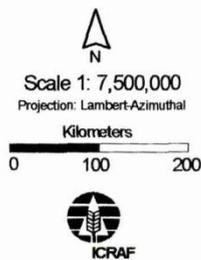
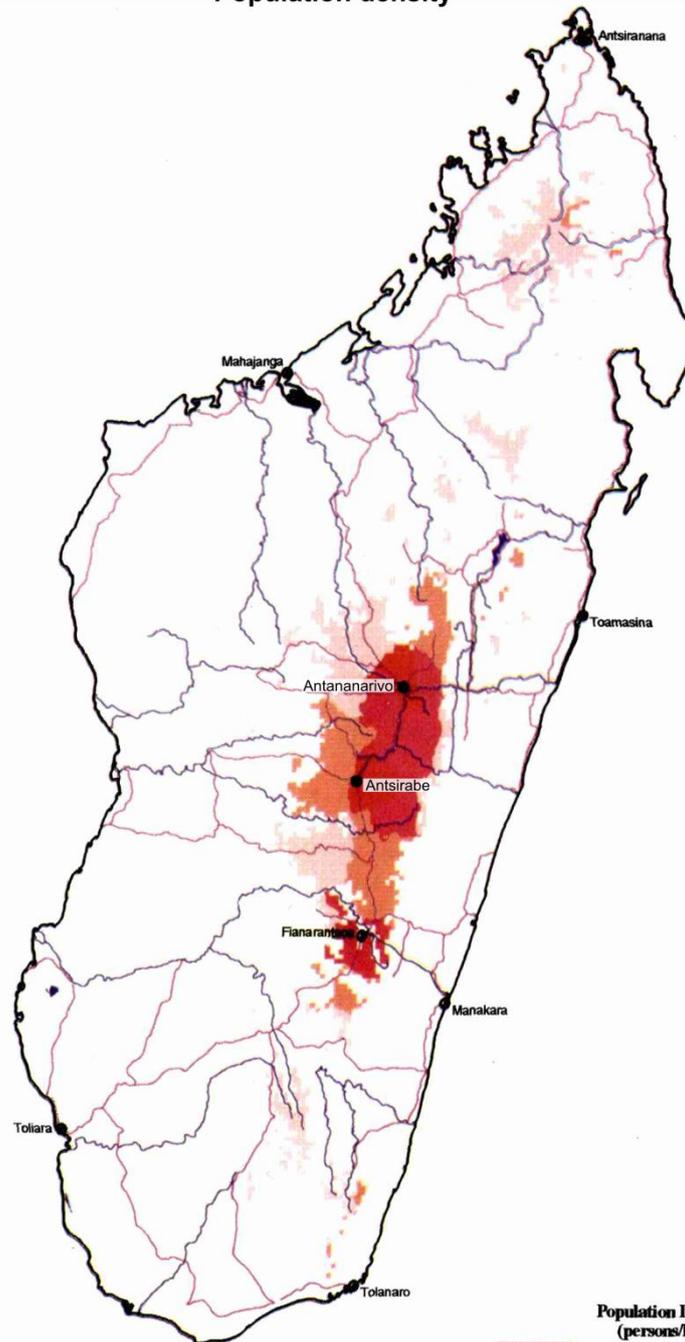


Annexe 11 : Carte de dégradation des sols (d'après Banwart, 2011)



Annexe 12 : Densité de la population dans les hauts plateaux malgaches (Source : Braun et al., 1997)

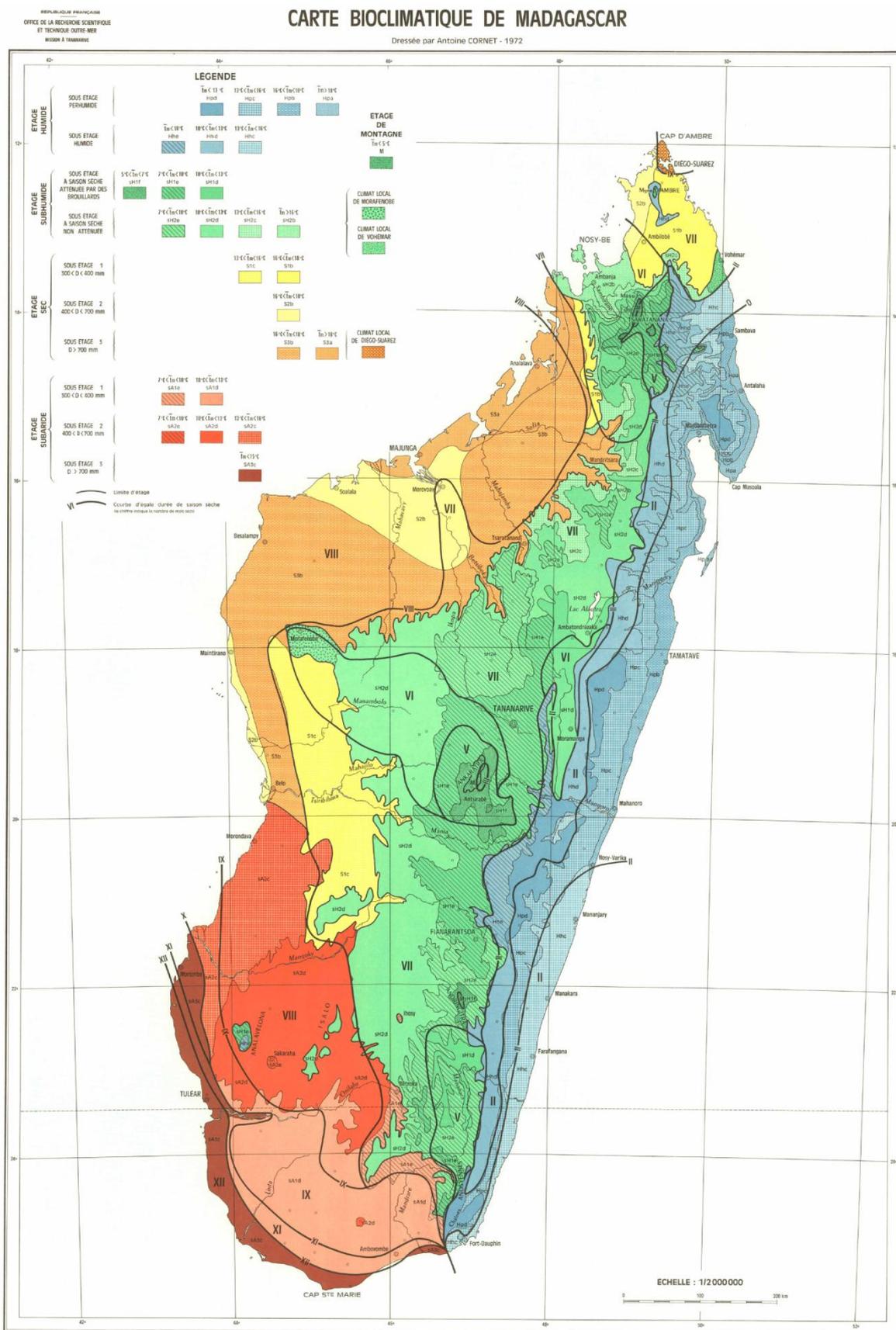
Madagascar Highlands:
Population density



Population Density (persons/km ²)	Area (1000 km ²)	Area (%)
0 - 25	29	45
25 - 75	17	26
75 - 175	14	22
> 175	5	7
area outside the highlands		
Towns		

Data Source: Deichmann, U., NCGIA, Dept. of Geography, University of California, USA

Annexe 13 : Carte bioclimatique de Madagascar (Source : IRD : www.cartographie.ird.fr)



Annexes Chapitre 2

Annexe 1 : Canevas de l'enquêtes par immersion ayant servie pour les quatres exploitation d'agriculture-élevage étudiées

Date: / ___ / ___ / 2009

FARM SURVEY

MODULE I

IDENTIFICATION OF THE FARM AND THE FAMILY

NUMERO OF THE FARMER : / ___ /

NAME OF THE HEAD OF THE FARM: / _____ /

LOCALISATION OF THE FARM: / _____ /

HITORY OF FAMILY AND FARM: Table I.1

	Year	Descriptions
Location of born		
Activities before farm installation in the farm (what, where,...)		
Installation		

Since installation

Land and property changes		
Cultural system changes		
Livestock system changes		
Family changes		
Changes (since de crisis, Tiko closed)		On cultures, livestock activities, on family...
Other events		
<i>Future</i>		
Future events		
Objectifs and project		

RELATIVE DECISIONS :**I.1 - Who is the decision maker on cropping system?**

/____/

1 - the head of the household

2 - a member of the family (precise) : _____

3 - a salaried assistant

4 – other (precise) : _____

I.2 - Who is the decision maker on livestock system?

/____/

1 - the head of the household

2 - a member of the family (precise) : _____

3 - a salaried assistant

4 – other (precise) : _____

CHARACTERISTICS OF THE HEAD OF THE FAMILY**I.3 - How old are you?**

/____/

I.4 - Which level of scolarity do you stop school?

/____/

1- No read. no write, 2- Primary school, 3- Middle school

4- High secondary school, 5- Technical diploma, 6- Apprentiship, 7- Other: _____

CHARACTERISTICS OF THE FAMILY MEMBERS**I.5 - How many members in the household or from outside are resident for more than 6 months in the farm (total)?**

/____/

I.6 - How many members of your family :

1) women

/____/

2) children

/____/

I.7 - How many relative members are in your charge ?

/____/

I.8 - How many children (your and relative) are in your charge for school ?

/____/

1) Primary school

/____/

2) Middle school

/____/

3) High secondary school

/____/

4) University

/____/

5) Technical

/____/

Table I.2: Activities of the family members.

	Cultural activities.			Livestock activities			No farm activities	
	Number	Type of activity	Duration ¹	Number	Type of activity	Duration ¹	Number	Type of activity
Men (adult)								
Women (adult)								
Children								

¹ **temps d'implication** : 1. temps plein, 2 mi temps (2-3 jours par semaines), 3. WE+vacances, 4. occasionnellement

LOCALISATION OF THE FARM :

I.9 - Village : / _____ /

I.10 - Quarter / Neighbourhood: / _____ /

I.11 - Situation of the village (plain, mountain...) :
/ _____
_____ /

I.12 - Accessibility of the farm : how the village is served (by a tray or a tarred road) ?
/ _____
_____ /

Accessibility of markets : Table I.3

Types of products (for selling and purchasing)	Name of market	Distance of the market/farm (in km)	Fréquence au marché	Type of transports (precise if personal, rented, borrowed)	Cost to go to the market (in Ar)
Crops					
Animals					
Dairy products					
Other (precise)					

MODULE II

LAND AND CROPPING SYSTEM

SECTION II.1 : LAND USE

DISTRIBUTION OF THE LAND ACQUISITION : Table II.1

Year of acquisition	Topo-séquence et type of land (1)	Origin (2)	Type de propriété / location (3)	Size (in ha)	Distance from house (in km)	Costs (for purchasing or renting)	How did you finance ? (4)

(1) Toposéquence et Type of land :

*Sommet tanety ; Sommet tanety terrasse ; Bas de pente ; Fond de vallée ; Pente
Ferallitique ; Volcanique ; Brun peu fertile ; Brun fertile ; Sableux*

(2) Origin :

1. purchasing, 2. inheritance, 3. donation (family, friend), 4. agrarian reform 5. renting

(3) Type de propriété/location :

*1. Private property (without duration), (precise duration: _____);
2. Private proverty for a detrmined duration
3. For renting with monetary rental charges,
4. Renting with rental charge in kind,
5. Free rental charge,
6. Permanent usual allocation,
7 Other : _____*

(4) Type of finances:

*1. Money from the sales of agricultural product,
2. Money from non agricultural activities,
3. Donation of the family,
4. Family loan,
5. Bank credit,
6. Other (precise) : _____*

II.1 – Have you left some lands?

1- Yes, 2- No

/___/

If yes, *Table II.2 (fill the table)*

Year of the session	To whose (1)	On which occasion (2)	Size of the plot (in ha)	Monetary compensation (in Ar)	Compensation in kind (3)	Do you leave? 1. <i>definitively</i> 2. <i>temporally</i>	Year of the recovery

(1) To whose ?:

- | | | |
|---------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 1. <i>Father,</i> | 2. <i>Mother,</i> | 3. <i>Husband/spouse,</i> |
| 4. <i>Child,</i> | 5. <i>Brother,</i> | 6. <i>Other parent,</i> |
| 7. <i>Neighbour,</i> | 8. <i>Head of the village,</i> | 9. <i>Other village resident</i> |
| 10. <i>State reserves</i> | 11. <i>Other (precise) : _____</i> | |

(2) For which occasion ?:

- | | |
|------------------------|----------------------------------|
| 1. <i>Inheritance,</i> | 2. <i>Land assistance,</i> |
| 3. <i>Urgent need,</i> | 4. <i>Other (precise): _____</i> |

(3) Compensation : Precise type and value

SUMMARY OF THE CROPPING ACTIVITIES Table II.4

Type of land*	Name of the crop	Type of products by crop	Estimate of the production (in kg/ha) ****			Part kept for the consumption and feed	Part stock >> one season (& more than 1 year)	Part sale	Unit price of sale (in Ar)	Sell to who ?
			H1	H2	D					
		-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-

****if grazing how many animals and how many days of grazing and how many ha?

SECTION SCV:

a) Do you know « SCV » ?

b) If yes, by who ?

c) Do you practice SCV ?

- if no, have you tried before and left it ?

- why, no ?

d) If yes, since when ?

e) Which kinds of technical itinerary (ITK) are used d'ITK ?

f) Have you made any changes from the originally proposed ITK ?

If yes, what ?

g) Do you want increase SCV surfaces ?

h) Would you encourage others farmers to do SCV ?

And why ?

II.2 - If you stock, where do you stock, what and how long ?

/ ___ /

- 1- hangar
- 2- house
- 3- outside
- 4- other : _____

II.3 - Why do you stock more than one season?

/ ___ /

- 1- to have better price
- 2- to secure the self consumption
- 3- to secure animal feed
- 4- other : _____

TRANSFORMATION OF CULTURAL PRODUCTS : Table II.5

Crops Products	Type of transformation (ensilage, other)	Costs of transformation (precise if equipment)

SECTION II.2 : LABOUR FACTOR**II.4 – How many do you have (may 2008 to juin 2009):**

- 1) permanent
- 2) sharecropper (métayer)
- 3) occasional

/ ___ /

/ ___ /

/ ___ /

FOR EACH SHARECROPPER : Table II.6

N° plots	Since when the plot is in sharecropping?	The basis of the sharecropping ? (partage of products, inputs, ...)

FOR EACH PERMANENT LABOURERS : Table II.7

N° permanent	Origin (1)	Duration of the contract (in years)	Main works <i>1. crops 2. animal / fodder</i>	Wage-earnings (2)	Since when? (3)

(1) Origin :

1. Same village, 2. Same state, 3. Village of origin of the farmer, 5. Town of a other state :

(2) Wage : *by month or by year according of the mode of payment*

(3) Since when ? : *since when does he work in your farm?*

OCCASIONAL LABOURERS PER CROP (Don't forget the fodder crop) : Table II.8

Type of land*	Crops	For which operation (you contract them)	How many salaries ?	How many days ? (by operation)	Unit price (per ha or per day)	Remarks
		-	-	-	-	
		-	-	-	-	
		-	-	-	-	
		-	-	-	-	
		-	-	-	-	
		-	-	-	-	
		-	-	-	-	
		-	-	-	-	
		-	-	-	-	
		-	-	-	-	

II.5 – How many hours is for you one day of work (for family and workers):

/ _____ /

1) Start of the day :

2) End of the day:

SECTION II.3 : OTHER INPUTS (TOOLS, FERTILISERS)

SUMMARY OF THE IMPLEMENTS IN THE HOLDING : Table II.9

Type of tool (precise in wood or metal)	Number	Mode of procurement (1)	Since when have you procured it?	Unit price (in Ar) (2)	Renting period per year : (precise how many hours/days per year ?)	Temps estimé pour le travail pour 1 ha ou temps nécessaire par jour
Tractor						
Beef / zebus (for traction)						

(1) Mode of procurement :

1. Purchasing,
4. Temporary loan,

2. Donation,
5. Subsidised purchasing,

3. Renting,
6. Other (precise) :

(2) Unit price: give the purchasing price or the rate of the renting (per hours or per ha, precise)

II.6 - If you have a *angady* could you estimate :

1) how many hours per day do you do ? /_____/

2) how many hours to cover 1 ha are necessary ? /_____/

If you have a *charrue* could you estimate :

1) how many hours per day do you do ? /_____/

2) how many hours to cover 1 ha are necessary ? /_____/

If you have a *semoir* could you estimate :

1) how many hours per day do you do ? /_____/

2) how many hours to cover 1 ha are necessary ? /_____/

II.7 - Do you use chemical fertilisers? 1- Yes, 2- No

/____/

If yes, fill the *Table II.10*

Type of land*	Crops	Type of fertilizer	Quantity used (total kg or bag, or kg/ha)			How much it cost ? (in Ar/kg or Ar/bag or total Ar/year)
			H1	H2	D	
		-	-			
		-	-			
		-	-			
		-	-			

II.8 - Do you use droppings or manure ? 1- Yes, 2- No

/____/

If yes, fill the *Table II.11*

Type of land*	Crops	Nature of the manure (1)	Quantity used (total kg or kg/ha)			How often do you use it every ? (2)	Do you buy a part? 1. yes 2. no	How many do you buy ? (kg/year)	How much it cost ? (in Ar/kg or Ar/year)
			H1	H2	D				
		-	-						
		-	-						
		-	-						

(1) Nature of the manure:

1. green manure crops
3. cow dung cakes
5. sheet/goat droppings
7. compost
9. other : _____

2. stalk and straw back to the field
4. animal grazing
6. crop waste/residue
8. poultry litter

(2) Periodicity :

1. season
3. two years
5. other : _____

2. year
4. three years

II.8 (bis) How is prepare manure ?

Animal bedding :

- Kind of bedding (vegetal or not) :
- King of vegetal used (straw/bozaka...) and how many :
- Where bedding comes from (purchases, harvest, forage refusal,...) :
- How long necessary to clean and change the bedding :
- Estimation of “used bedding” (in kg) change every days :

Manure :

- Which kind of excreta/bedding are collected (cattle, pork, poultry) :
- Others adding (straw, bozaka, waste...) and quantity added:
- Where they come from ?
- Where marue is stocked ?
- And how long ?
- Estimations of quantity of manure produced (per day, week, and/or year) :

II.8 (bis2) How is prepare “compost” ?

II.9 - Do you use other treatments (pesticide, insecticide, weedkiller) ? 1- Yes, 2- No /____/

If yes, fill the *Table II.12*

Type of land*	Crops	Type of treatments (insecticide, weedkiller, ...)	Quantity used (total kg or kg/ha)			How much it cost ? (in Ar/kg or Ar/bag or total Ar/year)	Where do you buy it ? (1)
			H1	H2	D		
		-	-				
		-	-				
		-	-				
		-	-				

(1) Where do you buy it ? :

1. market,

2. cooperative,

3. agricultural officer,

4. other (precise): _____

USE OF SEED: Table II.13

Type of land*	Crops	Type of seed ¹	Quantity used (kg/ha)			How much it cost ? (in Ar/kg or Ar/bag or total Ar/year Including the treatment of seed)
			H1	H2	D	
		-	-			
		-	-			
		-	-			
		-	-			

¹Type: specify if HYV, local seeds or other

SUMMARY THE CROPPING SYSTEM (by technology option): Table II.14

Type of land	Crops	Operation	Which technologies (AT, tractor, bike, manual, ...)	Which months or season	How many times ^a per operation ?	How many days per time ^a ?	Number (total) of persons working (nb/ha or nb/day)
		0. ploughing					
		1. transplanting					
		2. sowing					
		3. fertilizer					
		4. insecticide/fungi.					
		5. watering					
		6. weeding					
		7. harvesting****					
		0. ploughing					
		1. transplanting					
		2. sowing					
		3. fertilizer					
		4. insecticide/fungi.					
		5. watering					
		6. weeding					
		7. harvesting					

^a 1 time = 1 passages

****Think of harvesting for green fodder

MODULE III

PASTORAL AND AGRICULTURAL ACTIVITIES

SECTION III.1 : LIVESTOCK

III.1 - Do you have animals?

1- Yes, 2- No

/____/

STATE OF THE LIVESTOCK IN H2 2007 : Table III.1

Animal species. (precise)	Age	Nb	Number you buy in 2008 / 2009	Unit price of purchasing (in Ar)	How do you pay it? (1)	Number you sell in 2008 / 2009	Unit price of sale (in Ar)	Why do you sale them ? (2)
Zebu	Female adult							
	Male adult							
	Heifer							
	Young							
	Female calve							
	Male calve							
Cross (precise)	Female adult							
	Male adult							
	Heifer							
	Young							
	Female calve							
	Male calve							
PRN ou Holstein	Female adult							
	Male adult							
	Heifer							
	Young							
	Female calve							
	Male calve							
Horse								
Sheep								
Goat								
Poultry	egger							
	breeder							

(1) How do you pay them ? : 1. By cash, 2. By kind, 3. By credit, 4. Other : _____

(2) Why do you sale them:

1. Shortage of money,

3. To buy other thing. What ? _____

2. Too old,

4. Other : _____

III.2 – Have you animal birth between may 2008 / may 2009 ? 1- Yes, 2- No /

III.3 – If yes, 1) when ? /

2) how many female calve? /

3) how many male calve ? /

III.4 – Could you estimate the time nessary for animal maintenance & feed per day ? /

III.5 - Numbers of animals which give milk

(1) Zebu /

(2) Caw /

(3) Crossbred /

III.6 – Could you estimate the time nessary for animal milking per day ? /

III.7 – Which type of milking (manual or mechanic) ? _____

USE OF DRY AND GREEN FODDER : Table III.2

Animal species	Categorie	Which fodder et provenance (ext ou pas) (including grain, ensilage, green, residus straw)	Quantity used 2008-2009 (kg or bundles per day)		
			H1	H2	D
Zebu	Female adult	-	-	-	-
		-	-	-	-
		-	-	-	-
	Male adult	-			
		-			
		-			
		-			
	Heifer	-			
		-			
		-			
	Young	-			
		-			
		-			
	Female calve	-			
		-			
		-			
	Male calve	-			
		-			

Animal species	Categorie	Which fodder et provenance (ext ou pas) (including grain, ensilage, green, residus straw)	Quantity used 2008-2009 (kg or bundles per day)		
			H1	H2	D
Cross (precise)	Female adult	-	-	-	-
		-	-	-	-
		-	-	-	-
		-	-	-	-
	Male adult	-			
		-			
		-			
		-			
	Heifer	-			
		-			
		-			
	Young	-			
		-			
		-			
	Female calve	-			
		-			
	Male calve	-			
		-			

Off farm produced forage :

- Kind of grass / forage ?
- Harvest / purchased (price) ? Where ?
- Distance from house ? Who is the owner of land ?
- Used when ?
- How many times and how much is distributed per day ?

Animal species	Categorie	Which fodder (including grain, ensilage, green, residus straw)	Quantity used 2008-2009 (kg or bundles per day)		
			H1	H2	D
PRN ou Holstein	Female adult	-	-	-	-
		-	-	-	-
		-	-	-	-
		-	-	-	-
	Male adult	-			
		-			
		-			
		-			
	Heifer	-			
		-			
		-			
		-			
	Young	-			
		-			
		-			
		-			
	Female calve	-			
		-			
		-			
	Male calve	-			
		-			
		-			
Pig		-			
		-			
		-			
		-			
Poultry		-			
		-			
		-			

SELLING OF DRY AND GREEN FODDER : Table III.3

Type of fodder (including grain, ensilage, green, residus straw)	How many do you buy ? (kg/year)	When do you buy it ? (H1, H2, D)	Unit price (in Ar/unit)

USE OF CONCENTRATES OR FOODGRAINS : Table III.4

Composition of the <u>concentrates</u> (cake, mineral, cereal, pulses) Precise for the self foodgrains	How much it cost (precise the unit price)	Types of animals	How many kg per day?
		- - - -	- - - -
		- - - -	- - - -
		- - - -	- - - -

III.8 - How many litres of water do you give per animal? _____

/ _____ /

III. 9- Is it a constraint for you and why ? _____

RECEIPTS OF DAIRY ACTIVITY PER SEASON: Table III.4

Species	Production How many liters of milk per day?	How many liters do you keep for your self-consumption ?	How many liters do you sell ?	Where do you sell ? (1)	Unit price (in Ar/l)
Zebu	1. H1	1. H1	1. H1	1. H1	1. H1
	2. H2	2. H2	2. H2	2. H2	2. H2
	3. D	3. D	3. D	3. D	3. D
Cross	1. H1	1. H1	1. H1	1. H1	1. H1
	2. H2	2. H2	2. H2	2. H2	2. H2
	3. D	3. D	3. D	3. D	3. D
Holstein	1. H1	1. H1	1. H1	1. H1	1. H1
	2. H2	2. H2	2. H2	2. H2	2. H2
	3. D	3. D	3. D	3. D	3. D

(1) Where do you sell ?: 1. Cooperative, 2. Directly, 3. Traders (middle men), 4. Friends/family,

5. Other.(precise) _____

Specify all the source of sales.

III.10 - For breeders, how long do you keep the breeders before selling? / _____/

III.11 - How much do you pay chick? / _____/

III.12 - How many and how much do you sell it? / _____/

III.13 - How many eggs do you sell trough the year? / _____/

III.13 (bis) - The unit price of the egg? / _____/

III.14 - Where do you sell them? / _____/

III.13.2 - How many pigs do you sell trough the year? / _____/

III.13.2 (bis) - The unit price of one adult pig? / _____/

III.14.2- Where do you sell them? / _____/

III.14.3- Comment s'organise les "rotations" de porc?

OTHER RECEIPTS FROM ANIMAL (Cheese, butter...) : Table III.5

Species	Type of products	Production 2008-2009 (in kg)	Part sold	Where do you sell ?	Cost of Transformation	Unit selling price (in Ar/unit)
		H1. H2. D.	H1. H2. D.			
		H1. H2. D.	H1. H2. D.			
		H1. H2. D.	H1. H2. D.			
		H1. H2. D.	H1. H2. D.			

Table III.6 : EXPENDITURES FOR LIVESTOCKS

Types	Give details on each expense	Investment in Ar (precise the year)	Annual expenses in 2006 / 2007		
			H1	H2	D (prévues)
Shed (<i>étable</i>)					
Desease Veterinary					
Insemination Monte nat.					
Other					

MODULE IV

HAVE YOU A NON-ACRICULTURAL ACTIVITY ?

OTHER ACTIVITY : Table IV.1

Activity	Date of starting	Technical responsible (1)	Place of the activity (2)	Mode of financing (3)	Fixed costs (in Ar)	Variable costs in Ar/year	Annual return to the farm (in Ar)

(1) Technical responsible: 1. Head of the holding, 2. Spouse, 3. Children, 4. Other parent, 5. Salaried employee, 6. Tenant, 7. Other (precise) : _____

(2) Place of the activity: 1. At home, 2. In the village, 3. Outside (precise): _____

(3) Mode of financing : 1. Cash, 2. Loan near customers, 3. Loan near parents/friends, 4. Loan at the bank, 5. No need, 6. State programme, 7. Other (precise) : _____

IV.1 - Have you other source of incomes ? 1- Yes, 2- No /_____/

(Pension, Authority of the administration , Renting of land, Renting of house, allowance, other)

If yes, fill the Table IV.2

Origin (1)	Since ?	Amount per year (in Ar)	What do you plan to use it for? (2)	Remarks

(1) Origin: 1. Pension, 2. Authority of the administration, 3. Renting of land, 4. Renting of house, 4. Allowance, 5. Other (precise) : _____

(2) Destination: 1. Social need (food, education, health...), 2. Habitation, 3. Ceremonies, 4. Purchasing of land, 5. Equipment, 6. Livestock, 7. Inputs in agriculture, 8. Other (precise) : _____

MODULE V

MONETARY FLOW

SECTION V.1: CURRENT EXPENSES OF THE HOUSEHOLD

V.1 - Do you have expenses on education ? 1- Yes, 2- No /____/

EXPENDITURES ON EDUCATION : Table V.1

Sections	Number of children	Unit cost per children in registration	Unit cost per children in furniture <i>(dress, book, pen, ...)</i>	Total unit cost (in Ar)
Primary				
Middle				
Secondary				
High school				
Apprenticeship				

V.2 - Some children, have they had to stop school ? 1- Yes, 2- No /____/

V.3 - If yes, why ? /____/

- | | |
|--|--------------------------------------|
| 1. reduction of the incomes | 2. School no profitable |
| 3. Child (children) is gone working in town farm | 4. child (children) work on the farm |
| 5. Child (children) is gone to be married | 6. Children refuse to go school |
| 7. Other. (precise) : _____ | |

V.4 - Could you estimate the expenditures for health for the family in 2008-2009 ? /_____/

MAIN EXPENDITURES : Table V.2

Nature	Frequency of purchasing (1)	Where do you buy? (2)	Quantity (every time you buy or total)	Unit price (in Ar/kg)	Have you known some restrictions ? Explain
Maiz					
Rice					
Bean					
Wheat					
Other cereal*					
Edible oil					
Milk/ milk products					
Meat/egg/fish					
Vegetable/fruit					
Sugar/Salt					
Kerosene/fuel					
Clothes/shoe					
Other					

* Other cereal: mil, barley, sorgho....

(1) Frequency of purchasing : 1. Every day, 2. Every week, 3. Every two weeks, 4. Every month, 5. Every 6 months, 7. Every year, 8. Other (precise) : _____

(2) Where do you buy? : 1. Market, 2. Shop, 3. Itinerant trader, 5. Cooperative, 6. Others farmers, 7. Other (precise) : _____

V.5 - Did you have expenditures for ceremonies in 2008-2009 ? 1- Yes, 2- No / _____/

If yes, precise **Table V.3**

Nature	Amounts	Remarks
Mariages		
Festivals (carnaval)		
Died ceremonies		
Other :		

V.6 - Had you big expenditures (house, personal vehicule, etc.) in 2008-2009 ?

1- Yes, 2- No

/ _____/

V.7 - Precise the type of expenditure: / _____ /

V.8 - The amount of the expenditure: / _____ /

SECTION V.2 - CREDIT ACCESS / SAVING

V.9 - Have you resorted to credit ? 1- Yes, 2- No / _____ /

Table V.4 : CREDIT (COOPERATIVE, BANK, RELATIVES, MONEY LENDER, FRIENDS, ETC.)

Date	Source of credit (1)	Money borrowed (in Ar)	Interest rate	Duration (in months or years)	Mode of the repayment (2)	Required guarantee	Condition of the repayment (3)	Credit for which purpose? (4)

(1) Source of credit :

1. Parents/friend, 2. Loan to a association, 3. Bank, 4. Cooperative,
 5. Trader, 6. Private money lender in the village, 7. Private money lender in town,
 8. Other (precise) : _____

(2) Mode of repayment :

1. In money, 2. In kind: _____

(3) Condition of the repayment : 1. Already payed back, 2. Partially payed back, 3 No repayed yet

(4) Destination:

1. Social need (food, health, scolarity), 2. Habitation, 3. Ceremonies,
 4. Purchasing of land, 5. Purchasing of livestock, 9. Agricultural input,
 10. Activity non agricultural, 11. Other (precise): _____

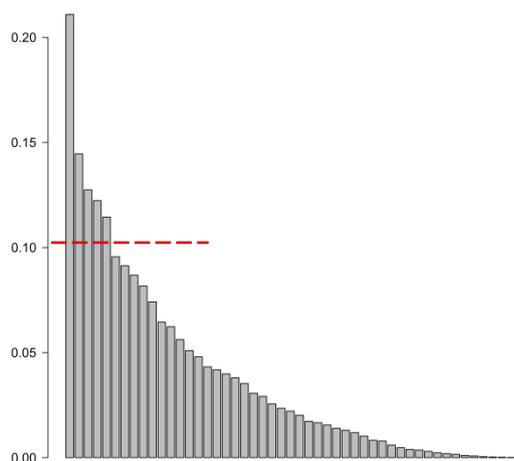
V.10 - Do you have a money security / saving ? 1- Yes, 2- No / _____ /

V.11 – If yes, where ? / _____ /

- 1- Bank
 2- At home
 3- Other : _____

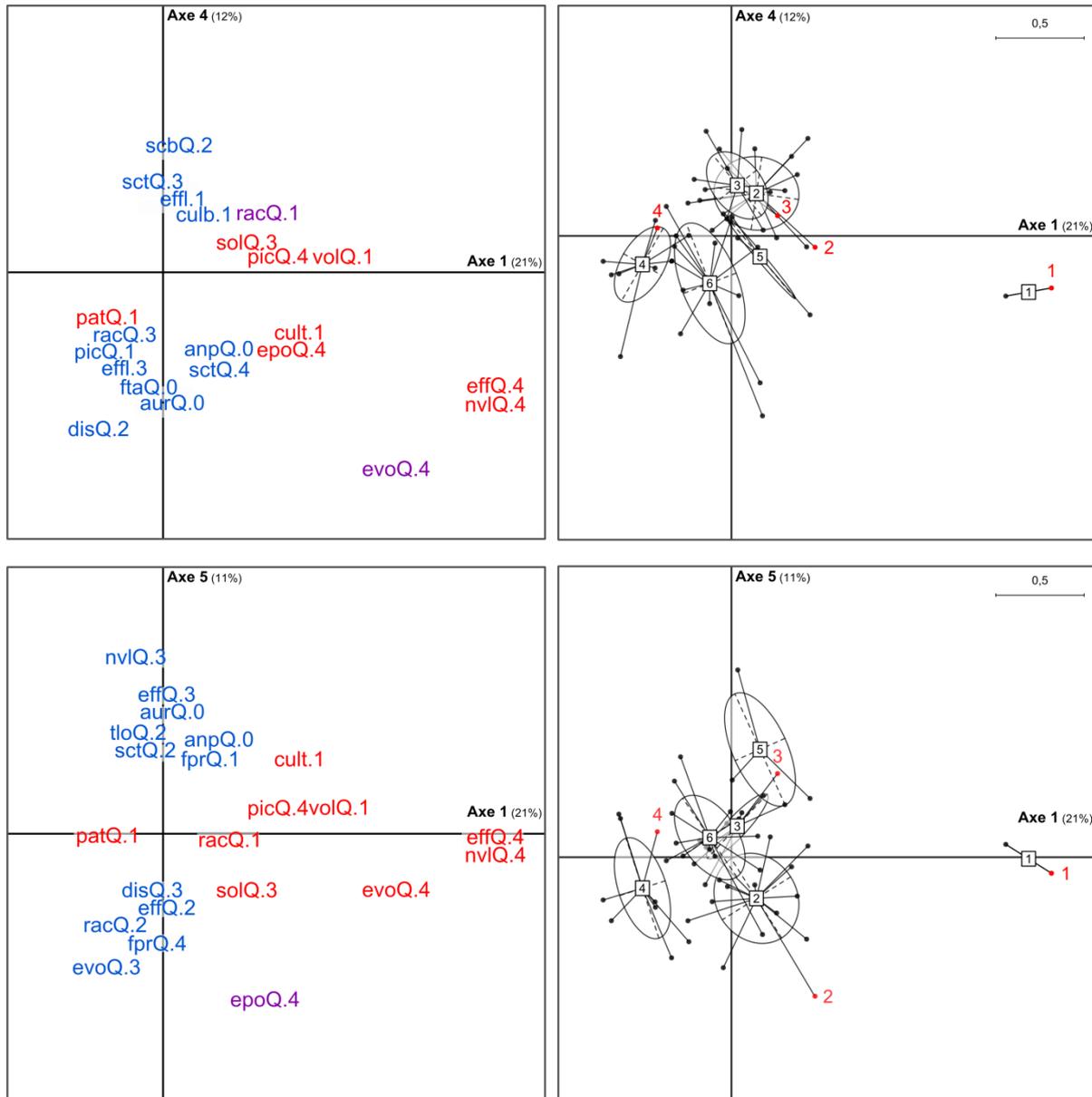
V.12 – Approximately, how much is your money security ? / _____ /

Annexe 2 : Composantes principales de l'Analyse Correspondances Multiples (ACM) et inerties des composantes principales



Composantes principales	Inertie par composante principale	Cumul des inerties	Ratio
1	0.211	0.211	0.110
2	0.145	0.356	0.185
3	0.127	0.483	0.251
4	0.122	0.605	0.314
5	0.114	0.720	0.374
6	0.096	0.815	0.423
7	0.091	0.907	0.471
8	0.087	0.994	0.516
9	0.082	1.075	0.558
10	0.074	1.149	0.597

Annexe 3 : Résultats de l'ACM sur les plans factoriels Axe 1-Axe 4 et Axe 1-Axe 5. Les modalités de couleur rouge sont explicatives de l'axe horizontal, Axe 1 ; celles en bleu sont des modalités explicatives des axes verticaux (Axe 4 ou Axe 5) ; celles en violets contribuent à l'explication de l'Axe 1 et de l'axe vertical.



Annexe 4 : Tableau de répartition des exploitations d'agriculture-élevage selon les modalités et les six groupes typologiques

Variable	Modalité	Groupes typologiques					
		1	2	3	4	5	6
District	disQ 1	2	6	8	3	1	3
	2	0	0	0	2	0	2
	3	0	8	1	4	2	8
Surface cultivable sur tanety	sctQ 1	0	0	5	3	1	3
	2	0	0	3	3	2	2
	3	0	9	1	1	0	2
	4	2	5	0	2	0	6
Surface cultivable en bas-fond	scbQ 1	0	2	3	7	1	1
	2	0	5	3	0	0	2
	3	1	5	1	1	2	7
	4	1	2	2	1	0	3
Effectif bovin laitier	effQ 1	0	4	7	7	0	3
	2	0	8	1	2	1	5
	3	0	2	1	0	2	5
	4	2	0	0	0	0	0
Effectif vaches laitières	nvIQ 1	0	3	8	9	0	5
	2	0	10	0	0	2	5
	3	0	1	1	0	1	3
	4	2	0	0	0	0	0
Race bovine dominante	racQ 1	2	9	5	0	2	1
	2	0	5	0	4	0	0
	3	0	0	4	5	1	12
Production laitière au pic	picQ 1	0	0	2	5	0	5
	2	0	5	6	2	1	5
	3	0	7	0	2	1	2
	4	2	2	1	0	1	1
Effectif porcin	epoQ 1	0	4	5	3	2	5
	2	0	2	3	5	0	4
	3	1	4	1	1	1	3
	4	1	4	0	0	0	1
Effectif volaille	evoQ 1	0	2	2	0	1	1
	2	0	9	7	2	2	11
	3	0	3	0	7	0	0
	4	2	0	0	0	0	1
Fourrage principal de la ration	fprQ 1	1	2	5	0	1	4
	2	0	7	3	6	2	5
	3	0	3	0	0	0	3
	4	1	2	1	3	0	1
Distribution de concentré	conQ 0	0	5	2	6	1	7
	1	2	9	7	3	2	6
Distribution des fourrages à volonté	volQ 0	0	12	5	9	3	13
	1	2	2	4	0	0	0

Variable	Modalité	Groupes typologiques					
		1	2	3	4	5	6
Présence de pâturage	patQ 0	2	10	9	2	3	3
	1	0	4	0	7	0	10
Conduite / logement de jour	tloQ 1	2	13	9	8	0	6
	2	0	1	0	1	3	7
Type de sol étable	solQ 1	0	7	5	7	0	10
	2	1	2	4	1	2	2
	3	1	5	0	1	1	1
Gestion des effluents d'élevage	effl 1	1	10	4	0	0	5
	2	0	1	2	2	2	1
	3	1	0	3	7	0	5
	4	0	3	0	0	1	2
Cultures sur tanety	cult 1	2	0	1	0	2	1
	2	0	6	3	4	0	3
	3	0	5	3	3	1	2
	4	0	3	2	2	0	7
Surface emblavée maxi sur tanety	sdtQ 1	0	9	5	7	0	6
	2	0	3	0	0	3	2
	3	2	2	4	2	0	5
Cultures en bas-fond	culb 1	2	10	5	1	1	3
	2	0	4	4	3	0	10
	3	0	0	0	5	2	0
Fourrage sur tanety	ftaQ 0	0	0	3	2	0	5
	1	2	14	6	7	3	8
Fourrage de contre-saison sur bas-fond	fcsQ 0	0	0	0	7	2	0
	1	2	14	9	2	1	13
Cultures de rente sur bas-fond	ccbQ 0	2	5	6	2	1	0
	1	0	9	3	7	2	13
Epannage en bas fond	epbQ 0	0	2	1	3	1	0
	1	2	12	8	6	2	13
Achat fumier	afuQ 0	2	11	4	5	3	6
	1	0	3	5	4	0	7
Vente fumier	vfuQ 0	2	11	6	6	2	10
	1	0	3	3	3	1	3
Achat engrais minéral NPK	anpQ 0	2	1	1	2	2	3
	1	0	13	8	7	1	10
Achat Urée	aurQ 0	0	1	0	1	2	1
	1	2	13	9	8	1	12

Annexe 5 : Détails des pratiques observées pour les quatre exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra

Exploitation 1

Cultures et fertilisation

L'Exploitation 1 cultive principalement du riz en bas-fond irrigué et des plantes fourragères sur tanety (8,0 ha) et dans les bas-fonds (1,6 ha) en contre saison (Tableau 6). Il peut exister certaines années une parcelle de maraîchages et/ou de patate douce, n'excédant pas en général 0,5 – 0,15 ha, mais cela n'est pas systématique. L'importance des surfaces fourragères cultivées (plus de 70% des surfaces cultivées) et la surface limitée en cultures vivrières indique une forte orientation « fourrage » des cultures.

Le riz est majoritairement destiné à l'autoconsommation (environ 80% de la production) et le reste vendu à environ 600 Ar/kg. Les travaux de préparation du sol des rizières de bas-fond ont lieu de septembre à décembre avec une main d'œuvre majoritairement extérieure. Les travaux de labour sont réalisés soit à l'aide de charrues à traction animale et l'emploi d'une main d'œuvre permanente pour les parcelles accessibles, soit à l'aide de l'angady et l'emploi d'une main d'œuvre extérieure à 1500 Ar/personne/jour, pour les parcelles plus difficiles d'accès. La pépinière de riz (parcelles où sont préparés les jeunes plants de riz) est en général fertilisée avec 1 à 2 charrettes (ici environ 500 kg MB de fumier par charrette) de fumier pour 5 ares. Cependant, aucune fertilisation, organique ou minérale, n'est apportée à la culture de riz. Le semis du riz (octobre-novembre), le repiquage des plants de riz (décembre), le sarclage (1 fois de janvier-février) et la récolte et le battage (avril-mai) sont pris en charge par de la main d'œuvre extérieure. Au total près de 825 jours-hommes ont été employés de juillet à mai à raison de 1500 Ar/j, soit environ 182 Ar/kg de riz paddy produit. Les pailles de riz (mololo) sont conservées pour l'alimentation des bovins.

Contrairement aux trois autres cas d'étude, le maïs est considéré comme une plante fourragère puisqu'il est destiné essentiellement à la fabrication d'ensilage (maïs-ensilage) pour l'alimentation des bovins laitiers de juillet à décembre. La production totale de tiges et d'épis (au stade laiteux) de maïs est estimée environ 29 t MS par an ; elles serviront à remplir six fosses d'ensilage de 12 m³ chacune. Le maïs-ensilage est la culture de tanety qui reçoit le plus de fertilisant organique (Tableau 6), mais la quantité de fumier épandu varie « selon les disponibilités en fumier » de l'exploitation. La fertilisation des parcelles de maïs-ensilage est effectuée soit avant le labour (août à septembre) ou dans les sillons du semis (de décembre à janvier). L'essentiel des travaux culturaux (labour, semis, sarclage et hachage des plants) sont réalisés avec de la main d'œuvre permanente ; seule la récolte nécessite de la main d'œuvre extérieure temporaire (36 jours-hommes à 1500 Ar/j).

La culture d'avoine et de ray-grass en association (mélange des semences avant le semis, appelé par la suite « avoine - de ray-grass ») occupe 40 % de la surface de bas-fond en contre-saison (Tableau 6) et est entièrement destinée à l'alimentation de l'élevage bovin laitier, de juin à fin octobre. Cette culture est la plus intensément fertilisée : apport d'engrais organique après le hersage (de mai à juillet) à raison de 1 charrette de fumier/are (Tableau 6), et 1 kg/are d'engrais minéral (urée) appliqué après chacune des 2 ou 3 coupes effectuées sur la saison. Il est à noter que la culture de riz bénéficie indirectement d'une partie de cette fertilisation apporté en contre-saison.

Le kizosi (*Pennisetum purpureum* Schumach. cv. Kizosi) constitue la principale ressource fourragère de l'élevage bovin durant la saison humide. Cinq coupes par an peuvent être réalisées de décembre à

avril, avec un mois d'intervalle entre chaque coupe. Les parcelles de kizozi sont re-plantées tous les cinq ans (janvier-février). La fertilisation, organique uniquement, est en moyenne de 1 charrette de fumier pour 4 ares appliquée chaque année de novembre à décembre. Il s'agit de la troisième culture la plus abondamment amendée (Tableau 6).

La culture de radis fourrager s'étend au total sur 1 ha de tanety, mais elle est répartie dans le temps, avec deux semis en février et avril-mai. Les épandages de fumier (en moyenne 1 charrette pour 15 ares) ont lieu juste avant le semis. L'ensemble de la production de tiges et de tubercules est destinée à l'alimentation des bovins laitiers durant la période de soudure, d'avril à juin.

De manière général, les travaux d'épandage du fumier sont réalisés majoritairement par de la main d'œuvre extérieure, les ouvriers permanents se chargeant plus particulièrement de conduire les charrettes sur les parcelles.

Elevages, alimentation et gestion des effluents

Le troupeau laitier est en stabulation permanente et les animaux ne sortent que deux fois par jour pour être abreuvés. L'exploitant pratique l'allotement : les vaches laitières sont séparées des génisses et des jeunes animaux. Tous les bovins laitiers sont nourris avec des fourrages produits sur l'exploitation et seules les vaches laitières en production reçoivent des aliments concentrés achetés (provende et drèche de brasserie) (Tableau 7). La quantité moyenne de concentré distribuée quotidiennement par vache en lactation est de quatre à cinq fois supérieure à celle des deux autres exploitations utilisant du concentré. Les achats de concentrés (73 t MS/an) représentent près de 54% du total des importations de matière sèche de l'exploitation (i.e. achats d'engrais minéral, achat d'aliments pour l'élevage, achats de bozaka pour les litières, importations de bozaka par les pâtures, achat d'animaux, achats d'aliments pour la famille,). Les fourrages sauvages (bozaka) ne sont jamais utilisés pour l'alimentation des bovins laitiers (Tableau 7).

En moyenne, 80% des 21 vaches laitières sont en lactation. Cependant l'exploitant essaye de regrouper les naissances au début de la saison sèche (avril à juillet) pour bénéficier d'un prix du lait plus élevé, à une période où le prix des matières premières est relativement bas (post-récolte) et les troubles sanitaires moins fréquents. La production de lait, 230 L/j en moyenne, est presque entièrement transformée sur l'exploitation pour la commercialisation de fromages, beurre et crème. Environ 70 L/j de lait supplémentaire est acheté pour l'atelier de transformation. Près de 120 fromages de 200-250 g MB sont fabriqués quotidiennement ce qui représente au total environ 6 t MS de produits laitiers vendus annuellement (Figure 11). Les sous-produits de la transformation du lait (lactosérum) sont redistribués à l'élevage porcin. Les veaux, taurillons et le taureau reproducteur (après 2 ans environ sur l'exploitation) sont vendus à la boucherie. Le prix de vente des jeunes oscille entre 1200 et 1400 Ar/kg de poids vif (PV) et celui du taureau reproducteur s'élève à 1500 Ar/kg de PV.

Les zébus sont conduits au pâturage (9h à 17h) sur des terres communales (tanety) et parqués à l'étable la nuit. En complément du pâturage, le troupeau de zébus est alimenté avec de la paille de riz (3 kg MB/jour/zébu) et, lorsque les animaux travaillent, avec des drèches (5 kg MB/jour/zébu). Pendant les travaux agricoles nécessitant de la traction animale, les zébus ne travaillent que le matin (6h à 12h).

L'élevage intensif de poules pondeuses (bandes de 500 têtes environ) est irrégulier avec un arrêt d'activité pouvant durer 5-6 mois entre 2 bandes successives. Les poules sont élevés dans des bâtiments spécialisés et nourries avec de la provende « spécial poule-pondeuse » achetée (environ

150 g MB/jour/poule). La vente des œufs génère entre 140 à 200 Ar/œuf. Lorsque la productivité des poules pondeuses diminue, les animaux sont vendus progressivement (7 000 Ar/tête), jusqu'à l'arrêt complet de l'activité. Une personne est employée à plein temps sur cette activité. Des volailles de basse-cour (30 têtes environ) sont élevées en permanence et sont destinées à l'autoconsommation (environ un animal et une douzaine d'œuf par semaine). Leur alimentation est basée sur le maïs et le riz achetés ou produits sur l'exploitation. L'exploitation possède également un élevage porcin de type « naisseur-engraisseur ». Il s'agit d'un élevage intensifié, basé sur une race améliorée européenne (type Large White), une porcherie « en dure » (sol en béton et mangeoire en pierre) et subdivisée en box pour l'allotement des animaux. Jusqu'en 2008, il y avait en permanence dans l'exploitation une à deux truies, 50 jeunes et 30 porcelets. En fin d'engraissement (6 mois d'âge), les porcs pèsent environ 120 kg et sont commercialisés au prix moyen de 3 500 Ar/kg PV. Depuis, en raison du manque de place, l'exploitant a réduit l'effectif porcin. L'objectif de l'exploitant est de convertir progressivement l'atelier en atelier « naisseur » (vente des porcelets à 70 000 Ar/tête) et atteindre 10 truies reproductrices, 5 cycles de reproduction tous les 2 ans et 10 porcelets par cycle. Là aussi, un employé est spécifiquement chargé de l'alimentation des porcs et de l'entretien des bâtiments. L'alimentation des porcs est basée sur l'achat de provende « croissance-porc » (2 kg MB/jour/tête) composée principalement de maïs et de son de riz et sur le lactosérum issu de la fabrication des fromages sur l'exploitation.

Exploitation 2

Cultures et fertilisation

Les cultures principales (en termes de surface) de l'Exploitation 2 sont le riz, la patate douce, la pomme de terre et le blé (Tableau 6). Ces deux dernières sont des cultures de rente essentiellement destinées à la commercialisation. Les cultures fourragères implantées sont l'association avoine – ray-grass et le brachiaria ; le kizozu servant de délimitation entre les parcelles. Une surface d'environ 0,5 ha de SCV a été mise en place ; il s'agit principalement de rotation riz pluvial – brachiaria, ou avoine - brachiaria.

Près de 88% de la production totale de riz paddy est autoconsommées sur l'exploitation, soit environ 4,5 t MS de riz par an. Les travaux de préparation des sols (août à décembre) pour les rizières de bas-fond (1,9 ha) sont réalisés à l'aide de la traction animale et principalement avec de la main d'œuvre payée quotidiennement. La récolte manuelle du riz irrigué peut s'étendre de mars à mai. La fertilisation organique du riz ne concerne que les parcelles de riz pluvial sur *tanety* (10 charrettes d'environ 375 kg MB chacune pour 27 ares) et la pépinière de riz (2 charrettes pour 7 ares). Les parcelles de riz irrigué (en bas-fonds) ne sont donc pas directement fertilisées avec du fumier. La surface en riz pluvial sur *tanety* est répartie sur deux parcelles : une première parcelle (0,15 ha) de riz seul (labour et semis à la volée) et une seconde parcelle (0,15 ha) sous SCV avec mulch de brachiaria et semis au poquet. Le brachiaria peut être coupé cinq fois ; les quatre premières coupes sont destinées à l'alimentation des vaches laitières et la dernière coupe est redéposée sur le sol afin de constituer le mulch. Le contrôle du brachiaria se fait de manière chimique (glyphosate). D'autres intrants comme les pesticides sont utilisés dans les rizières.

Les cultures de la patate douce et de la pomme de terre participent à l'alimentation humaine et animale (ration des porcs d'engraissement, complément pour vaches laitières). Les pommes de

terre, comme le blé, sont mises en culture en contre-saison, dans les parcelles de bas-fond. Ne pouvant être stockées que quelques mois, le surplus de pomme de terre, environ 16% la production totale est commercialisé (Tableau 6). Tandis que la culture de patate douce est assez peu fertilisée (pas d'engrais minéral, peu de fumier), la culture de la pomme de terre est au contraire celle qui reçoit le plus de fumier (Tableau 6). La culture de blé est elle aussi fortement amendé. Le blé est presque totalement destiné à la commercialisation ; une partie des grains est cependant conservée comme semences. La culture d'avoine - ray-grass est mise en place dans les bas-fonds pour l'alimentation des vaches laitières ; il s'agit de la troisième culture recevant le plus de fumier après la pomme de terre et le blé. L'exploitation achète chaque année de l'engrais minéral (environ 500 kg de NPK et 250 kg d'urée) destiné principalement aux cultures de blé, de pomme de terre et d'avoine - ray-grass. Le maïs est semé seul ou en association avec la patate douce, les haricots ou le taro. Il est essentiellement cultivé pour la production de grains destinée à l'alimentation des porcs et des volailles. Sur une surface limitée (0,15 ha), maïs et haricot sont associés avec une plante de couverture fourragère (brachiaria ou avoine) dans des systèmes SCV. Les premières coupes fourragères sont réservées aux bovins laitiers et la dernière utilisée comme mulch sur le culture principale

Elevages, alimentation et gestion des effluents

Les bovins laitiers sont nourris principalement avec des fourrages sauvages (bozaka), des fourrages verts (brachiaria, kizozi, avoine) et du mololo (pailles de riz et de blé) produits sur l'exploitation, et des concentrés achetés (Tableau 7). Les imports de bozaka pour les vaches laitières représentent 38% du total de la matière sèche importée sur l'exploitation, et les achats de concentrés seulement 6%. Durant la période de récolte des patates douces, l'exploitation utilise un mélange de patates douces cuites et de son de riz en remplacement de la provende.

La reproduction est assurée par la monte naturelle de taureaux de race PRN. Les velles nées sur l'exploitation sont séparées du troupeau après sept mois et mises en gardiennage sur une autre exploitation (située à 15 km environ) jusqu'à leur seconde mise bas. Elles sont ensuite récupérées par l'exploitant. En échange du gardiennage des animaux, l'agriculteur « gardien » conserve les veaux et le lait issus des deux premières mises bas. Les veaux (mâles) sont écartés systématiquement du troupeau ; ils sont engraisés dans l'exploitation de gardiennage pendant deux ans puis vendus. Le gain des ventes est partagé entre les deux éleveurs.

La production de lait est destinée à la commercialisation. Chaque jour, environ 22 L/j sont vendus à des collecteurs ou des fromagers particuliers de Betafo et près de 2-3 L/j en saison sèche et jusqu'à 5 L/j en saison des pluies sont gardés pour l'autoconsommation.

L'étable peut accueillir une dizaine de bovins adultes. Les vaches laitières sont en stabulation permanente et les veaux en semi-liberté ; L'exploitant achète deux charrettes de bozaka par semaine (3 000 Ar/charrette) afin de constituer la litière des animaux (Tableau 7). Les litières usagées (bovins, cochons et volailles) sont transportées jusqu'au tas de fumier à l'extérieur et utilisées sur les parcelles de culture au minimum après deux semaines de maturation (Tableau 7).

Le troupeau de zébus est stable depuis quelques années. Les zébus ne travaillent essentiellement que le matin (6h à 12h) ou reste sur l'exploitation. En début d'après-midi (12h-13h), le jeune bouvier les conduit au pâturage jusqu'à 17-18h, puis les ramène à l'étable. La base de l'alimentation du troupeau de zébus est le bozaka consommé à l'extérieur de l'exploitation. En complément, les zébus reçoivent du mololo (le matin, 5-6 kg MB/j/zébu), des fourrages verts (kizozi ou avoine – ray-grass, le

soir, environ 6 kg MB/j/zébu) et un mélange de patates douces cuites (0,5 kg MB/j/zébu) et de son de riz (0,25 kg MB/j/zébu). Ils ne reçoivent ni provende, ni de drèches.

L'élevage porcin est de type engraisseur semi-traditionnel : les animaux sont de race locale (dite «Gazy») et sont parqués dans une porcherie « en dur » et nourris de provende artisanale. En moyenne 4-5 porcs sont engraisés et vendus (300 000 Ar/animal) par cycles, avec environ quatre cycles réalisés par an. L'alimentation des porcs est composée de provende artisanale fabriquée sur l'exploitation. Ce mélange comprend des tubercules (patate douce pomme de terre ou carottes, 3 kg MB/j/porc), du son de riz (1 kg MB/j/porc), des drèches (1 kg MB/j/porc), du soja (environ 60 g MB/j/porc) et du maïs (environ 110 kg MB/j/porc). L'élevage de volailles est un élevage de basse-cour destiné à. L'alimentation des volailles est basée sur les restes de l'alimentation humaine (riz cuit) et de grains de maïs (environ 1 kg MB/j).

Exploitation 3

Cultures et fertilisation

La majeure partie de la surface agricole de l'exploitation est située en zone de bas-fonds ; c'est aussi la seule des quatre exploitations à posséder une parcelle de baiboho (i.e. zone alluvionnaire en bordure de cours ou bourrelet de berge composé principalement de sols peu hydromorphes). Le riz, le mélange avoine – ray-grass, et l'orge sont les cultures dominantes en termes de surface. Cependant, ce sont les cultures de kizosi et de pomme de terre qui reçoivent les quantités de fumier les plus importantes (Tableau 6). Comme pour l'Exploitation 1, la totalité de la production de riz de l'exploitation provient des rizières irriguées de bas-fond. Environ 44 % de la production de riz sont autoconsommés (le ménage et la main d'œuvre journalière). Près de 1,8 t MS de riz sont stockées et peuvent être rapidement mobilisés pour répondre aux besoins de trésorerie.

La chronologie des opérations culturales pour l'Exploitation 3 sont représentées en Figure 9. Les travaux de préparation du sol pour la mise en place de la culture de riz sont en grande partie réalisés à l'aide d'une charrue à traction animale. En octobre, les parcelles labourées des bas-fonds sont piétinées par les zébus afin de préparer le sol au repiquage des plants de riz.

Cette exploitation est la seule des quatre exploitations à apporter du fumier sur l'ensemble des parcelles de riz irriguée. Cette fertilisation organique, 23 charrettes au total (environ 375 kg MB de fumier chacune), a lieu entre le labour et le « piétinement » par les zébus. Aucun intrant chimique (engrais minéral, pesticide) n'est utilisé pour la culture du riz. Le semis de la pépinière est pris en charge par l'épouse de l'exploitant alors que le transport du fumier, le repiquage, le sarclage manuel et le transport des bottes de riz sont réalisés par de la main d'œuvre féminine extérieure.

La culture d'avoine et du ray-grass a débuté avec le démarrage de l'activité laitière. Les surfaces fourragères de contre-saison ont augmenté progressivement afin d'accompagner la croissance du troupeau laitier. Pour une même parcelle, trois à quatre coupes d'avoine - ray-grass sont réalisées par an (de juillet à mi-octobre). Aucune biomasse fourragère produite n'est vendue. Les apports de fumier pour la culture d'avoine - ray-grass ont lieu au moment de la préparation des sols (Figure 9). Durant le semis en ligne, les semences d'avoine et de ray-grass sont mélangées et une première fertilisation minérale est apportée (10 à 15 kg de NPK/0,10 ha). Après chaque coupe l'agriculteur apporte lui-même de l'urée (10 kg/0,10 ha).

L'exploitation pratique la culture intensive de l'orge. L'orge est une production à forte valeur ajoutée, presque entièrement achetée par la brasserie STAR à Antsirabe (Tableau 6). L'agriculteur conserve

néanmoins environ 200 kg MB de grain pour constituer le stock de semences et pour alimenter le petit élevage de porcs et de volailles de l'exploitation. La culture de l'orge est réalisée en contre saison (mai à octobre). Le travail du sol a lieu dès la récolte du riz selon les disponibilités de main d'œuvre. Les opérations techniques pour la culture de l'orge sont proches de celles de l'avoine – ray-grass (Figure 9). Les apports de fumier ont lieu lors de la préparation du sol et l'engrais minéral (30 kg NPK/0,10 ha) est apporté pendant le semis en ligne. Des corrections de fertilisation sont réalisées par ajout d'urée un mois et demi à deux mois après le semis (5 à 10 kg/0,10 ha au total). L'exploitant pulvérise également des pesticides (30 ml de D6/an) sur l'ensemble de la culture d'orge.

La culture de la pomme de terre s'apparente davantage à une culture de rente qu'une culture vivrière avec plus de 98% de la production vendue (500 Ar/kg MB). Elle est mise en place du mois de juillet au mois de novembre sur une parcelle de bas-fond ou de baiboho (Figure 9). L'exploitant s'appuie principalement sur de la main d'œuvre extérieure journalière pour l'ensemble des opérations culturales. L'intensification de la culture de la pomme de terre se traduit par l'apport d'importantes quantités de fumier (environ 16 charrettes de fumier au total), d'engrais minéral (15 kg NPK/0,15 ha) et de pesticides (3 kg de Ditane/an et 40 ml de D6/an).

La culture de maïs est mise en place sur baiboho (environ 0,10 ha) et tanety (0,20 ha). Dans les parcelles proches de l'exploitation, le maïs est cultivé en association (interligne) ou en rotation avec une légumineuse (haricot ou soja) alors qu'il est cultivé seul dans une parcelle éloignée (2,5 km). Les épis sont récoltés au stade laiteux-pâteux pour l'alimentation de la famille durant une courte période d'environ trois semaines. Les épis restants vieillissent sur pied et sont récoltés une fois secs (environ 120 kg MS de grains/an) pour l'alimentation animale.

Le labour des parcelles de maïs sur tanety ou bas-fond est réalisé à l'angady par de la main d'œuvre extérieure. Les apports de fumier ne concernent que les parcelles proches de l'exploitation ; le fumier est déposé dans le poquet en même temps que les semences. Sur la parcelle de tanety éloignée de l'habitation, l'exploitant pratique l'écobuage (brûle les mauvaises herbes) et apporte des engrais minéraux (5 kg de NPK/0,10 ha). La fertilisation de la parcelle de baiboho est réalisée par des apports du fumier de volailles (environ 10 sobika de 15 kg du fumier de volailles). Aucun engrais minéral n'est appliqué. Environ 60 kg de haricots sont produits chaque année. Près de 20 kg sont utilisés comme semence et le reste autoconsommé, mais la production ne couvre pas les besoins de la famille.

Elevages, alimentation et gestion des effluents

Le troupeau laitier est en stabulation permanente tout autour de l'habitation Et les veaux sont élevés en semi-liberté dans la cour intérieure de l'habitation et parqués le soir (Tableau 7). La reproduction est assurée par l'insémination artificielle. L'exploitant déclare avoir une stratégie d'étalement des naissances au cours de l'année afin de maintenir une production laitière stable durant l'année. La taille maximale du troupeau étant atteinte, quelques velles sont conservées pour le renouvellement des animaux et les mâles sont systématiquement vendus.

La production moyenne est d'environ 30 L/j. Environ 3 L/j sont réservés pour l'alimentation des jeunes veaux, 0,7 à 1,5 L/j pour la consommation de la famille et le reste est commercialisée à un fromager (matin) et à la coopérative de Socolait (soir).

L'alimentation du troupeau laitier varie au cours de l'année (Tableau 7). Elle est assurée par des apports de kizozu en saison de pluies, et des apports d'avoine et de ray-grass en saison sèche, complétés par des apports de bozaka et de mololo (paille de riz et paille d'orge, conservés en tas face

à l'habitation). Toute l'année les vaches laitières et les génisses reçoivent de la provende (maïs pilé, tourteau d'arachide, poudre de coquillage, sels) et des drèches de brasserie. La récolte des fourrages cultivés (manuelle) est réalisée par l'exploitant et/ou son fils. Le bozaka est prélevés quotidiennement sur des terres communales par un ouvrier permanent.

L'exploitant utilise les refus des aliments du troupeau et du mololo pour constituer une fine litière. La litière usagée est sortie régulièrement des bâtiments et amassée sur le tas de fumier. La production de fumier est moitié moins importante durant la saison sèche. Il n'y ni vente, ni achat de fumier.

L'exploitation possède six zébus de type Zafindraony, c'est-à-dire métissé avec des races laitières européennes. La taille du troupeau de zébus est stable. Certains zébus réalisent des travaux le matin, puis l'ensemble du troupeau est conduit par le bouvier de l'exploitation au pâturage (sur les tanety en général) jusqu'en fin d'après-midi. Ils sont ensuite reconduits dans leur stabulation (en bois, ouverte). En plus du bozaka pâturé dans la journée, l'exploitant distribue aux zébus matin et soir du mololo. Aucune drèche, ni provende n'est distribuée.

L'exploitation élève des volailles en basse-cour. Leur effectif varie au cours de l'année : il atteint un maximum de 60 à 70 animaux pendant la récolte du riz, puis diminue progressivement avec la réduction du stock de grains jusqu'à atteindre 30 animaux. Une quarantaine de poules est vendue par an et les canards réservés pour l'alimentation familiale. Les volailles sont essentiellement nourries de grains produits sur l'exploitation. Leur alimentation est composée de paddy (0,6 t MS/an), grains de maïs (0,12 t MS/an) et d'orge (26 kg MS/an). Les proportions de ces ingrédients varient au cours de l'année selon les disponibilités. L'exploitation possède également un élevage porcin de type « engraisseur semi-traditionnel », basé sur des porcelets de race locale, logés dans des porcheries fermées et engraisés avec un mélange de céréales et de tubercules. Seulement un ou deux porcs sont engraisés à la fois sur l'exploitation pendant une durée d'environ cinq mois, soit un total de 4 à 6 porcs engraisés et vendus tous les deux ans. L'alimentation des porcs est composée de son de riz (environ 3 kg MB/j/porc), de grains de maïs concassés (environ 2 kg MB/j/porc), de patates douces (environ 2 kg MB/j/porc) et de drèche (environ 1 kg MB/j/porc). A ce mélange s'ajoute approximativement 2 kg MB/j/porc de fourrage vert (kizozzi ou bozaka). Cette ration alimentaire est distribuée toute l'année.

Exploitation 4

Cultures et fertilisation

Les principales cultures de l'Exploitation 4 sont des cultures vivrières (riz, maïs et patate douce). Les cultures fourragères sont peu développées et remplissent une fonction non alimentaire (production de semences, bordures de parcelles). Aucune culture de contre-saison n'est pratiquée (Tableau 6). Les plus grandes parcelles (0,8 ha à 1,3 ha) de l'exploitation ne sont pas cultivées mais couvertes de bois non exploités (pins ou eucalyptus) ou de bozaka.

La culture du riz (variété dite « rouge ») est mise en place sur la totalité des parcelles de bas-fond (culture irriguée) et sur 0,12 ha de tanety (culture pluviale) (Figure 10). L'ensemble de la production de riz est autoconsommé sur l'exploitation (famille et main d'œuvre extérieure). Chaque jour, le battage et le décorticage du riz sont réalisés manuellement par l'épouse et les filles de l'exploitant. Les travaux de préparation du sol et le semis de la pépinière mobilisent de la main d'œuvre familiale mais surtout de la main d'œuvre extérieure (1 200 ou 1 600 Ar/j et repas du midi). Le repiquage, le

sarclage manuel, et la récolte sont réalisés essentiellement avec de la main d'œuvre extérieure féminine. Pour le transport du riz récolté sur les parcelles les plus éloignées de l'habitation, environ 18 charrettes sont louées (3 000 Ar/ch).

L'agriculteur n'utilise aucun fertilisant pour les rizières de bas-fond, mais du fumier et de l'urée sont apportés sur la pépinière avant le semis (3 charrettes d'environ 280 kg MB de fumier chacune et 3 kg d'urée pour 3 ares). Aucune culture de contre-saison n'étant pratiquée sur les bas-fonds, ces parcelles ne reçoivent aucune autre source de fertilisation. La culture du riz pluvial est mise en place une année sur deux. Elle débute avec le labour à l'angady dès le mois d'août, puis le semis et fertilisation au poquet en novembre (environ 35-40 kg MB de fumier pour 0,12 ha). Deux sarclages manuels sont réalisés sur l'ensemble de la culture, en décembre et janvier, avant la récolte du riz en mars. L'ensemble de ces travaux sont entièrement assurée par de la main d'œuvre extérieure.

Le maïs est semé en général en association avec une culture (haricot, soja, patate douce, pomme de terre ou manioc) (Tableau 6). L'exploitant pratique les rotations en alternant les associations tubercules-maïs et maïs-légumineuses. La majeure partie de la production de maïs est autoconsommée et seulement 600 kg de grains de maïs sont vendus chaque année. Environ 14 ares de maïs sont implantés en SCV (i.e. pas de labour, semis au poquet sous un mulch mort de bozaka), et le reste cultivé de manière conventionnelle (i.e. semé après labour, sans mulch).

La culture du maïs est essentiellement assurée par de la main d'œuvre familiale. Certaines tâches comme la récolte ou le labour à l'angady de certaines parcelles peuvent cependant nécessiter le recours à de main d'œuvre extérieure. La préparation du sol est réalisée au fur et à mesure par les membres de la famille selon leur disponibilité. Pour les parcelles de maïs SCV, l'exploitant seul prépare le mulch (récolter le bozaka et les résidus de cultures, les disposer sur les parcelles). Le travail généré par le paillage du maïs SCV nécessite environ trois fois moins de main d'œuvre que celui du labour du maïs conventionnel, respectivement 40 jours-hommes/ha et 120 jours-hommes/ha. Cependant au moment du semis (au poquet), le système maïs SCV nécessite 2 fois plus de temps de travail (i.e. 100 jours-hommes/ha) que le système dit conventionnel. Le sarclage (un passage) des parcelles de maïs, cultivé en monoculture ou en association avec des légumineuses, n'a lieu que pour les systèmes de maïs conventionnel (environ 50 jours-hommes/ha de main d'œuvre familiale).

Sous SCV le mulch de bozaka contrôle le développement des mauvaises herbes et limite l'utilisation des herbicides. La récolte du maïs est réalisée en plusieurs étapes, récolte de quelques épis chaque jour au stade laiteux-pâteux pour la consommation familiale puis récolte de l'ensemble des épis sec pour les grains.

La fertilisation de la culture de maïs est la plus importante pour l'Exploitation 4 (Tableau 6). Elle est réalisée en en même temps que le semis du maïs au poquet, à raison de 25-28 charrettes de fumier épandues sur l'ensemble de la surface emblavée en maïs. Les parcelles de maïs cultivées en SCV reçoivent toutefois deux fois moins de fumier.

La culture de la patate douce est entièrement dédiée à autoconsommation (famille et animaux). Le labour et la récolte des parcelles de patate douce mobilisent de la main d'œuvre familiale. Un appui de main d'œuvre extérieure est cependant nécessaire pour le semis et la fertilisation. Lors du semis, peu de fumier est apporté, environ 2 charrettes de fumier pour 0,30 ha (Tableau 6). Aucun sarclage

n'est réalisé grâce à la couverture végétale que constituent les tiges de patate douce. La récolte des tiges et des tubercules de patates douces est effectué progressivement selon les besoins de l'exploitation (Figure 10). D'autres cultures vivrières sont présentes : des cultures maraîchères, des haricots, de la pomme de terre, du manioc. Les cultures fourragères, brachiaria et sétaria sont respectivement cultivées pour la production de semences et pour délimiter les parcelles de culture vivrières

Elevages, alimentation et gestion des effluents

L'exploitation possède un effectif bovin réduit et des animaux croisés PRN x Zébu. L'exploitation est la seule des quatre étudiées à ne pas pratiquer la stabulation permanente. Les animaux restent attachés à un arbre de la cour durant le jour et sont rentrés à l'étable la nuit (Tableau 7). Les veaux ou velles sont laissé en liberté dans la cour de l'habitation le jour puis parqués durant la nuit, mais séparés du troupeau.

Depuis la crise de la filière lait, l'exploitant a décidé de cesser la distribution de concentré (provende, drèche) à ces animaux et de n'apporter que des fourrages (bozaka, tiges de patate douce, sétaria, paille de riz). Le fourrage principal durant toute l'année est le bozaka prélevés hors de l'exploitation deux fois par jour (Tableau 7). La production de lait est entièrement autoconsommée sur l'exploitation.

La reproduction des animaux est assurée par monte naturelle. Les veaux mâles sont vendus et seules les femelles sont gardées sur l'exploitation. Cependant, la taille du troupeau n'a cessé de diminuer depuis la fermeture de Tiko.

La traite est principalement à la charge de l'épouse de l'agriculteur. Elle n'a lieu qu'une fois par jour (le matin) après la sortie des animaux de l'étable. L'épouse s'occupe de la distribution des fourrages pour l'alimentation de bovins et les enfants de l'exploitant de la récolte du bozaka (Tableau 7).

La litière dans l'étable est composée de bozaka « non comestible », de pailles de riz et des refus de l'alimentation. Elle est évacuée une fois tous les 2-3 jours. La litière dans la cour de la maison (au pied de l'arbre) est essentiellement composée de paille de riz et des refus alimentaires et est évacuée tous les jours. Pour constituer la litière et réaliser le compostage du fumier, environ 3 charrettes de 150 kg MB de bozaka sont nécessaire chaque semaine. Le fumier peut être stocké à l'air libre au minimum 2 à 3 mois avant d'être utilisé pour les cultures. Après avoir fertilisé ses propres cultures, l'agriculteur vend le reliquat de fumier, soit une moyenne de 12 à 20 charrettes de fumier par an à 5 000 Ar/charrette.

L'exploitation engraisse un porc de race locale par an. Chaque année, un porcelet est acheté (80 000 Ar) en décembre, engraisé durant 10-11 mois et vendu en octobre-novembre (360 000 Ar/porc). La vente du porc permet de financer une grande partie de la main d'œuvre extérieure employée chaque année. L'alimentation du porc est composée des restes de l'alimentation de la famille, de grains de maïs (environ 1 kg MB/j), de son de riz (environ 1 kg MB/j), de soja (250 g MB/j) et de patates douces (environ 4 kg MB/jour). Les proportions varient selon les disponibilités de l'exploitation. L'exploitant possède aussi une vingtaine de volailles (de type basse-cour) destinée à l'autoconsommation (seulement une dizaine de jeunes sont vendus par an). Le nombre des poules et poulets varient peu au cours de l'année. Les volailles sont essentiellement nourries de grains produits

sur l'exploitation. Leur alimentation est composée des restes de l'alimentation humaine, de paddy (environ 320 kg MB/an) et de grains de maïs (environ 150 kg MB/an). Les proportions varient au cours de l'année selon les disponibilités.

Annexe 6 : Bilan économique agricole réalisé pour l'Exploitation 1 au moment de l'enquête par immersion.

Achats			Ventes		
Activité concernée	Type de produit	Dépenses (Ar/an)	Activité concernée	Type de produit	Gains (Ar/an)
Oat - rye-grass	<i>urea</i>	560 000	Rice	<i>white rice</i>	840 000
Rice straw stock	<i>rice straw</i>	2 850 191	Dairy cow	<i>animal</i>	6 980 000
Brewer's grains stock	<i>brewer's grains</i>	7 164 950	Zebu	<i>animal</i>	300 000
Feed concentrates stock	<i>feed concentrates</i>	36 666 318	Pig	<i>animal</i>	19 463 850
Dairy cow	<i>animal (bull)</i>	740 000	Poultry	<i>animal</i>	3 990 000
Zebu	<i>animal (zebu)</i>	800 000	Poultry	<i>eggs</i>	26 027
Dairy cow	<i>veterinary products</i>	258 000	Processing	<i>cheese</i>	78 840 000
Pig	<i>veterinary products</i>	161 200	Processing	<i>butter</i>	11 793 600
Poultry	<i>veterinary products</i>	255 000	Processing	<i>whey</i>	95 389
Manure stock	<i>bozaka bedding</i>	547 500			
Family and farm workers	<i>food + charcoal</i>	1 606 350			
Processing	<i>milk</i>	12 193 292			
Processing	<i>other proceeding expenses</i>	2 390 150			
Whole farm	<i>workers (man-day)</i>	1 971 750			
Whole farm	<i>workers (permanent)</i>	3 358 875			
Total dépenses (Ar/an)		71 523 577	Total ventes (Ar/an)		122 328 866
Bilan (Ar/an)		50 805 289			

Annexe 7 : Bilan économique agricole réalisé pour l'Exploitation 2 au moment de l'enquête par immersion

Activité concernée	Achats		Ventes		Gains (Ar/an)
	Type de produit	Dépenses (Ar/an)	Activité concernée	Type de produit	
Potatoes	<i>NPK</i>	756 000	Rice	<i>white rice</i>	349 564
Bean - maize	<i>urea</i>	241 500	Potatoes	<i>tuber</i>	840 000
Bean - maize	<i>NPK</i>	67 500	Bean - maize	<i>grain</i>	200 000
Wheat	<i>urea</i>	258 750	Wheat	<i>grain</i>	940 750
Wheat	<i>NPK</i>	506 250	Dairy cow	<i>animal</i>	2 285 714
Oat- ray-grass	<i>urea</i>	161 000	Dairy cow	<i>milk</i>	3 662 632
Oat- ray-grass	<i>NPK</i>	189 000	Pig	<i>animal</i>	2 700 000
Crop	<i>pesticide</i>	604 950			
Rice bran stock	<i>rice bran</i>	223 627			
Brewer's grain stock	<i>brewer's grain</i>	352 740			
Feed concentrate stock	<i>feed concentrate</i>	394 188			
Dairy cow	<i>veterinary products</i>	148 400			
Pig	<i>animal</i>	2 805 000			
Poultry	<i>maize grain</i>	6 750			
Manure stock	<i>bozaka bedding</i>	312 000			
Whole farm	<i>food + charcoal</i>	669 600			
Whole farm	<i>workers (man-day)</i>	1 400 000			
Whole farm	<i>workers (permanent)</i>	300 000			
Total dépenses (Ar/an)		9 397 255	Total ventes (Ar/an)		10 978 660
Bilan (Ar/an)			1 581 406		

Annexe 8 : Bilan économique agricole réalisé pour l'Exploitation 3 au moment de l'enquête par immersion

Achats			Ventes		Gains (Ar/an)
Activité concernée	Type de produit	Dépenses (Ar/an)	Activité concernée	Type de produit	
Maize -bean	<i>NPK</i>	11 500	Rice	<i>white rice</i>	1 052 857
Potatoes	<i>NPK</i>	103 500	Potatoes	<i>tuber</i>	2 450 000
Barley	<i>urea</i>	96 000	Barley	<i>grain</i>	530 000
Barley	<i>NPK</i>	276 000	Dairy cow	<i>animal</i>	810 000
Oat - ray-grass	<i>urea</i>	112 000	Dairy cow	<i>milk</i>	4 805 891
Oat - ray-grass	<i>NPK</i>	241 500	Pork	<i>animal</i>	936 000
Crop	<i>Pesticide</i>	57 000	Poultry	<i>animal</i>	160 000
Rice and barley straw stock	<i>rice straw</i>	922 399			
Rice bran stock	<i>rice bran</i>	244 927			
Brewer's grain stock	<i>brewer's grain</i>	543 021			
Feed concentrate stock	<i>feed concentrate</i>	2 184 925			
Dairy cow	<i>veterinary products</i>	809 500			
Pig	<i>animal</i>	315 000			
Whole farm	<i>food + charcoal</i>	1 198 267			
Whole farm	<i>workers (man-day)</i>	1 534 922			
Whole farm	<i>workers (permanent)</i>	669 600			
Total dépenses (Ar/an)		9 320 060	Total ventes (Ar/an)		10 744 748
Bilan (Ar/an)		1 424 688			

Annexe 9 : Bilan économique agricole réalisé pour l'Exploitation 4 au moment de l'enquête par immersion

Achats			Ventes		Gains (Ar/an)
Activité concernée	Type de produit	Dépenses (Ar/an)	Activité concernée	Type de produit	
Rice	<i>urea</i>	4 800	Maize	<i>grain</i>	270 000
Rice	<i>cart location</i>	54 000	Brachiaria	<i>grain</i>	3 544
Crop	<i>pesticide</i>	9 600	Dairy cow	<i>animal</i>	90 000
Dairy cow	<i>veterinary products</i>	39 000	Dairy cow	<i>milk</i>	515 071
Pig	<i>animal</i>	74 000	Poultry	<i>animal</i>	9 000
Whole farm	<i>food + charcoal</i>	521 400	Pig	<i>animal</i>	360 750
Whole farm	<i>workers (man-day)</i>	538 318	Manure stock	<i>manure</i>	80 000
Total dépenses (Ar/an)		1 241 118	Total ventes (Ar/an)		1 328 365
Bilan (Ar/an)		87 247			

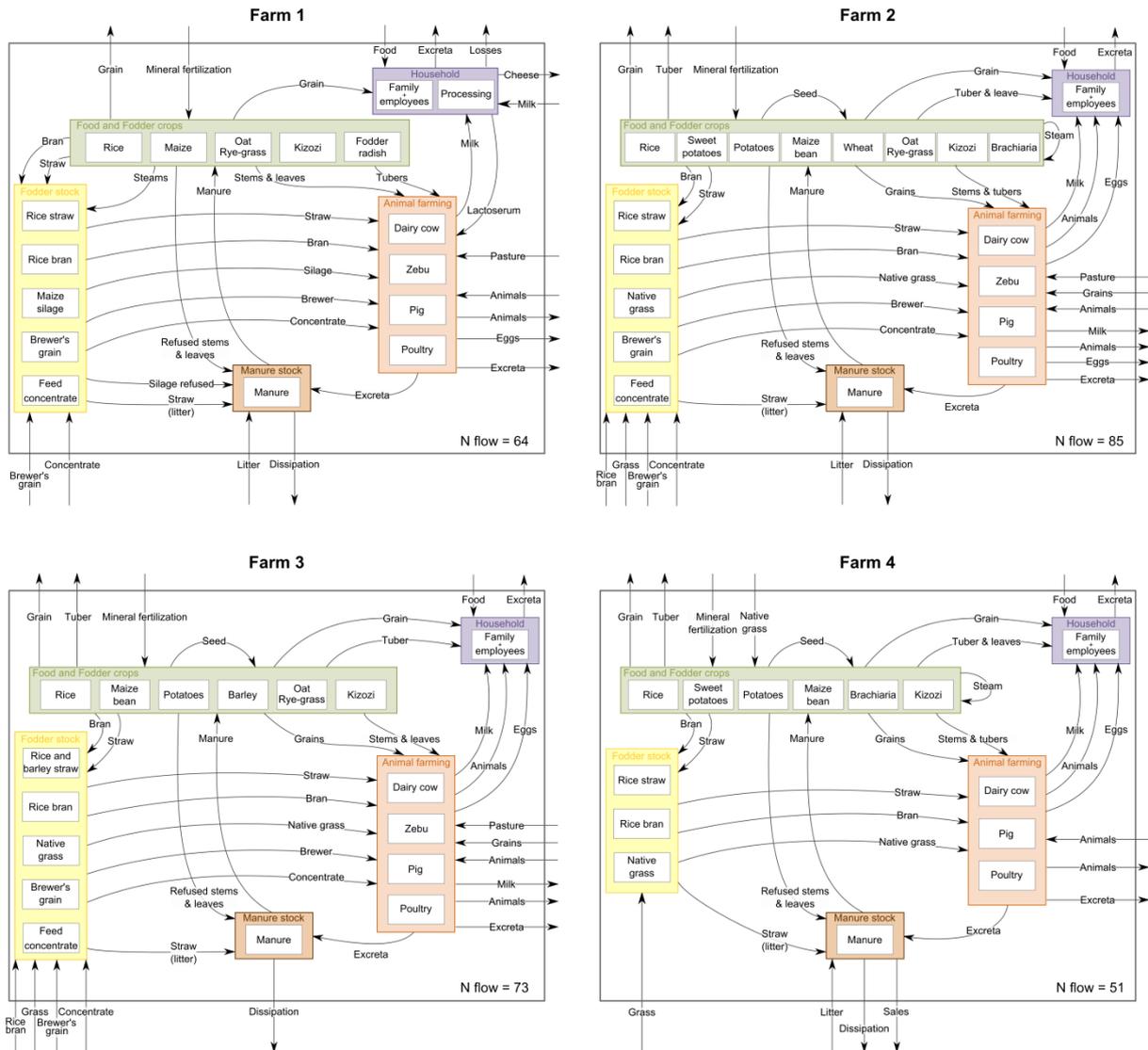
Annexes Chapitre 4

Appendix 1: Dry matter and nitrogen content of different products

Product	DM	N	References
	kg kg FW ⁻¹	% DM	
Rice (paddy grain)	0.87	1.5	Andrieu et al., 1988
White rice		1.1**	USDA Nutrient Data Laboratory, 2012
Rice straw	0.87-0.89	0.8-2.3	
Rice bran	0.89	2.7	
Rice husks	0.92	0.6	Feedbase, 2012
Wheat grain	0.87	2.0	Rufino et al., 2009a
Barley grain	0.88	1.6	Rufino et al., 2009a
Wheat and barley straw	0.88-0.89	0.8-2.3	(assumed to be similar to rice straw)
Maize (ears)	0.65	1.3	
Maize grain	0.85	1.5	Feedbase, 2012
Maize dry stems (crop residues)	0.62	0.8	
Sweet potatoes (tuber)	0.28-0.34	0.9-1.7	
Sweet potatoes (leaves & stems)	0.17-0.21	1.7-3.0	
Potatoes (tuber)	0.34	1.7	(assumed to be similar as sweet potatoes)
Potatoes (leaves & stems)	0.13	3.0	
Soja and bean (grain)	0.89	4.0	USDA Nutrient Data Laboratory, 2012
Oat-ryegrass (green)	0.19-0.24	1.5-3.7	
Elephant grass	0.18-0.38	2.1-2.9	
Fodder radish	0.11-0.30	3.3	
Brachiaria	0.24-0.28	1.6-2.9	
Setaria	0.18	2.6	
Native grass	0.36-0.47	1.4-2.3	
Maize silage	0.35	1.3	Andrieu et al., 1988
Brewer's grain	0.31-0.34	3.9-4.0	
Feed concentrate	0.88-0.90	3.0-4.0	
Milk		0.5**	Rufino et al., 2009
Whey		0.1**	INRA, 1989
Dairy cow (meat)		3.4**	Rufino et al., 2009a
Zebu (meat)		3.4**	Rufino et al., 2009a
Pig (meat)		2.3**	FAO, 2012a
Poultry (meat)		2.9**	Rufino et al., 2009a
Poultry eggs	0.25	1.9	Rufino et al., 2009a
Native grass (for bedding)	0.43-0.50	1.3-2.3	
Faeces of dairy animals	0.14-0.19	1.5-1.9	
Faeces of zebu	0.18	1.4-1.5	
Zebu fresh manure (in barn)	0.15-0.32	1.6-2.2	
Dairy fresh manure (in barn)		0.3-0.8**	
Pig fresh manure (in barn)	0.31-0.35	1.5-2.6	
Poultry fresh manure (in barn)	0.21	1.9	
Farmyard manure (to spread)	0.29-0.48	0.9-2.2	
Urea		46**	
NPK		11**	
Coffee		2.2**	DTU Food, 2012
Vegetable		0.1**	USDA Nutrient Data Laboratory, 2012
Meat (zebu or pork)		2.3**	FAO, 2012
Charcoal	0.1	0.51	FAO, 1983 (DM); Pastor-Villegas et al., 2006 (% N)

DM: dry matter; FW fresh weight; N: nitrogen; ** N in % FW

Appendix 2: Schematic representation of the main flows of N network for four crop-livestock farms of the Malagasy highlands. For simplicity, main internal flows are represented by grouping food and fodder crops, separating them from fodder stocks, and by grouping all animal compartments together



Appendix 3: Main calculations and assumptions

Assumptions	Calculations	Elements of calculation	References
Livestock intake capacity			
Zebu grazing intake	$INTAKE_{\text{on farm}} + INTAKE_{\text{off farm grazing}} = \sum_{i=0}^n IC_{\text{max}} \times LW_i$	<p>$INTAKE_{\text{on farm}}$: forage intake by zebu (kg DM day⁻¹)</p> <p>$INTAKE_{\text{off farm grazing}}$: grazing intake by zebu (kg DM day⁻¹)</p> <p>n: zebu herd size</p> <p>IC_{max}: maximum DM intake capacity (2.5% of zebu LW)</p> <p>LW: average live weight (kg per zebu)</p>	Karue et al., 1973
Dairy intake control	$INTAKE_{\text{forage}} \leq \sum_{i \in \{c,b,h,y\}} \sum_{j=0}^{n_i} IC_{\text{max}_i} \times LW_{ij}$	<p>$INTAKE_{\text{forage}}$: forage intake by dairy herd (kg DM day⁻¹)</p> <p>{c,b,h,y}: set of all animal categories (c, b, h and y for respectively cow, breeding bull, heifer and, young and calf)</p> <p>n_i: herd size for the i-category</p> <p>IC_{max_i}: maximum DM intake capacity for the i-category (2.5, 2.1 and 2.0% of LW respectively for cow and bull, heifer and, young and calf)</p> <p>LW_{ij}: average live weight (kg per animal of i-category)</p>	adapted from INRA, 1988
Excreta production			
Zebu faecal production	$N_{\text{zebu faeces}} = NR_{\text{zebu faeces}} \times F_{\text{zebu}}$	<p>$N_{\text{zebu faeces}}$: N amount excreted in faeces (kg N day⁻¹ animal⁻¹)</p> <p>$NR_{\text{zebu faeces}}$: N rate in zebu faeces (% of DM faeces)</p> <p>F_{zebu}: zebu faeces production (kg DM day⁻¹ animal⁻¹) and $F_{\text{zebu}} = 0.008 \times LW$</p>	cf. Appendix 1 Fernandez-Rivera et al., 1995
Zebu urine production	$N_{\text{zebu urine}} = k_{\text{zebu urine}} \times LW$	<p>$N_{\text{zebu urine}}$: N amount excreted in urine (g N day⁻¹ animal⁻¹)</p> <p>$k_{\text{zebu urine}}$: production rate of urine N (39 % of LW per day)</p>	Rufino et al., 2006
Dairy excreta production	$N_{\text{excreta}} = N_{\text{manure off barn}} + N_{\text{emission in barn}} - N_{\text{bedding}}$	<p>N_{excreta}: total N in dairy herd excreta (faeces and urine) (kg year⁻¹)</p> <p>$N_{\text{manure off barn}}$: N of total waste scraped off the dairy barn (kg year⁻¹)</p> <p>$N_{\text{emission in barn}}$: total N losses by emission in dairy barn (kg year⁻¹)</p> <p>N_{bedding}: total N in the “clean” bedding for dairy herds (kg year⁻¹)</p>	Survey cf. below in table Survey
Pig manure production	$N_{\text{pig manure}} = k_{\text{pig}} \times LW \times DM_{\text{pig manure}} \times NR_{\text{pig manure}}$	<p>$N_{\text{pig manure}}$: total N in pig manure production (kg day⁻¹ animal⁻¹)</p> <p>k_{pig}: production rate of manure (6 % of pig LW per day)</p> <p>$DM_{\text{pig manure}}$: dry matter of pig manure</p> <p>$NR_{\text{pig manure}}$: N rate in pig manure (% of DM pig manure)</p>	Imbeah, 1998 cf. Appendix 1 cf. Appendix 1

Assumptions	Calculations	Elements of calculation	References
Poultry manure production	$N_{\text{poultry manure}} = k_{\text{poultry}} \times LW \times DM_{\text{poultry manure}} \times NR_{\text{poultry manure}}$	<p>$N_{\text{poultry manure}}$: total N in poultry manure (kg day⁻¹ animal⁻¹)</p> <p>k_{poultry}: production rate of poultry manure (5.7 % of LW per day)</p> <p>$DM_{\text{poultry manure}}$: dry matter of poultry manure</p> <p>$NR_{\text{poultry manure}}$: N rate in poultry manure (% of DM poultry manure)</p>	<p>FAO, 2012b</p> <p>cf. Appendix 1</p> <p>cf. Appendix 1</p>
Excreta dissipation			
Zebu grazing	$N_{\text{zebu diss off farm}} = (N_{\text{zebu faeces}} + N_{\text{zebu urine}}) \times \frac{h_{\text{off farm}}}{24}$	<p>$N_{\text{zebu diss off farm}}$: total N dissipated during grazing (kg N day⁻¹ animal⁻¹)</p> <p>$h_{\text{off farm}}$: number of hours outside farm (8 hours)</p>	
Poultry free ranging	$N_{\text{poultry diss farmyard}} = N_{\text{poultry manure}} \times \frac{h_{\text{farmyard}}}{24}$	<p>$N_{\text{poultry diss farmyard}}$: total N dissipated during the day in farmyard for free ranging hens (kg N day⁻¹ animal⁻¹)</p> <p>h_{farmyard}: number of hours in farmyard (13 hours)</p>	
Human excreta production	$N_{\text{human excreta}} = k_{\text{human N production}} \times R_{\text{presence in farm}}$	<p>$N_{\text{human excreta}}$: total N excreted by human (g capita⁻¹ day⁻¹)</p> <p>$k_{\text{human N production}}$: human N excreta production (7.75g N capita⁻¹ day⁻¹)</p> <p>$R_{\text{presence in farm}}$: rate of presence on farm</p> $R_{\text{presence in farm}} = \begin{cases} 1 & \text{if permanent member of household} \\ 1/3 & \text{if casual worker} \\ (365 - n_{\text{out}})/365 & \text{if family member living a few days per year} \\ (n_{\text{out}}) & \text{outside the farm} \end{cases}$	
Ammonia volatilization in animal housing			
Zebu faeces in barn	$N_{\text{zebu faeces volatilization}} = N_{\text{zebu faeces}} \times \frac{24 - h_{\text{off farm}}}{24} \times ER_{\text{cattle in barn}}$	<p>$N_{\text{zebu faeces volatilization}}$: total N volatilization (kg N day⁻¹ animal⁻¹)</p> <p>$ER_{\text{cattle in barn}}$: emission rate in barn (27% of N excreted in faeces)</p>	Rotz, 2004
Zebu urine in barn	$N_{\text{zebu urine volatilization}} = N_{\text{zebu urine}} \times \frac{24 - h_{\text{off farm}}}{24} \times ER_{\text{urine}}$	<p>$N_{\text{zebu urine volatilization}}$: total N volatilization (g N day⁻¹ animal⁻¹)</p> <p>ER_{urine}: emission rate N urine (25% of N excreted in urine)</p>	Rufino et al., 2006
Dairy excreta in barn	$N_{\text{emission in barn}} = \frac{ER_{\text{cattle in barn}}}{1 - ER_{\text{cattle in barn}}} (N_{\text{manure off barn}} - N_{\text{bedding}})$	<p>$N_{\text{emission in barn}}$: total N losses by emission in dairy barn (kg year⁻¹)</p> <p>$ER_{\text{cattle in barn}}$: emission rate in barn (27% of N excreted in barn)</p>	Rotz, 2004

Assumptions	Calculations	Elements of calculation	References
Pig manure in barn	$N_{\text{pig emission}} = \frac{ER_{\text{pig}}}{1 - ER_{\text{pig}}} N_{\text{pig manure}}$	$N_{\text{pig emission}}$: total N losses by emission in pig house (kg day ⁻¹ animal ⁻¹) ER_{pig} : emission rate in pig house (25% of total N excreted)	Dourmad et al., 1999
Poultry manure in barn	$N_{\text{poultry emission}} = \frac{ER_{\text{poultry}}}{1 - ER_{\text{poultry}}} N_{\text{poultry manure}}$	$N_{\text{poultry emission}}$: total N losses by emission in pig house (kg day ⁻¹ animal ⁻¹) ER_{poultry} : emission rate in house (36% of total N excreted)	Bouwman, 1997
Emission during manure storage			
Manure heap emission	$N_{\text{emission manure storage}} = (1 - NE_{\text{manure storage}}) \times N_{\text{collected}}$	$N_{\text{emission manure storage}}$: N losses during heap manure storage $N_{\text{collected}}$: N amount in collected material (i.e. cattle manure off barn, pig and poultry excreta after emissions, refusal feed and other vegetal material added to manure heap) $NE_{\text{manure storage}}$: N efficiency of farmyard manure storage (for farm 1 to farm 4, respectively 59, 46, 75 and 6%)	Salgado, personal communication
N losses in fields			
Volatilization from manure application	$N_{\text{manure volatilization in field}} = ER_{\text{manure volatilization}} \times N_{\text{manure applied}}$	$N_{\text{manure volatilization in field}}$: N losses by volatilization during manure fertilization (kg N ha ⁻¹) $ER_{\text{manure volatilization}}$: emission rate of manure application in fields (15% of manure N applied) $N_{\text{manure applied}}$: N of manure applied in fields (kg N ha ⁻¹)	$ER_{\text{manure volatilization}}$ value: mean from Bouwman et al., 2006; FAO/IFA, 2003; Meisinger and Jokela, 2000; Möller and Stinner, 2010 and Rotz, 2004
Volatilization from mineral fertilizer (urea or NPK) application	$N_{\text{fertilizer volatilization}} = ER_{\text{fertilizer volatilization}} \times N_{\text{fertilizer applied}}$	$N_{\text{fertilizer volatilization}}$: N losses by volatilization during mineral fertilization (kg N ha ⁻¹) $ER_{\text{fertilizer volatilization}}$: emission rate of mineral fertilizer application in fields (15% of fertilizer N applied) $N_{\text{fertilizer applied}}$: N of mineral fertilizer applied (kg N ha ⁻¹)	Sommer et al., 2004 (for pH soil 5.0 to 6.5)
N losses by leaching	$N_{\text{leaching}} = R_{\text{leaching}} \times (N_{\text{manure applied}} + N_{\text{fertilizer applied}})$	N_{leaching} : N losses by leaching after manure and mineral fertilization (kg N ha ⁻¹) R_{leaching} : rate of N losses by leaching (7 or 32% of N applied respectively during dry or rainfall season)	Vayssières and Rufino, 2012

Assumptions	Calculations	Elements of calculation	References
N losses by runoff erosion	$N_{\text{erosion}} = k_{\text{erosion}} \times R_{\text{erosion}} \times N_{\text{soil}}$	<p>N_{erosion}: N losses by runoff erosion (kg N ha⁻¹ year⁻¹)</p> <p>k_{erosion}: 1 or 0 respectively for sloping or terraced fields</p> <p>R_{erosion}: erosion rate for cropping system (10.0, 3.0 and 2.3 t DM soil ha⁻¹ year⁻¹ for annual rainfed crop on conventional ox-plough tillage, perennial fields and for DMC systems, respectively)</p> <p>N_{soil}: average N amount of soil (kg N t⁻¹ DM soil)</p>	<p>Douzet et al., 2008 and 2010</p> <p>Alvarez, 2012</p>

Appendix 4: Indicators of the network analysis and their calculation (adapted from Rufino et al., 2009b)

Indicators	Calculation
Imports *	$IN = \sum_{i=1}^n z_i 0$
Compartmental throughflow *	$T_i = \sum_{j=1}^n f_{ij} + z_i 0 - \dot{x}_i$
Total system throughput	$T_{..} = \sum_{i,j=1}^n T_{ij}$
Total system throughflow	$TST = \sum_{i=1}^n T_i$
Finn's cycling index	$FCI = \frac{TSTc}{TST}$
Dependence	$D = \frac{IN}{TST}$
Average mutual information	$AMI = k \sum_{i=1}^{n+2} \sum_{j=0}^n \frac{T_{ij}}{T_{..}} \log_2 \frac{T_{ij} T_{..}}{T_i T_j}$
Statistical uncertainty	$H_R = - \sum_{i=1}^{n+2} \frac{T_{.j}}{T_{..}} \log_2 \frac{T_{.j}}{T_{..}}$

* $z_i 0$ are N inflows to each system compartment from the external environment, \dot{x}_i represents the change in stock of a compartment and f_{ij} represents internal flows between compartments.

Appendix 5: Details on scenarios and assumptions

Scenario 1, +concentrate: increasing feed supply

In +concentrate, dairy production is increased by increasing N input through additional supplementation with concentrate feed ($0.3 \text{ kg cow}^{-1} \text{ day}^{-1}$) and brewer's grains ($0.9 \text{ kg cow}^{-1} \text{ day}^{-1}$). It was assumed that the genetic potential of the cows allows for an increase in milk production of about 2 litres (L) per cow with the above mentioned additional feed supply. The additional feed supplement was assumed to be the same for the four farms. Crude protein (CP; 230 g kg DM^{-1}), net energy for lactation (NE_L ; $7.47 \text{ MJ kg DM}^{-1}$), digestible protein at intestine level (DPI; 129 g kg DM^{-1}) and the CP digestibility (74%) of the feed supplement were calculated by adding the nutritive values of the different feed constituents (Andrieu et al., 1998). Thus, the additional feed supplementation allowed an increase of about $2.4 \text{ L cow}^{-1} \text{ day}^{-1}$, assuming that a lactating cow needs 3.13 NE_L and 48 g of DPI to produce 1 L of milk (Hoden et al., 1998). Any milk surplus would be sold at market price. The non-digestible crude protein (26%) was fully incorporated into faecal material. The conversion of protein into nitrogen was estimated using a conversion rate of 6.25. The variation on faeces production linked to the increase of feed supply would be accompanied by a N mass variation in faeces. This N-variation in faeces would be submitted to volatilization in the barn, and then to volatilization and leaching on rice field where it was assumed to have been applied (in addition to N applied in the baseline). The remaining N in soil after N losses (volatilization and leaching) would be taken up by plants and converted into plant biomass (grains and straw), using conversion rates presented in Appendix 6. It was assumed that: i) the yield increase was not large enough to reach the crop physiological limit, ii) the increase of rice grain yield would require a proportional increase in labour for harvest, resulting in additional salaried labour and increased N losses by human excreta production. The surplus of rice grain could be sold which would have a positive impact on farm income. The increase in rice straw

production reduced the straw purchases (if there were), increased the straw intake by the dairy cow, controlled by IC_{\max} (Appendix 3) or could be sold and/or be used as bedding for cattle.

Scenario 2, +mineral fertilizer: increasing N mineral fertilizer supply

In +mineral fertilizer, rice production is increased by an additional amount of 200 kg urea ha⁻¹. The N from urea spreading would be subject to field losses by volatilization and by leaching. As for +concentrate, the increase in yield was determined converting the remaining N (i.e. after N losses) in soil into plant biomass (Appendix 6). Assuming that N was the main limiting factor for crop production, an additional application of 200 kg urea ha⁻¹ would support an increase of the grain yield about 1 t ha⁻¹. As for +concentrate, higher yield would proportionally generate a demand for more salaried labour. The surplus of rice grain would be sold at market price. For +concentrate and +mineral fertilizer, the quantity of feed refusal and collected material for the manure heap could change. However, the N emission rate of the stored manure for +concentrate and +mineral fertilizer was assumed to be the same as that of the baseline.

Scenario 3, +manure management: N conservation improvement

In +manure management, N conservation is enhanced through improvements in manure management: i) frequent collection of manure (once or twice a day) in barns (Beauvais, 2010); ii) covering manure heap during storage (Rufino et al., 2007) and iii) rapid incorporation of manure into the soil.

Covering the manure heap would increase amount of N in stored manure (Rufino et al., 2007) and thus in field application. The mass variation of N (in kg year⁻¹) in the stored manure ($\Delta N_{\text{stored manure}}$, i.e. the difference between the N amount in stored manure in scenario +manure management and baseline was calculated as:

$$\Delta N_{\text{stored manure}} = (IR_{\text{manure storage}} - 1) \times NE_{\text{manure storage}} \times N_{\text{collected}}$$

where $IR_{\text{manure storage}}$ is the improvement rate (1.22 from Rufino et al., 2007) linked to covering the manure heap during storage, $NE_{\text{manure storage}}$ is N efficiency during manure storage and $N_{\text{collected}}$ is the N amount in collected material (in kg year⁻¹). In +manure management, incorporation of manure in soil was assumed to be made within 48 hours, which reduced N losses by volatilization by 31% (Smith et al., 2009). Total N of soil was stable in the short term and N losses by erosion and leaching did not change. As in previous scenarios, the remaining N in soil was assumed to be taken up by plant and converted into biomass (Appendix 6). Increased production of fodder crop resulted in an increase in feed supply for dairy cows (diet variation controlled) and a moderate increase in milk production as a consequence. Milk production (*Milk*) induced by additional forage intake was estimated as following (in kg FM milk):

$$Milk = \frac{6.25}{0.048} \times N_{\text{feed}} \times D_{\text{feed}}$$

where N_{feed} is the amount of N (in kg) and D_{feed} the apparent digestibility of CP content (kg DM⁻¹) in additional forage intake. The non-digested N ($1 - D_{\text{feed}}$) was assumed to return into faeces.

Scenario 4, +{concentrate, manure management}: Scenarios +concentrate and +manure management combined

The scenario +{concentrate, manure management} combined scenarios +concentrate and +manure management and was a combination of the main assumptions described previously for these two scenarios.

Appendix 6: Nitrogen plant exportation (kg N per t of FM), minimum, maximum and median values (from Husson et al., 2009)

Crop	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>median</i>
Rice (paddy)	12	20	16
Rice (straw)	10	15	12.5
Maize (grains)	15	25	20
Maize (straw)	13	15	14
Wheat (grains)	20	35	27.5
Brachiaria ruziziensis (fodder)	10	30	20
Beans (grains)	35	40	37.5
Potatoes (tuber)	3	6	4.5
Cassava (tuber)	2	5	4.5
Sweet potatoes (tuber)	4	6	5

Appendix 7: Agricultural gross margin (in US \$) according the fluctuation of $\pm 20\%$ of products and input prices across the four farms and the four scenarios

Scenario	Rice prices		Milk prices		Urea prices		Concentrate prices	
	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%	-20%
Farm 1								
<i>baseline</i>	26 097	25 925	34 083	17 938	25 953	26 068	22 256	29 765
<i>+concentrate</i>	32 356	32 158	40 733	23 780	32 199	32 314	28 113	36 401
<i>+mineral fertilizer</i>	26 649	26 105	34 450	18 304	26 205	26 549	22 623	30 131
<i>+manure management</i>	26 302	26 090	34 269	18 123	26 139	26 253	22 441	29 950
<i>+{concentrate, manure management}</i>	32 843	32 629	41 279	24 192	32 678	32 793	28 592	36 879
Farm 2								
<i>baseline</i>	845	774	1 186	436	742	877	769	850
<i>+concentrate</i>	2 286	2 210	2 955	1 545	2 180	2 315	2 171	2 324
<i>+mineral fertilizer</i>	840	591	1 092	341	544	887	675	756
<i>+manure management</i>	959	860	1 292	529	842	977	869	950
<i>+{concentrate, manure management}</i>	2 390	2 290	3 054	1 631	2 272	2 408	2 264	2 417
Farm 3								
<i>baseline</i>	1 173	957	1 557	573	1 043	1 086	841	1 288
<i>+concentrate</i>	3 694	3 466	4 701	2 459	3 559	3 601	3 265	3 895
<i>+mineral fertilizer</i>	1 446	1 004	1 717	733	1 113	1 336	1 001	1 449
<i>+manure management</i>	2 447	2 214	2 960	1 702	2 309	2 352	2 107	2 555
<i>+{concentrate, manure management}</i>	5 280	5 042	6 456	3 867	5 140	5 183	4 846	5 477
Farm 4								
<i>baseline</i>	92	92	145	40	92	93	92	92
<i>+concentrate</i>	802	802	1 044	560	801	802	766	838
<i>+mineral fertilizer</i>	208	106	210	104	117	197	157	157
<i>+manure management</i>	94	94	147	41	93	94	94	94
<i>+{concentrate, manure management}</i>	804	804	1 047	562	804	805	768	840

Biomass management on smallholder crop–livestock systems of highlands of Madagascar: effects on farm sustainability.

Mixed crop-livestock systems constitute the backbone of agriculture in developing countries. In highlands of Madagascar, crop–livestock systems are based on rice and cattle. Cattle play a major role in the economy and the social recognition of these smallholder farms. Smallholder farms used to face with low crop productivity related to soil fertility degradation and to low access to inputs. In this context, smallholders have to manage plant resources in order to find a trade-off between food, feed and soil returns. Some biomass management may increase soil fertility degradation and then compromise farms sustainability.

The objective of this thesis is to show that the diversity of biomass management on smallholder crop–livestock systems of highlands of Madagascar determines the sustainability of farming systems in terms of soil fertility, nutrients recycling, incomes and food security. For this, it was necessary to: i) characterize the diversity of crop-livestock systems in the region of Vakinankaratra and understand how smallholder farms are managed; ii) study the effects of soil management on the soil variability; iii) assess the farms sustainability and explore improvements of feeding, manure management and fertilization.

Four crop-livestock farms of the Vakinankaratra (selected with local experts) were surveyed using participant observation methodology. A typology of crop-livestock farms was performed. Topsoil samples were collected in all plots of the four cases studies. A nitrogen flows calculating tool was developed and has been associated with Network Analysis matrices to generate environmental, social and economic indicators. This tool was used to simulate improvements in feeding, manure management and fertilization.

The typology identified six farm types of crop-livestock systems in the Vakinankaratra. The farms study revealed a great diversity of animal feeding practices, manure management and fertilization. Heterogeneity of soil fertility induced by farmer management was shown. For the four case studies, improved feeding practices on dairy combined with improved manure management have increased environmental (farm nitrogen efficiency, nitrogen recycling, soil nitrogen balance), economic (agricultural gross margin) and social (food self-sufficiency) sustainability.

This study characterized the diversity of crop-livestock farms of the Vakinankaratra, the diversity of practices and their effects on soil fertility. It proved to be an interesting approach to explore options for improving sustainability of crop-livestock farms in context of data scarcity.

Keywords: crop-livestock integration, soil fertility, soil organic carbon, phosphorus, nitrogen recycling, nitrogen efficiency, agricultural gross margin, food self-sufficiency, Network Analysis

Pratiques de gestion de la biomasse au sein des exploitations familiales d'agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar : conséquences sur la durabilité des systèmes

Les exploitations mixtes d'agriculture-élevage sont le pilier des systèmes agricoles des pays en développement. Dans les hauts plateaux de Madagascar, les exploitations familiales d'agriculture-élevage sont basées sur l'association riz et élevage bovin. Les bovins ont un rôle central dans l'économie et la reconnaissance sociale de ces exploitations malgaches. Cependant ces exploitations sont souvent confrontées à des problèmes de faibles productivités liés à la dégradation de la fertilité des sols et à un accès limité aux intrants. Dans ce contexte, les exploitants doivent gérer les ressources végétales pour trouver un compromis entre alimentation humaine, alimentation animale et retours aux sols. Certaines pratiques de gestion des biomasses peuvent aggraver les phénomènes de dégradation de la fertilité des sols et remettre alors en cause la durabilité des exploitations.

L'objectif de cette thèse est de montrer que la diversité des pratiques de gestion des biomasses au sein des exploitations familiales d'agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar conditionne la durabilité des systèmes en termes de fertilité des sols, de recyclage des éléments nutritifs, de revenus et de sécurité alimentaire. Pour cela, il a été nécessaire de : i) caractériser au préalable la diversité des exploitations familiales d'agriculture-élevage du Vakinankaratra et de comprendre le fonctionnement de ces exploitations mixtes ; ii) étudier les effets des pratiques de gestion des parcelles sur la variabilité de la fertilité des sols des exploitations ; iii) évaluer la durabilité des exploitations d'agriculture-élevage et tester l'impact d'améliorations des pratiques d'alimentation animale, de gestion des effluents et de fertilisation sur la durabilité des exploitation.

Quatre exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra, sélectionnées à dire d'experts, ont été enquêtées par immersion. Une étude typologique des exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra a été effectuée. Des prélèvements de sol ont été effectués pour l'ensemble des parcelles des quatre exploitations d'agriculture-élevage étudiées. Un outil de calcul des flux d'azote au sein des exploitations a été élaboré, puis a été associé aux matrices du Network Analysis afin de générer des indicateurs environnementaux, sociaux et économiques. Cet outil a été utilisé pour simuler les options d'améliorations des pratiques d'alimentation animale, de gestion des effluents et de fertilisation.

L'étude typologique a identifié six types d'exploitations d'agriculture-élevage au Vakinankaratra. L'étude du fonctionnement des exploitations sélectionnées a mis en évidence d'une grande diversité des pratiques d'alimentation des animaux, de gestion des effluents d'élevage et de fertilisation. Une hétérogénéité de la fertilité des sols induite par les pratiques de gestion des parcelles a été révélée. Pour les quatre exploitations étudiées, l'amélioration des pratiques d'alimentation du troupeau bovin laitier associée à l'amélioration des pratiques de gestion des effluents d'élevage a permis d'améliorer la durabilité environnementale (efficacité azotée globale, recyclage de l'azote, bilan azoté du sol), économique (marge brute agricole) et sociale (autosuffisance alimentaire).

Ce travail a permis de caractériser la diversité des exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra, la diversité des pratiques et leurs effets sur la fertilité du/des sol. Cette étude s'est avérée être une approche intéressante pour évaluer des options d'amélioration de la durabilité des exploitations d'agriculture-élevage dans un contexte peu documenté.

Mots clés : intégration agriculture-élevage, fertilité du sol, carbone organique du sol ; phosphore du sol ; recyclage de l'azote, efficacité azotée, marge brute agricole, autosuffisance alimentaire, Network Analysis.