



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES  
ECOLE DOCTORALE A2E « AGRICULTURE-ELEVAGE-ENVIRONNEMENT »**

**THESE**

Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques

**TRANSFERT DE FERTILITE DANS DES EXPLOITATIONS  
D'AGRICULTURE-ELEVAGE MALGACHES  
Cas de la région du Vakinankaratra**

par

**Marie Lucia FANJANIAINA**

Soutenu le 18 Avril 2018 devant le jury composé de :

Vonjison RAKOTOARIMANANA	Professeur (HDR), Université d'Antananarivo, Madagascar	Rapporteur externe
Volatsara RAHETLAH	Professeur (HDR), Université d'Antananarivo, Madagascar	Rapporteur interne
Paulo SALGADO	Docteur chercheur CIRAD Antsirabe, Madagascar	Examineur
Tovonirina RAFOLISY	Enseignant chercheur (HDR) Laboratoire des Radiosotopes, Madagascar	Examineur
Lilia RABEHARISOA	Professeur Titulaire (Doctorat d'Etat), LRI-Université d'Antananarivo, Madagascar	Directeur de thèse
Thierry BECQUER	Directeur de Recherche IRD (HDR), UMR Eco&Sols, Montpellier, France	Directeur de thèse





**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES  
ECOLE DOCTORALE A2E « AGRICULTURE-ELEVAGE-ENVIRONNEMENT »**

**THESE**

Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques

**TRANSFERT DE FERTILITE DANS DES EXPLOITATIONS  
D'AGRICULTURE-ELEVAGE MALGACHES  
Cas de la région du Vakinankaratra**

par

**Marie Lucia FANJANIAINA**

Soutenue le 18 Avril 2018 devant le jury composé de :

Vonjison RAKOTOARIMANANA	Professeur (HDR), Université d'Antananarivo, Madagascar	Rapporteur externe
Volatsara RAHETLAH	Professeur (HDR), Université d'Antananarivo, Madagascar	Rapporteur interne
Paulo SALGADO	Docteur chercheur CIRAD Antsirabe, Madagascar	Examineur
Tovonirina RAFOLISY	Enseignant chercheur (HDR) Laboratoire des Radiosotopes, Madagascar	Examineur
Lilia RABEHARISOA	Professeur Titulaire (Doctorat d'Etat), LRI-Université d'Antananarivo, Madagascar	Directeur de thèse
Thierry BECQUER	Directeur de Recherche IRD (HDR), UMR Eco&Sols, Montpellier, France	Directeur de thèse





## REMERCIEMENTS

Cette thèse a été réalisée avec la collaboration scientifique du Laboratoire des Radiosotopes (LRI), de l'Ecole Supérieure des sciences Agronomiques (ESSA) de l'Université d'Antananarivo, de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), du Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) et du Centre de développement rural et de recherche appliquée en agriculture et en élevage (FIFAMANOR), dans le cadre du projet Recyclage des BIOMasses Végétales et Animales dans les systèmes d'agriculture élevage (BIOVA), financé par l'Union Africaine. Je tiens ici à présenter mes vives reconnaissances.

Elle a également bénéficié du financement et de l'appui matériel de plusieurs institutions : l'IRD grâce au financement d'une bourse de thèse ARTS (Allocations de recherche pour une thèse au Sud), l'Union Africaine au travers du projet BIOVA, l'Ambassade de France, à travers le Service de Coopération et d'Action Culturelle (SCAC), pour une bourse BGF (Bourse du Gouvernement Français), l'International Foundation of Science (IFS) par le financement d'une bourse de recherche. Je les remercie de m'avoir octroyé ces financements et bourses d'études.

Je tiens également à remercier l'UMR Eco&Sol, Montpellier, et l'UMR SELMET (CIRAD), Saint-Pierre, La Réunion, de m'avoir accueilli au sein de leurs laboratoires respectifs.

Tous mes remerciements vont à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques de l'Université d'Antananarivo, sous la direction du Professeur Bruno RAMAMONJISOA, ainsi qu'à l'Ecole Doctorale Agriculture-Elevage-Environnement (A2E), à tous les enseignants et personnels administratifs, pour avoir accepté mon inscription en thèse.

Faire une thèse demande beaucoup d'investissements et de travail mais cela a été une expérience très enrichissante. Ainsi, ce travail n'a pu aboutir sans le concours de nombreuses personnes à qui j'aimerais témoigner ici ma profonde gratitude et reconnaissance, plus particulièrement à :

- Madame Lilia RABEHARISOA, Directeur de Thèse et Directeur de l'Ecole Doctorale Agriculture – Elevage – Environnement, de m'avoir accueillie au Laboratoire des Radiosotopes au tout début de mes travaux de recherche et d'avoir accepté de diriger cette thèse.
- Monsieur Thierry BECQUER, Chercheur à l'IRD, UMR Eco & Sols, Montpellier, et co-directeur de thèse, pour la confiance et les aides qu'il m'a accordé durant toutes ces années de thèse, tant au niveau financier, matériels que scientifique. Le partage de connaissances et d'expériences que tu as menés, ton enthousiasme et implication

dans les différentes démarches, m'ont été très chers et ont permis à la concrétisation du présent travail.

Je tiens à remercier vivement tous les membres du Jury de cette thèse :

- Monsieur Vonjison RAKOTOARIMANANA, professeur à l'université d'Antananarivo pour m'avoir fait l'honneur d'être le rapporteur externe de cette thèse et pour son entière disponibilité malgré ses occupations.
- Madame Volatsara RAHETLAH, professeur à l'université d'Antananarivo, qui a bien voulu accepter d'être rapporteur interne de ce travail malgré ses nombreuses responsabilités.
- Monsieur Tovo RAFOLISY, chercheur au Laboratoire des Radiosotopes, qui a bien voulu accepter d'être examinateur de ce travail.
- Monsieur Paulo SALGADO, chercheur au CIRAD, pour tout ce qu'il a apporté à cette thèse sous différents angles et d'avoir accepté d'examiner ce travail. Ta participation aux comités de thèse, tes conseils, ta rigueur, ton soutien, et ton implication m'ont été vraiment précieux pour la réalisation de cette thèse.

Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à :

- Harillala ANDRIAMANIRAKA, Chef de Département de la Mention AT2D - Département Agriculture- Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, d'avoir accepté d'être parmi les membres du comité de thèse et d'avoir participé aux différentes démarches administratives.
- Emmanuel TILLARD de l'UMR SELMET, La Réunion, d'avoir accepté d'être membre du comité de cette thèse et de m'avoir accueilli à La Réunion. Tes nombreuses suggestions et orientations m'ont été si importantes pour mener à bien cette étude.
- Toute l'équipe du LRI : chercheurs, doctorants, techniciens pour leur convivialité et soutien apporté tout au long de la réalisation de cette thèse. Merci à Modeste Rakotondramanana, Marie-Paule Razafimanantsoa, Damase Andrianantenaina, pour leurs aides et collaborations lors des prélèvements d'échantillons et des différents travaux au laboratoire.
- Toute l'équipe du FIFAMANOR, pour leurs aides lors des prélèvements d'échantillons de biomasses et les analyses SPIR, particulièrement à José Andriarimalala, Bernadette Razaiarivony et Jules Rakotomahandry.
- Toute l'équipe du projet BIOVA coordonnée par Madame Vololonirina Ramalanjaona, pour l'appui financier, matériel et scientifique.

- Serge Nabeneza qui m'a initié à l'utilisation de l'outil SPIR et qui m'a beaucoup aidé lors de mon séjour à la Réunion pour la chimiométrie. Merci pour les formations SPIR, les conseils qui m'ont été très utiles.
- Fidiniaina R. Andriandrahona, pour son aide à la collecte d'une partie de mes échantillons et les informations qu'il a fourni.
- Stéphanie Alvarez, qui a accepté de partager ses expériences pour la réalisation de la partie caractérisation des flux et a participé à la mise en place des études sur terrain.
- Tous les agriculteurs des exploitations agricoles étudiées, particulièrement Alain, Alfred, Emilie, Armand, qui ont bien voulu nous fournir toutes les informations utiles à la préparation de cet ouvrage, et nous ont aidés, avec beaucoup de dynamisme et de patience, à la collecte des échantillons sur le terrain. Sans vous, cette étude n'aurait pas pu être faite.
- Toutes mes ami(e)s et les personnes qui, par leurs conseils, leur soutien, ou simplement par leur présence, m'ont permis de tenir à mes convictions au cours de toutes ces années.

J'adresse mes sincères reconnaissances à toute ma famille et à ma belle-famille pour leurs soutiens et encouragements indéfinis : au courage de mes chers parents, à l'assistance de mon grand frère, aux sourires et à l'empathie de mes sœurs, à la présence de mes nièces et neveux.

Mes tendres pensées à mon cher mari Mamy Rakotomanantsoa d'avoir été toujours là pour moi avec une totale compréhension et amour que je ne saurais même pas expliquer et, enfin, à ma petite fille Mioty Lucianah qui est la source de ma motivation. C'est à vous deux que je dédie cette thèse en témoignage de mon amour !

Que ceux que je n'ai pas pu citer ici veuillent bien m'excuser et qu'ils puissent trouver dans ce manuscrit, l'image de leur contribution et ma sincère gratitude.

**Fanja...**

## FINTINA

Ny fihenana ny fahalonahana ny tany dia manimba ny fiharin-karenana ireo tantsaha sady loza mitatao amin'ny tsy fahampian-tsakafo. Ny fahalonahana ny tany dia tsy mitsaha-mihena noho ny fahalasan'ireo singa mpamelona ny zavamaniry : na izany miainga avy amin'ny fikaohan'ny riaka ny tany na noho ny singa anaty vokatry ny tany izay miondrana kanefa tsy voasolon'ny fitondrana zezika. Tranga tena manaitra aty Afrika izany satria olana tena mipetraka ny fahafahana ireo tantsaha mitondra zezika. Ao anatin'izany toe-javatra izany, ny fampivoarana ny rafim-pamokarana mahomby kokoa, izay mampivady ny fambolena sy ny fiompiana, dia hita ho fomba iray azo hanatsarana ny faharetan'ny rafi-pamokarana amin'ny lafiny fitantanana ny antontan'akora avy amin'ny zava-maniry sy ny zava-mananaina (na *biomasse*) miaraka amin'ny singa ao anatin'ny. Ao anatin'ny rafi-pamokarana izay ambany ny taha fitondrana zezika dia ilaina ny fahalalana ny fifandanjan'ireo singa mineraly mba hahafantarana ny fifindran'ny zinan'ny toeram-pambolena iray sy ny fahatezan'ny rafi-pamokarana : ao ireo singa mivoaka eo amin'ny saha (amin'ny alalan'ny voa, mololo, vilona), ary ao ny miditra (toy ny zezika sy ny kaompaositra). Izany no atao dia ny mba ho fanatsarana ny fitantanana ireo singa mineraly eo amin'ny toeram-pambolena. Mba hahatrarana ny tanjona dia niroso tamin'ny fanangonana santionana vary, vilona, zezika ary tany amin'ireo saha samihafa ny fikarohana. Avy eo dia natao fitiliana tany amin'ny toeram-pikarohana (*laboratoire*) ireo akora voaangona ireo mba hahalalana ny tahan'ny Karbona (C) sy ireo singa mineraly (azota (N), ny faosfaoro (P), potasioma (K), kalsioma (Ca), Magnesioma (Mg)) ao amin'izy ireo tsirairay avy. Nisy koa ny fandalinana natao teo anivon'ireo tantsaha mpamboly sady miompy, miisa efatra, tao Vakinankaratra, ka nokajiana tamin'izany ny fifandanjan'ireo « *biomasse* » sy ireo singa mineraly eo anivon'ny rafi-pamokarany. Notiliana tamin'ny alalan'ny fomba iray vaovao entina hitarafana ny taratry ny singa tsirairay anatin'ny faritra iva ny hazavana tsy hita maso izay antsoina hoe « *Spectrométrie Proche Infrarouge (SPIR)* » ihany koa ireo santionana vary, vilona, zezika ireo. Ka nisy ny fanolorana ny atao hoe « *modèles de prédiction* » izay karazana lasitra hahafahana manombana ireo taha ho an'ny singa tsirairay (C, N, P, K, Ca sy Mg) miainga amin'ny vokatry ny fitarafana ny akora amin'ny alalan'ny SPIR. Ny valin'ny kajikajy natao dia nahitana fa ambony tokoa ny fanondranana ireo singa mineraly sy organika miala eny an-tsaha amin'ny alalan'ny vokatra (vary, vilona), izay toy izao manaraka izao : 57 kg N ha<sup>-1</sup>, 6 kg P ha<sup>-1</sup> et 33 kg K ha<sup>-1</sup> no miala amin'ny famokarana voam-bary sy vilona ; 115-160 kg N ha<sup>-1</sup>, 20-40 kg P ha<sup>-1</sup> et 110-230 kg K ha<sup>-1</sup> kosa no miala avy amin'ny famokarana 10 t ha<sup>-1</sup> vilona maina. Ny fikajiana ny fifandajana ankapoben'ireo singa isaky ny tantsaha niarahana niasa dia nampiseho ihany koa fa misy ny fahaverezan'ireo singa (C, N, P, K, Mg) eo amin'ny rafi-pamokarana fambolena,

satria tsy voasolo manontolo amin'ny alalan'ny fitondrana zezika avy amin'ny rafipamokarana fiompiana ny singa aondran'ny vokatra. Tsy ampy noho izany ny fifamenoana eo amin'ny rafim-pamokarana . Na izany aza, ny fifidianana sakafom-biby avy any ivelany (provandy), izay betsaka azota sy singa mineraly hafa (indrindra kalsioma) dia mampihena io tsy fifandanjana io. Azo heverina izany, indrindra ho an'ireo ireo tantsaha mpamokatra ronono ka manana fahafahana mividy provandy.

Ny fikarohana natao, izay nampiasana ny SPIR dia nahafahana milaza fa tsara ny « *modèle de prediction* » ho an'ny C sy N ( $R^2v > 0, 80$ ). Valiny maha-po sy mampisy fanantenana kosa no azo tamin'ireo singa mineraly toy ny P, K, Ca, Mg anaty *biomasse* raha nampiasana ilay fomba manokana zay antsoina hoe “*calibration en LOCAL*”. Ireo vokatra ireo dia manamafy fa azo ampiasaina tsara ny SPIR ho fanampiny na hanoloana ny fomba fitiliana simika izay misy ankehitriny hanampy amin'ny fintantana mahomby ireo singa mineraly sy organika eo amin'ny toeram-pamokarana iray.

**Teny manan-danja:** fifindran'ny zinan'ny toeram-pambolena, *Spectrométrie infrarouge*, Fampivadiana ny fambolena sy fiompiana, fiovaovan'ny tahan'ny singa, Madagasikara.

## RESUME

La faible fertilité des sols est un élément majeur expliquant la grande vulnérabilité économique des agriculteurs et le risque élevé d'insécurité alimentaire. La fertilité des sols, qui tend à diminuer du fait de l'exportation d'éléments nutritifs dans les récoltes et des pertes par lixiviation et érosion, non compensées par l'apport de fertilisants, est alarmante en Afrique, d'autant que l'accès aux fertilisants est toujours plus problématique. Dans un tel contexte, le développement de systèmes de production plus efficaces, associant agriculture et élevage, apparaît comme une voie possible d'amélioration de la résilience des systèmes de production en termes de gestion des biomasses et des nutriments. Dans des systèmes à faibles apports d'intrants, une connaissance précise des bilans minéraux, donc des transferts de fertilité, à travers l'estimation des bilans organiques et minéraux suite à l'exportation de produits agricoles (grains, pailles, fourrages) ou à l'apport de résidus (amendements organiques, fumiers, composts), est indispensable pour une bonne gestion des ressources minérales à l'échelle de l'exploitation agricole. Des échantillons de riz, de fourrage, de fumier ont été collectés au niveau de diverses parcelles agricoles et analysés pour leurs teneurs en C et nutriments (N, P, K, Ca, Mg). Au niveau de quatre fermes du Vakinankaratra en agriculture-élevage, des bilans globaux des transferts de biomasses et d'éléments minéraux ont aussi été réalisés. L'ensemble des biomasses analysées ont été caractérisées par spectrométrie proche infrarouge (SPIR) et des modèles de prédiction des teneurs en C, N, P, K, Ca et Mg ont été proposés. Les transferts d'éléments nutritifs induits par les récoltes (riz et fourrage) ont entraîné des exportations importantes de nutriments hors de la parcelle : 57 kg N ha<sup>-1</sup>, 6 kg P ha<sup>-1</sup> et 33 kg K ha<sup>-1</sup> lors de l'exportation de pailles et grains de riz ; 115-160 kg N ha<sup>-1</sup>, 20-40 kg P ha<sup>-1</sup> et 110-230 kg K ha<sup>-1</sup> pour des fourrages produisant 10 t ha<sup>-1</sup> de matière sèche. Les bilans globaux des fermes ont révélés des pertes en C, N, P, K, Mg au niveau du compartiment agriculture qui ne sont pas compensés par l'apport du fumier provenant du compartiment élevage. Néanmoins, dans les grandes exploitations laitières, l'achat d'aliments du bétail, riches en N et minéraux (notamment Ca), limite ce déséquilibre. Les modèles de prédiction des teneurs en C et N développés présentent de bonnes précisions ( $R^2_v > 0,80$ ). Des résultats acceptables ( $R^2_v$  de 0,69 à 0,77) et encourageants ont été obtenus pour prédire les nutriments (P, K, Ca, Mg) des biomasses avec une méthode de calibration en LOCAL. Ces résultats mettent en évidence l'aptitude de la SPIR pour être utilisée en complément ou en remplacement des méthodes analytiques existantes, afin de contribuer à mieux gérer les ressources minérales à l'échelle d'une exploitation.

**Mots- Clés :** Transferts de fertilité, Spectrométrie infrarouge, Intégration agriculture élevage, Flux de nutriments, Madagascar.

## ABSTRACT

Low soil fertility is a major factor explaining the high economic vulnerability of farmers and the high risk of food insecurity. Soil fertility tends to decrease as a result of the output of nutrients by crops and through losses by leaching and erosion. As the access to fertilizers is always more problematic, the decline of soil fertility, which is not offset by fertilizer input, is alarming in Africa. In such a context, the development of more efficient production systems, combining agriculture and livestock, appears as a possible way to improve the resilience of production systems in terms of biomass and nutrient management. In systems with low inputs, an accurate knowledge of mineral budget, and thus of fertility transfers, through the estimation of organic and mineral balances following the export of agricultural products (grains, straws, fodder) or input of organic amendments (manures, compost) is essential for a good management of the mineral resources at the farm scale. Samples of rice, fodder, manure were collected from various agricultural plots and analyzed for their C and nutrient contents (N, P, K, Ca, and Mg). Global balances for biomass and mineral transfer were also carried out for four farm-livestock farms from Vakinankaratra region. All biomasses analyzed were also characterized by near infrared spectroscopy (NIRS) and prediction models for C, N, P, K, Ca and Mg were developed. Crop-induced nutrient transfers (rice and forage) resulted in significant nutrient exports out of the plot: 57 kg N ha<sup>-1</sup>, 6 kg P ha<sup>-1</sup> and 33 kg K ha<sup>-1</sup> with the harvest of straws and grains of rice; 115-160 kg N ha<sup>-1</sup>, 20-40 kg P ha<sup>-1</sup> and 110-230 kg K ha<sup>-1</sup> for forage producing 10 t ha<sup>-1</sup> dry matter. The overall balance at the farm scale revealed losses in C, N, P, K, and Mg in the agricultural compartment which are not offset by the contribution of manure from the livestock compartment. Nevertheless, in large dairy farms, the purchase of livestock feed, rich in N and minerals (especially Ca), limits this imbalance. The prediction models of the contents in C and N, using NIRS, have good precisions ( $R^2_v > 0.80$ ). Acceptable ( $R^2_v$  from 0.69 to 0.77) and hopeful results were obtained to predict nutrients (P, K, Ca, Mg) with a LOCAL calibration method. These results highlight the ability of NIRS to be used to complement or replace existing analytical methods to best manage mineral resources at the farm level.

**Keys-words:** Fertility transfer, Near Infrared, Crop-livestock integration, Nutrients flows, Madagascar.

# SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES .....	i
LISTE DES TABLEAUX .....	iii
LISTES DES FIGURES.....	v
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1. Synthèse Bibliographique.....</b>	<b>7</b>
1.1..... Caractéristiques des exploitations agricoles familiales de la région du Vakinankaratra	8
1.1.1. La région des Hautes Terres .....	8
1.1.2. La région du Vakinankaratra.....	11
1.1.2.1. Localisation et rappel des grandes caractéristiques.....	11
1.1.2.2. Caractéristiques biophysiques .....	13
1.1.2.3. Particularités de l’agriculture de la zone : diversité des systèmes de production	14
1.1.2.4. La place de l’élevage bovin dans la zone .....	16
1.2. La place de l’intégration agriculture-élevage au sein de l’exploitation agricole .....	18
1.3. Le transfert de fertilité et flux de biomasses .....	20
1.3.1. La notion de transfert de fertilité.....	20
1.3.2. Transfert de fertilité à l’échelle des exploitations agricoles malgaches.....	24
1.3.3. Rôle de l’élevage dans le flux de biomasses.....	26
1.4. Intérêts de la spectrométrie infrarouge dans la caractérisation des biomasses.....	27
1.4.1. Intérêts de la spectrométrie infrarouge .....	27
1.4.2. Principe de la spectrométrie Proche infrarouge .....	30
1.4.3. Application de la Spectrométrie Proche Infrarouge dans l’analyse de plantes et matières organiques.....	33

Chapitre 2. Transfert de fertilité et potentiel d'acidification .....	<b>37</b>
2.1. Introduction .....	<b>40</b>
2.2. Materials and methods .....	<b>42</b>
2.2.1. Mixed farming system.....	42
2.2.2. Sample collection and analysis.....	43
2.2.3. Statistical analyses.....	46
2.3. Results .....	<b>47</b>
2.3.1. Mineral composition of plants and manures .....	<b>47</b>
2.3.2. Biomass production and nutrient removal.....	49
2.3.3. Ash alkalinity of biomass .....	49
2.4. Discussion .....	<b>51</b>
2.4.1. Fertility transfer and soil nutrient losses .....	51
2.4.2. Acidification potential of biomass harvest.....	53
2.4.3. Manure as an alternative solution to nutrient depletion and soil acidification? .....	54

**Chapitre 3. Flux de biomasses et nutriments à l'échelle des exploitations mixtes  
d'agriculture-élevage de la région Vakinankaratra .....** **58**

3.1. Introduction .....	59
3.2. Méthodologie .....	60
3.2.1. Typologie des exploitations mixtes d'agriculture-élevage de la région Vakinankaratra .....	60
3.2.2. Identification et choix des exploitations étudiées.....	62
3.2.3. Collecte des données .....	65
3.2.4. Prélèvements d'échantillons et mesures de biomasses.....	68
3.2.5. Détermination des éléments nutritifs des biomasses .....	70

3.2.6. Quantification des flux de ressources à l'échelle de l'exploitation et de chaque compartiment .....	71
3.2.6.1. Carte des flux de ressources .....	71
3.2.6.2. Méthode du bilan apparent .....	73
3.3. Résultats .....	74
3.3.1. Caractérisation des exploitations agricoles .....	74
3.3.1.1. Caractérisation socio-économique .....	74
3.3.1.2. Les productions agricoles des exploitations .....	75
3.3.1.3. Les productions animales des exploitations .....	77
3.3.2. Les flux de biomasses et nutriments dans les exploitations .....	78
3.3.2.1. Caractérisation chimique des biomasses .....	78
3.3.2.2. Flux de biomasses .....	80
3.3.3. Bilans de carbone et nutriments à l'échelle des exploitations .....	84
3.3.3.1. Bilan C et N .....	84
3.3.3.2. Bilan en nutriments .....	91
3.4.1. Limites méthodologiques .....	99
3.4.2. Flux de ressources et bilans d'éléments nutritifs .....	100
3.4.3. Opportunités d'intégration agriculture - élevage .....	103
3.5. Conclusion.....	<b>104</b>

**Chapitre 4. La Spectrométrie Proche Infrarouge comme outil de caractérisation des flux de nutriments..... 105**

4.1. Introduction .....	106
4.2. Matériels et méthodes.....	108
4.2.1. Zone d'étude et échantillonnage.....	108
4.2.2. Analyses chimiques en laboratoire.....	109
4.2.3. Modélisation avec la SPIR .....	110

4.2.3.1. Analyses spectrales .....	110
4.2.3.2. Prétraitement des données spectrales .....	110
4.2.3.3. Elaboration des modèles de prédiction.....	111
4.3. Résultats .....	114
4.3.1. Statistiques descriptives des résultats d'analyses au laboratoire.....	114
4.3.2. Caractérisation spectrale des échantillons.....	114
4.3.3. Calibration et validation .....	117
4.3.3.1 Modèle GLOBAL .....	117
4.3.3.2 Comparaison modèles GLOBAL et LOCAL.....	123
4.4. Discussion .....	127
4.4.1. Données disponibles.....	127
4.4.2. Comparaison des modèles GLOBAL et LOCAL.....	129
4.4.2. Comparaison des données avec les études internationales.....	130
4.5. Conclusion.....	131
<b>Conclusion générale, Perspectives, Limites .....</b>	<b>133</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>141</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>157</b>

## LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

°C : Degré Celsius	FOFIFA : FOibem-pirenena momba ny
ACP : Analyse en Composantes Principales	Flkarohana ampiharina amin'ny
AgCl : Chlorure d'Argent	Fampandrosoana ny eny Ambanivohitra
Al : Aluminium	ou Centre national de la recherche
ALI : Aliments pour les animaux	appliquée au développement rural
ANC : <i>Acid Neutralizing Capacity</i>	FUM : Fumiers achetés par
ANI : Achat d'animaux	l'exploitation
ANOVA : <i>ANalysis Of Variance</i>	g : Gramme
B : Bore	ha : Hectare
b : Coefficient de régression	IAE : Intégration Agriculture Elevage
Ba : Barium	IFS : <i>International Foundation of</i>
BIOVA : Recyclage des BIOmasses Végétales	<i>Science</i>
et Animales dans les systèmes mixtes	IN : Entrées en nutriments
d'agricultures – élevage	INSTAT : Institut National de la
C : Carbone	Statistique
Ca : Calcium	IRD : Institut de Recherche pour le
CaCO <sub>3</sub> : Carbonate de calcium	Développement
Cd : Cadmium	K : Potassium
CEC : <i>Cation Exchange Capacity</i>	Kg : Kilogramme
CIRAD : Centre de coopération Internationale	Km : Kilomètre
en Recherche Agronomique pour le	Km <sup>2</sup> : Kilomètre carré
Développement	L : litres
Cl : Chlore	LAI : Lait vendu
cm : Centimètre	Li : Lithium
C <sub>org</sub> : <i>Total organic carbon content</i>	LRI : Laboratoire des Radio-isotopes
Cr : Chrome	m : mètre
Cu : Cuivre	Max : Maximum
DM : <i>Dry Matter</i> ;	MDB : <i>Malagasy Dairy Board</i>
DT : <i>Detrend</i>	Mg : Magnésium
E : <i>East</i>	mg : Milligramme
ENG : Engrais	Min : Minimum
FM : <i>Fresh matter</i>	MIR : <i>Mid InfraRed</i>
	mm : millimètre

Mn : Manganèse  
 Mo : Molybdène  
 Mol : mole  
 MS : Matière Sèche  
 MF : Matière Fraîche  
 N : Azote  
 Na : Sodium  
 Nc : Nombre d'échantillons en set de calibration  
 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> : ion Ammonium  
 Ni : Nickel  
*NIR : Near InfraRed*  
 nm : nanomètres  
 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> : Ion Nitrate  
 Nv : Nombre d'échantillons en set de validation,  
 O : Oxygène  
 OEUF : Œufs produits  
 OH<sup>-</sup> : Hydroxyde  
 OP : Organisation Paysannes  
 OUT : Sorties en nutriments  
 P : Phosphore  
 PAM : Programme Alimentaire Mondial  
 Pb : Plomb  
 pH : Potentiel Hydrogène  
 PIB : Produit Intérieur Brut  
*P<sub>iresin</sub> : = Available phosphorus*  
*PLS : Partial Least Square*  
 PRN : Pie Rouge Norvégienne  
*P<sub>total</sub> : Total phosphorus*  
 r<sup>2</sup> : Coefficient de détermination  
 R<sup>2</sup><sub>c</sub> : Coefficient de détermination en calibration  
 R<sup>2</sup><sub>v</sub> : Coefficient de détermination en validation  
 RER : Ratio Erreur de la Série ;  
*RMSE : Root Mean Square Error*  
*RMSEC : Root Mean Squared Error en calibration*

*RMSECV : Root Mean Squared Error Of Cross Validation*  
*RMSEP : Root Mean Squared Error of Prediction*  
 RPD<sub>c</sub> : Rapport entre l'écart type de la valeur mesurée, calibration  
 RPD<sub>v</sub> : Rapport entre l'écart type de la valeur mesuré en validation  
 S : Soufre  
 SAU : Surface Agricole Utile  
 SCAC : Service de Coopération et d'Action Culturelle  
*SD : Standard Déviation ou écart-type;*  
*SEC: Standard Error of Calibration*  
*SECV : Standard Error of Cross Validation*  
*SEP : Standard Error of Prediction*  
 Si : Silice  
*SNV : Standard Normal Variate,*  
*SNVD: Standard Normal Variate and Detrend*  
 SPIR : Spectrométrie Proche Infrarouge  
 T : tonne  
 UMR Eco&Sols : Unité Mixte de Recherche Ecologie fonctionnelle et Biogéochimie des Sols et des Agro-écosystèmes  
 VEG : Produits végétaux vendus  
 VIA : Viande vendue  
*WRB : Word Reference Base for Soil Resources*  
*Yr : year*  
 Zn : Zinc

## **LISTE DES TABLEAUX**

### **Chapitre I**

Tableau 1-1 : Exemple des doses d'épandage des fumures organiques par culture dans la région de Vakinankaratra (adapté d'après les résultats d'Alvarez, 2012). .....	24
Tableau 1-2 : Avantages et limites de la SPIR (d'après la synthèse bibliographique de Rabetokotany (2013)). .....	29
Tableau 1-3 : Exemple de présentation des tableaux sur des statistiques multivariées pour relier les résultats d'une analyse chimique à des données spectrales. ....	32
Tableau 1-4 : Résultats de calibration par SPIR, pour différents minéraux d'échantillons de plantes. ....	34
Tableau 1-5 : Résultats de calibration par SPIR, pour différents minéraux d'échantillons de résidus organiques.....	36

### **Chapitre II**

Table 2-1: Summary statistics for the main chemical properties of the rice and forage plots studied.....	<b>46</b>
Table 2-2: Nutrient dry weight concentrations of rice, forages and manure (mean $\pm$ standard deviation). ....	<b>48</b>
Table 2-3: Biomass production and nutrient removal by harvesting of rice and forages (mean $\pm$ standard deviation). ....	<b>50</b>
Table 2-4: Cation and anion balance, and ash alkalinity of rice, forages and manure (mean $\pm$ standard deviation). ....	<b>51</b>

### **Chapitre III**

Tableau 3-1 : Synthèse des caractéristiques des six groupes.....	62
Tableau 3-2 : Principales caractéristiques des quatre exploitations de l'étude. ....	64
Tableau 3-3 : Synthèse des différentes mesures et activités effectuées.....	67
Tableau 3-4 : Composition du lait, viandes utilisés dans le calcul.....	70
Tableau 3-5 : Nombre d'échantillons de chaque type. ....	71
Tableau 3-6 : Structure des quatre exploitations d'agriculture-élevage sélectionnées.....	74
Tableau 3-7 : Structure de l'élevage des quatre exploitations d'agriculture-élevage sélectionnées.....	77
Tableau 3-8 : Caractérisation chimique des biomasses des exploitations étudiées.....	79

### **Chapitre IV**

Tableau 4-1 : Critères proposés par différents auteurs pour l'évaluation de la précision de la SPIR (d'après Nduwamungu et al., 2009). ....	<b>112</b>
Tableau 4-2 : Résultats des analyses de références. ....	<b>115</b>
Tableau 4-3 : Résultats de la calibration globale avec WinISI. ....	<b>119</b>
Tableau 4-4 : Résultats de la calibration globale avec Unscrambler. ....	<b>120</b>
Tableau 4-5 : Performance des modèles de prédiction pour C, ANC et éléments minéraux des fourrages en calibration et validation.....	<b>122</b>
Tableau 4-6 : Performance des modèles de prédiction du C, ANC, et éléments minéraux du fumier en cross-validation.....	<b>122</b>

# LISTES DES FIGURES

## Chapitre I

Figure 1-1 : Altitude de la région des Hautes Terres malgaches (modifiée selon Braun et al., 1997).....	9
Figure 1-2 : Paysage des Hautes Terres de Madagascar.....	10
Figure 1-3 : Carte des Hautes Terres centrales de Madagascar et de la région du Vakinankaratra (Alvarez, 2012). ....	12
Figure 1-4 : Pluviométrie et températures moyennes dans le Vakinankaratra de 1993 à 2013 (Sourriseau et al., 2016).....	13
Figure 1-5: Intégration de l'agriculture et de l'élevage (Lhoste et al., 2010). ....	20
Figure 1-6 : Flux de matière à l'échelle d'un terroir (Dugué, 1998).....	21
Figure 1-7 : Représentation schématique des transferts des éléments nutritifs et des pertes dans une exploitation mixte d'agriculture-élevage (Alvarez, 2012).....	22
Figure 1-8 : Transfert de l'azote au sein de la ferme, d'après Rufino et al. (2006).....	23
Figure 1-9 : Distribution des spectres électromagnétiques et mise en évidence de la partie visible et moyen infrarouge (d'après McBratney et al., 2003 citée par Ramaroson, 2017). ....	31

## Chapitre II

Figure 2-1: Samples plots.....	44
--------------------------------	----

## Chapitre III

Figure 3-1 : Localisation des quatre exploitations étudiées. ....	65
Figure 3-2 : Prélèvement de biomasses aériennes.....	68
Figure 3-3 : Mesure des biomasses fraîches.....	68
Figure 3-4 : Schéma conceptuel des fermes mixtes d'agriculture-élevage.....	72
Figure 3-5 : Assolement de chaque exploitation. ....	76

Figure 3-6 : Carte des flux de ressources des « <i>Grands éleveurs laitiers</i> » - <i>Exploitation 1.</i> .....	80
Figure 3- 7 : Carte des flux de ressources des « <i>Grands éleveurs laitiers</i> » - <i>Exploitation 2.</i> .....	81
Figure 3- 8 : Carte des flux de ressources des « <i>Petits éleveurs laitiers</i> » - <i>Exploitation 3.</i> .....	81
Figure 3-9 : Carte des flux de ressources des « <i>Petits éleveurs laitiers</i> » - <i>Exploitation 4.</i> .....	82
Figure 3-10 : Bilan de C (a) et N (b) à l'échelle des exploitations. ....	86
Figure 3-11 : Bilan de C (a) et N (b) à l'échelle des exploitations ramené l'hectare par ferme. ....	87
Figure 3-12 : Transfert de C (a) et N (b) entre les systèmes agriculture et élevage au sein des exploitations. ....	89
Figure 3-13 : Transfert de C (a) et N (b) entre les systèmes agriculture et élevage au sein des exploitations ramenés à l'hectare par ferme. ....	90
Figure 3-14 : Bilan de nutriments, P (a), K (b), Ca (c), Mg (d) à l'échelle des exploitations. ....	92
Figure 3-15 : Bilan de nutriments, P (a), K (b), Ca (c), Mg (d) à l'échelle des exploitations ramené à l'hectare.....	93
Figure 3-16: Transfert de P (a), K (b), Ca (c), Mg (d) entre les systèmes agriculture et élevage au sein des exploitations.....	95
Figure 3-17: Transfert de P (a), K (b), Ca (c), Mg (d) entre les systèmes agriculture et élevage au sein des exploitations ramené à l'hectare .....	96
Figure 3-18 : Transfert d'alcalinité entre le système agriculture et élevage. ....	97
Figure 3-19 : Transfert d'alcalinité entre le système agriculture et élevage ramené à l'hectare. ....	98
Figure 3-20 : Flux d'azote à l'échelle d'une exploitation agricole – Bilan au niveau du système d'agriculture et d'élevage. ....	102

## Chapitre IV

Figure 4-1 : Localisation des parcelles de prélèvements.....	109
Figure 4-2 : Schéma de l'application de la SPIR. ....	113
Figure 4-3 : Spectres des différents types d'échantillons.....	116
Figure 4-4 : Analyses en composantes principales des spectres. ....	117
Figure 4-5 : Relation entre valeurs mesurées et prédites en GLOBAL et en LOCAL pour C et N.....	123
Figure 4-6 : Relation entre valeurs mesurées et valeurs prédites en calibration GLOBAL (a) et LOCAL (b) pour P.....	124
Figure 4-7 : Relation entre valeurs mesurées et valeurs prédites en calibration GLOBAL (a) et LOCAL (b) pour Ca, Mg et K.....	125
Figure 4-8 : Relation entre valeurs mesurées et valeurs prédites en calibration GLOBAL (a) et LOCAL (b) pour S et Cl. ....	126
Figure 4-9 : Relation entre ANC mesurée et prédite en calibration GLOBAL (a) et LOCAL (b).....	127

# Introduction générale

---

La conservation de la fertilité des sols est un problème qui se pose avec acuité en zone tropicale. Les fortes dynamiques démographiques, migratoires et d'occupation des sols observées récemment ont souvent remis en cause des équilibres anciens et impacté la fertilité des sols (Lhoste et Richard, 1993). En effet, l'explosion démographique, qui affecte de nombreux pays, a entraîné la surexploitation des terres et de fortes pressions sur les ressources naturelles (Kintche, 2011). La fertilité des sols tend à diminuer du fait de l'exportation d'éléments nutritifs dans les récoltes et des pertes par lixiviation et érosion, non compensées par l'apport d'intrants fertilisants (Stoorvogel et Smaling, 1990). L'exportation quasi-totale des résidus de récolte à travers le brûlis, la vaine pâture, leur usage en combustion domestique et la faible restitution minérale au sol ont été aussi évoquées parmi les principales causes de cette baisse de la fertilité des sols ( Ruffino et al., 2006 ; Rufino et al., 2007). La baisse de fertilité des sols est particulièrement alarmante en Afrique (Stoorvogel et al., 1993). Le problème est ancien, Sanchez et al. (1997) notaient déjà la perte de la productivité agricole de 200 millions d'hectares de terres cultivées à travers le continent africain pendant les 30 années précédant leur travail. Ces dernières années, la hausse du prix du pétrole et l'augmentation conséquente du prix des engrais minéraux a accru les problèmes d'accès aux fertilisants pour les paysans pauvres et a entraîné un appauvrissement rapide des sols en nutriments et une baisse de la productivité des cultures (Schreinemachers et al., 2007).

La faible fertilité des sols est un élément majeur expliquant la grande vulnérabilité économique des agriculteurs et le risque élevé d'insécurité alimentaire dans un contexte de forte croissance de la demande alimentaire. La pauvreté et l'insécurité alimentaire en Afrique sont, en effet, des phénomènes qui touchent en premier lieu les populations rurales (Bockel, 2003). La lutte contre la pauvreté constitue ainsi une priorité pour la plupart des agences d'aide multilatérale et occupe une place centrale dans les politiques économiques actuelles de nombreux pays en développement. Dans un contexte d'accroissement démographique mondial, de 7 à 9 milliards dans les 30 années à venir, les besoins en aliments peuvent passer de 7 gigatonnes (Gt ; 1 Gt = 10<sup>9</sup> tonnes) actuellement à 12 Gt d'équivalent grain (van Ittersom et Koning, 2010). Parallèlement à la croissance des besoins alimentaires, les ressources en éléments fertilisants se raréfient. Dans le cas du phosphore (P), la demande mondiale devrait augmenter de 50 à 100% d'ici 2050 pour répondre aux besoins des cultures, ce qui pourrait conduire à une pénurie des réserves de phosphate (Cordell et al. 2009) et des tensions sur le marché des engrais. Dans un tel contexte, la FAO préconise de développer des systèmes alternatifs plus efficaces, qui utilisent au mieux les ressources (énergie, intrants, travail, etc.)

disponibles dans les exploitations (FAO, 2012). La réduction de la dépendance des agriculteurs aux engrais minéraux est ainsi devenue un des enjeux majeurs du développement durable. Cette durabilité des systèmes de cultures repose sur la gestion rationnelle de la fertilité des sols et des biomasses.

Les systèmes associant agriculture et élevage, encore largement dominants en zones tropicales (Herrero et al., 2010), apparaissent comme une voie possible d'amélioration de la résilience des systèmes de production en termes de gestion des biomasses et des nutriments et peuvent servir de base à la création des systèmes de production de demain (Dugué et al., 2011). Les systèmes mixtes sont les systèmes agricoles les plus représentés à travers le monde (Steinfeld et al., 2006), notamment en milieu tropical, que ce soit en Amérique Latine, en Asie ou en Afrique (Devendra et Thomas, 2002 ; Gonzalez-Garcia et al., 2012). 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), ainsi que 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).

A Madagascar, les données disponibles sur la dynamique des ressources (biomasses, sols) et les performances des systèmes de production agricole et d'élevage sont très fragmentaires. Par ailleurs, la caractérisation des biomasses et des sols fait appel à des méthodes et des outils analytiques coûteux qui ne permettent pas de multiplier les analyses pour évaluer de manière satisfaisante les facteurs de variation spatio-temporelle et l'impact des modes de conduite sur les teneurs en nutriments des biomasses et des sols. Dans ces conditions, il s'avère difficile d'effectuer un diagnostic précis des systèmes de production et d'évaluer les bénéfices de solutions techniques innovantes, tant en ce qui concerne l'accumulation de matière organique par les sols (restitutions de résidus de culture), qu'en ce qui concerne l'estimation des bilans organiques et minéraux suite à l'exportation de produits agricoles (grains, pailles, fourrages) ou à l'apport de résidus (amendements organiques, fumiers, composts).

Dans des systèmes à faibles apports d'intrants, une connaissance précise des bilans minéraux, donc des transferts de fertilité, est indispensable pour une bonne gestion des ressources minérales à l'échelle de l'exploitation agricole. Des recherches portant sur la caractérisation des flux de nutriments et l'efficacité d'utilisation des nutriments sont menées dans le cadre d'un partenariat entre le Laboratoire des RadioIsotopes (LRI) de l'Université d'Antananarivo, le Centre de recherche et de développement rural en agriculture et en élevage

(FIFAMANOR - *Fiompiana Fambolena Malagasy Norveziana*), l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD), dans le cadre du projet BIOVA (Recyclage des BIOmasses Végétales et Animales dans les systèmes d'agriculture élevage), financé par l'Union Africaine. L'objectif global du projet est de sécuriser la production alimentaire dans les systèmes agricoles familiaux par l'acquisition de connaissances et par la promotion de techniques agro-écologiques innovantes pour une gestion optimisée des ressources produites ou disponibles au sein de l'exploitation. Une des activités du projet est, également, l'élaboration et mise à disposition d'outils de caractérisation et de suivi dynamique des ressources. Il s'agit, entre autres, de l'outil spectrométrie dans le proche infrarouge (SPIR).

Notre étude vise à apporter des informations sur la gestion des ressources organiques et minérales des exploitations paysannes d'agriculture-élevage et sur les transferts de fertilité (carbone, éléments minéraux) induits par l'affouragement à la ferme et les restitutions sous forme de fumier ou de divers effluents d'élevage. L'utilisation de la spectrométrie infrarouge doit permettre de multiplier à moindre coût les mesures des teneurs en carbone (C), azote (N), phosphore (P) et autres nutriments des plantes, et les matières organiques, au sein des différents compartiments de l'exploitation d'agriculture-élevage. Elle permettra ainsi d'identifier les facteurs environnementaux et les modes de conduite associés à une meilleure efficacité du recyclage.

L'objectif général de notre étude est donc de caractériser les flux de biomasses et de nutriments à l'échelle d'exploitations mixtes d'agricultures-élevage du Vakinankaratra, afin de proposer des recommandations sur la gestion des matières organiques et sur la fertilité des sols. Elle consiste à évaluer, au niveau de la parcelle et de l'exploitation, les stocks et les flux de C, d'N, de P et de cations [calcium (Ca), magnésium (Mg), potassium (K)] et leurs facteurs de variation à chacune des étapes de leur cycle de transfert au sein de la ferme. Cette étude a été traduite sous forme de trois questions de recherche :

- Quelles sont les conséquences des transferts de biomasse et de nutriments sur la fertilité des sols à l'échelle de la parcelle ?
- Est-ce que les flux de biomasses et de nutriments au sein des exploitations mixtes d'agriculture élevage sont des indicateurs de durabilité de la fertilité du système de production d'une exploitation agricole ?

- Est-ce que la Spectrométrie Proche Infrarouge (SPIR) permet de caractériser les flux de biomasse et de nutriments ?

Trois hypothèses ont été ainsi avancées :

H<sub>1</sub>- Les transferts de biomasses et de nutriments entre les différents compartiments des systèmes de production agricole conditionne la fertilité des sols et l'acidification de diverses parcelles des exploitations agricoles.

H<sub>2</sub>- Dans les exploitations intégrant agriculture-élevage, le suivi des flux de biomasses et de nutriments permet d'évaluer l'efficacité des transferts de fertilité au sein de l'exploitation agricole.

H<sub>3</sub>- La SPIR permet une bonne caractérisation des teneurs de matière organique (C et N) et de la minéralomasse des principales cultures vivrières, fourragères et des fumiers malgaches.

Le document est structuré en quatre grands chapitres présentant les principaux résultats de notre travail:

- Le premier chapitre synthétise les connaissances bibliographiques sur les caractéristiques des exploitations agricoles familiales de la région Vakinankaratra, la place de l'intégration agriculture-élevage au sein des systèmes mixtes agriculture-élevage, la notion de transfert de fertilité et enfin, une synthèse sur l'utilisation de la spectrométrie infrarouge pour caractériser les biomasses.
- Le deuxième chapitre présente les résultats des transferts de fertilité induits, d'une part par les exportations des productions agricoles (riz, fourrages), d'autre part par les apports de fumiers, à l'échelle de la parcelle agricole. Le potentiel d'acidification induit par les transferts de biomasses est aussi estimé à l'échelle de la parcelle agricole.
- Le troisième chapitre vise à évaluer les flux de biomasses et de nutriments (azote (N), phosphore (P), potassium (K), et autres nutriments) à l'échelle de l'exploitation agricole et à analyser la durabilité de la fertilité du système de production de l'exploitation agricole en fonction des flux de nutriments.
- Le quatrième chapitre présente les résultats de l'utilisation de la spectrométrie proche infrarouge (SPIR) pour caractériser la teneur en matière organique (carbone) et la minéralomasse des plantes et des fumiers. Il présente différents résultats de calibration

sur des fourrages, du riz (pailles et grains) et des fumiers dans le but de mieux caractériser les flux de biomasses et de nutriments

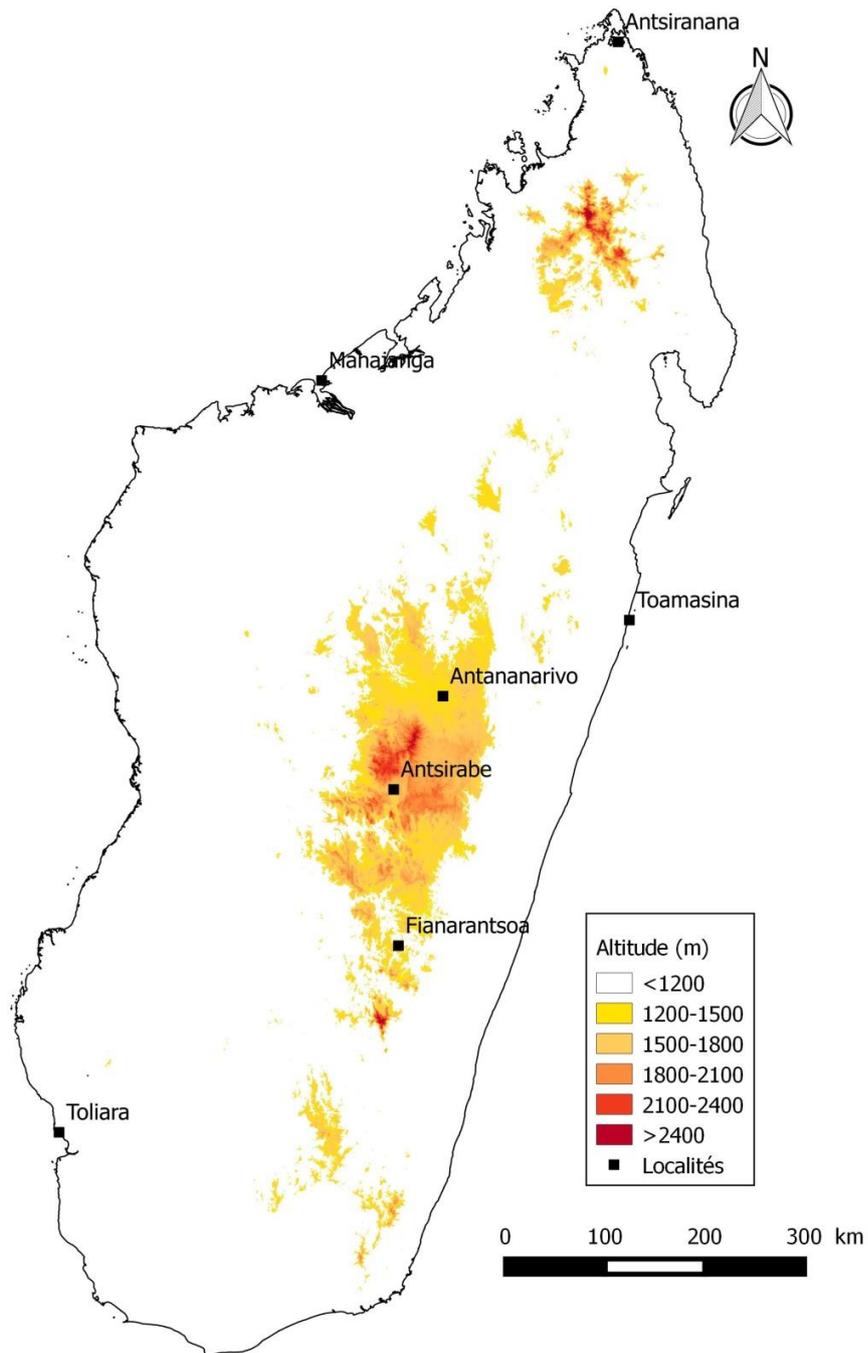
# **Chapitre 1. Synthèse Bibliographique**

---

## **1.1. Caractéristiques des exploitations agricoles familiales de la région du Vakinankaratra : place du riz et de l'élevage bovin**

### **1.1.1. La région des Hautes Terres**

La région des Hautes Terres s'étend, au cœur de l'île, du nord au sud, à une altitude comprise entre 800 et 2 000 mètres (Figure 1-1). Sur les 64 869 km<sup>2</sup> de hauts plateaux, près de 93% sont compris entre 1 200 et 1 800 m d'altitude (Braun et al., 1997). Les Hautes Terres malgaches représentent 10% de la surface totale du pays et environ 40 % de la population. Plusieurs villes majeures se situent dans cette zone comme Antananarivo (2 200 000 habitants), Fianarantsoa (200 000 habitants) et Antsirabe (300 000 habitants) (wikipédia.com).



**Figure 1-1 :** Altitude de la région des Hautes Terres malgaches (modifiée selon Braun et al., 1997).

Le relief général est marqué par une succession de plateaux et de basses collines entrecoupées par des vallées (Figure 1-2). Les bas-fonds sont dominés par les cultures de riz irrigué. Les collines (*tanety*, en malgache), du fait de la croissance des besoins alimentaires des populations, sont de plus en plus cultivées, avec du maraichage à proximité des maisons et des cultures vivrières, entrecoupées de périodes de jachère de plus en plus courtes, sur les zones plus éloignées des villages.



**Figure 1-2 :** Paysage des Hautes Terres de Madagascar.

La majeure partie des sols de *tanety* sur les Hautes Terres est dominée par les ferralsols, les cambisols et les nitisols (IUSS Working Group WRB, 2014), correspondant à des sols ferrallitiques de l'ancienne classification française (CPCS, 1967). Ces sols sont particulièrement peu fertiles à cause de leur faible teneur en P biodisponible (Hinsinger et al., 2017), associée à une forte capacité de fixation de ces ions par les oxyhydroxydes de Fe et d'Al cristallisés et amorphes. Par ailleurs, ils sont généralement acides (pH entre 4 et 6), avec des teneurs en aluminium échangeable qui peuvent dépasser le seuil de toxicité pour les plantes (Rabeharisoa, 2004).

## 1.1.2. La région du Vakinankaratra

### 1.1.2.1. Localisation et rappel des grandes caractéristiques

L'étude a été effectuée à Madagascar dans la région du Vakinankaratra, dans les Hautes Terres centrales malgaches. Antsirabe (19° 52' S ; 47° 04' E), située à 168 km au Sud d'Antananarivo, est le chef-lieu de la province. La région du Vakinankaratra est localisée dans la partie sud des Hautes Terres centrales de Madagascar (Figure 1-3). Cette région, d'altitude moyenne variant de 1 300 à 1 600 m, est densément peuplée, avec une population totale de 1 852 199 habitants et une densité de 109 habitants par km<sup>2</sup> (estimation INSTAT, 2014) (<https://www.instat.mg/madagascar-en-chiffre/>). Du point de vue administratif, cette région s'étend sur une superficie d'environ 19 205 km<sup>2</sup>, avec au centre le massif volcanique de l'Ankaratra, à l'Ouest la pénéplaine de Mandoto et au Sud une succession de dépressions et cuvettes dominées par la chaîne d'Ibity (Andriarimalala, 2014). Elle est composée actuellement de sept districts (Figure 1-4) dont deux districts urbains (Antsirabe I et Ambatolampy) et cinq districts ruraux (Antanifotsy, Faratsiho, Antsirabe II, Betafo, et Mandoto), de 90 communes et 1 002 *fokontany* (Sourisseau et al., 2016).

L'économie de la région est largement basée sur l'agriculture (Sourisseau et al., 2016). La région du Vakinankaratra est placée à la fois dans un bassin rizicole et au cœur du « triangle laitier<sup>1</sup> », principale zone de production laitière de l'île. Compte tenu de la population actuelle et de la croissance démographique, les besoins alimentaires issus de l'agriculture sont très importants. La forte démographie crée un besoin en riz croissant alors que le développement de l'élevage laitier crée aussi un besoin en fourrage croissant (Rakotofiringa et al., 2007). Les stratégies développées par les agriculteurs pour la diversification des cultures et des activités, trouvent leur raison d'être dans la structure familiale et les risques auxquels doit faire face le chef d'exploitation ou le chef de famille dans ses choix pour satisfaire les besoins de sa famille (Sourisseau et al., 2016). Ces choix conduisent souvent à privilégier l'autoconsommation par la famille.

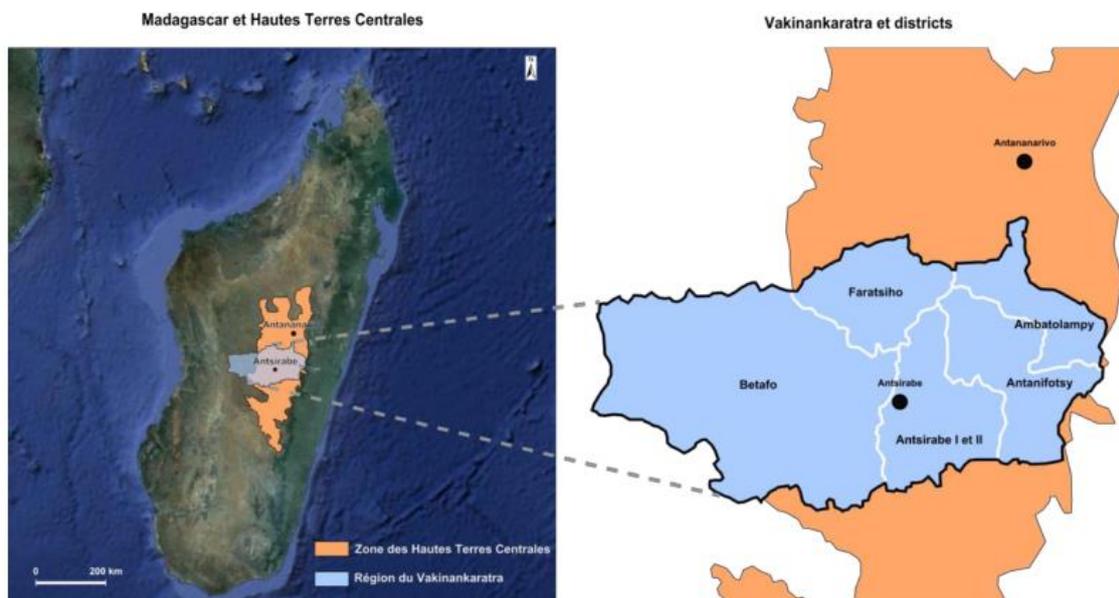
Les Hautes Terres du Vakinankaratra et sa capitale Antsirabe constituent une zone fortement agricole favorable aux cultures maraîchères et fruitières et une zone agroindustrielle grâce à l'implantation ancienne d'industries agro-alimentaires comme la brasserie STAR, implantée en 1949, la laiterie TIKO, implantée au début des années 80, ou

---

<sup>1</sup> Aire comprise entre Tsiroanomandidy (Moyen-Ouest), Manjakandriana (Est) et Ambalavao Tsiemparihy (Sud). Les régions concernées sont celles de Vakinankaratra, Analamanga, Itasy, Haute Matsiatra, Bongolava.

encore la minoterie KOBAMA, etc. Sa situation géographique, proche de la capitale, lui confère aussi des avantages considérables en termes d'accès aux marchés domestiques et à l'international. Ainsi, avec des exploitations agricoles diversifiées, dans la production de céréales, de fruits, de légumes et de produits d'origine animale, la région ravitaille les grandes villes de l'île, dont la capitale, notamment en produits laitiers (Kasprzyk, 2008).

Une forte densité de population, un climat favorable, des ressources importantes et les infrastructures disponibles sont autant d'atouts favorables au développement des investissements dans tous les secteurs économiques (Sourisseau et al., 2016). En cela, elle est représentative de la situation agricole des Hautes Terres (Rakotofiringa et al., 2007).

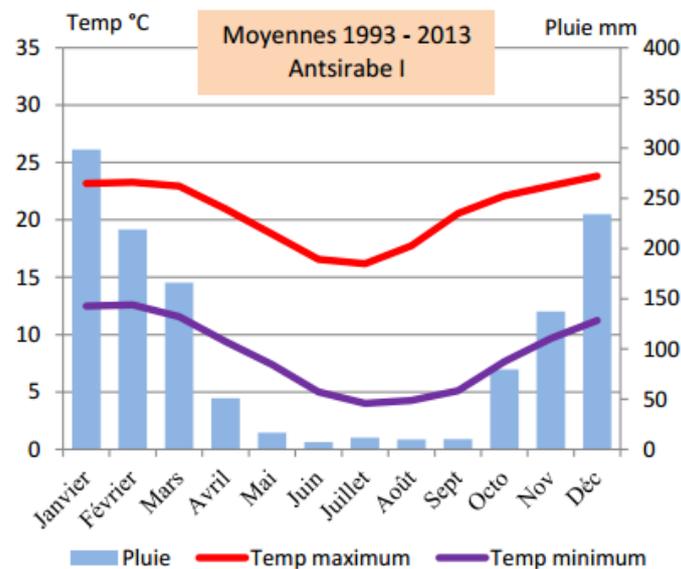


**Figure 1-3 :** Carte des Hautes Terres centrales de Madagascar et de la région du Vakinankaratra (Alvarez, 2012).

### 1.1.2.2. Caractéristiques biophysiques

#### *Le climat*

La région du Vakinankaratra est caractérisée par un climat tropical d'altitude avec l'alternance de deux saisons : (i) une saison pluvieuse moyennement chaude de novembre à avril, et (ii) une saison sèche relativement froide de mai à octobre (Figure 1-4). La pluviosité annuelle varie de 1 200 à 2 000 mm selon l'altitude et l'exposition, elle est plus importante dans les zones à altitude élevée. Dans la classification bioclimatique, la zone du Vakinankaratra appartient à l'étage « subhumide avec des saisons sèches pouvant être atténuées par les brouillards » (Alvarez, 2012).



**Figure 1-4 :** Pluviométrie et températures moyennes dans le Vakinankaratra de 1993 à 2013 (Sourriseau et al., 2016).

#### *Les sols*

Zebrowski et Ratsimbazafy (1979) ont classé les sols de *tanety* de la région, selon les quatre types suivants (d'après l'ancienne classification française des sols, CPCS, 1967) :

- *sols minéraux bruts* : d'origine non climatique d'érosion. Ces sols sont composés de lithosols sur socle cristallin, sur roche volcanique et sur cuirasse ferrugineuse ;
- *sols peu évolués* : tronqués par l'érosion. Ces sols possèdent un profil A-C, et même si les horizons C présentent souvent une altération de type ferrallitique, l'absence d'un horizon B, ne permettait pas de classer ces sols parmi les sols ferrallitiques. Suivant la teneur en matière

organique de l'horizon A, on distingue les sols peu évolués humifères et les sols peu évolués non climatiques ;

- *andosols* : riches en produits amorphes silico-alumineux. Ces sols sont observés dans les régions volcaniques ;

- *sols ferrallitiques* : caractérisés par un profil A-B-C. Ces sols ont été différenciés en groupe et sous-groupes suivant l'intervention de processus physico-chimiques ou mécaniques (accumulation humifère, allitisation, rajeunissement, remaniement et hydromorphie) accompagnant le processus de ferrallitisation. On peut distinguer alors dans la région, les sols ferrallitiques moyennement et fortement désaturés, avec des sous-groupes : humifères, allitiques, rajeunis ou hydromorphes.

Selon la classification FAO des sols, la majeure partie des sols sur les Hautes Terres est dominée par les ferralsols, les cambisols et les nitisols (correspondant à des sols ferrallitiques de la classification française) (Razafimahatratra, 2011).

### **1.1.2.3. Particularités de l'agriculture de la zone : diversité des systèmes de production**

Dans la région des Hautes Terres, on observe donc généralement deux types d'agriculture (i) l'agriculture de bas-fonds, basée essentiellement sur la riziculture irriguée en saison des pluies et sur des cultures légumières de contre saison, et (ii) une agriculture pluviale effectuée sur *tanety* (Razafimbelo, 2005). Les *tanety* sont une importante zone d'expansion de l'agriculture, favorable aux cultures pluviales, soit pour les productions alimentaires, soit pour la production de fourrages. Néanmoins, les *tanety* sont dominés par des sols ferrallitiques peu fertiles, comme dans la majorité des Hautes Terres. Les grandes plaines alluviales (Antsirabe et Ambohibary) sont favorables à la culture de riz irrigué durant la saison des pluies et à des cultures maraichères ou vivrières de contre-saison pendant la saison sèche.

Ces deux types sont tout aussi importants car le rapport moyen *tanety*/bas-fonds, en termes de surface exploitée, varie en général de 1,3 à 1,6 au niveau des exploitations (Minten et Ralison, 2003). La surface moyenne par exploitation dans la région a été évaluée, en 2004-2005, à 0,87 ha (Ahmim-Richard et al., 2009). Cette surface exploitée est répartie entre les principales cultures vivrières : le riz et les autres cultures pluviales (riz, maïs, voandzous, etc.). Malgré l'utilisation croissante des zones de *tanety* pour l'agriculture, les exploitations

deviennent de plus en plus petites, du fait de la division des exploitations entre divers enfants, et ceci malgré un exode rurale important. En 2012, pour Madagascar, 15 % des habitants sont des migrants dont le Vakinankaratra est cité comme une des principales zones de départ pour travailler dans les ménages à la capitale (Sourriseau et al., 2016).

La région est caractérisée par la prédominance des cultures vivrières qui occupent 90 % des superficies cultivées (Randratoarimbola, 2015). La production agricole est très diversifiée. Les cultures vivrières principales sont le riz, le manioc, le maïs, la pomme de terre et des légumineuses à graines (haricot, arachide, etc.) ; mais le riz reste la culture dominante comme dans beaucoup d'autres régions du pays. Le Vakinankaratra fait partie des régions productrices de riz, avec 6,6 % de la production nationale, après Alaotra Mangoro, Sofia et Analamanga qui fournissent respectivement 11 %, 13 % et 9 % de la production nationale de riz (INSTAT, 2011).

Malgré la forte potentialité de la région pour la production et la vente de lait comme une source de revenu régulière et non négligeable pour les paysans, le principal problème qui conditionne l'élevage laitier est, cependant, la pénurie de fourrages, particulièrement en saison sèche (Andriarimalala, 2014). Elle entraîne la dégradation de l'état corporel des ruminants, surtout les vaches laitières, limite ainsi leur potentiel de production laitière et diminue leurs performances reproductives (Randrianasolo et al., 2009). La diminution de la quantité d'herbe disponible et la dégradation de sa qualité qui découle de la pression foncière limitent l'usage des pâturages pour alimenter les troupeaux laitiers (Kasprzyk et al., 2008). La culture fourragère a été, par la suite, introduite avec l'introduction des bovins de races laitières. De nombreuses plantes fourragères, principalement des graminées, sont mises en culture pour l'alimentation des bovins laitiers : fourrages pérennes (par exemple, *Pennisetum purpureum* Schumach. Cv. Kizozzi, *Brachiaria* spp.), cultivés sur les *tanety* et/ou des fourrages tempérés (par exemple, *Avena sativa* L., *Lolium multiflorum* Lam.) semés sur les bas-fonds en hiver. Le *Pennisetum purpureum*, variété Relaza, est le fourrage le plus répandu. Il est cultivé sur *tanety* en saison des pluies. Les fourrages annuels sont cultivés en rotation avec le riz (sur rizières) et le maïs (sur *tanety*). L'avoine et le ray grass sont couramment cultivés seuls ou en association (avoine/ray grass), principalement sur rizières en contre-saison, mais aussi sur *tanety* (avoine en intersaison). En contre saison, des cultures de rentes ou des cultures maraîchères peuvent être mises en place dans les bas- fonds.

Les fourrages tempérés sont en partie cultivés en contre-saison dans les bas-fonds, afin de bénéficier de l'eau accumulé dans ces sols. Néanmoins, ces productions sont en compétition avec les cultures légumières, très importantes économiquement, notamment pour les petites exploitations. Sur *tanety*, les productions peuvent être limitées par le manque d'eau en saison sèche. Des semis précoces avec des espèces à enracinement profond sont à privilégier dans ces conditions.

La diversification des cultures est une stratégie largement répandue en rapport avec la faible superficie disponible. Cette stratégie, quelquefois de survie, a permis aux paysans de mettre en valeur différents types de terres et sur les différents cycles culturaux de l'année, d'optimiser l'utilisation des petites surfaces avec des rotations ou des associations de cultures, de minimiser la prise de risque liée à la spécialisation et de subvenir à leurs besoins d'autoconsommation (Rapport PROIntensAfrica, 2016). Les activités pratiquées répondent ainsi à diverses stratégies : sécurisation de l'alimentation, diversification et amélioration des revenus, capitalisation, optimisation et sécurisation du foncier.

#### **1.1.2.4. La place de l'élevage bovin dans la zone**

L'élevage de zébus, tout comme le riz, occupe une place essentielle dans la culture et l'économie malgache. En effet, outre les productions classiques issues de l'élevage (viande et lait), l'utilisation de la traction animale pour les travaux des champs et le transport des produits sur la ferme est très importante. Il constitue également un signe de richesse extérieure. Le zébu malgache joue un rôle important dans les cérémonies traditionnelles (par exemple, 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 de viande bovine / personne / jour, ce qui correspond à 48 % de la quantité de viande totale consommée quotidiennement (FAO, 2012). L'élevage est presque systématiquement associé à l'agriculture qui fait que l'intégration de l'élevage dans les systèmes de culture y est donc largement développée. Outre sa capacité à transférer et recycler de la biomasse et des éléments nutritifs, l'élevage constitue également : (i) une source de revenu stable (via la vente de produit animaux) car moins assujettie aux aléas climatiques que les productions agricoles ; (ii) une épargne disponible et facilement mobilisable. L'élevage est donc un moteur de développement pour les exploitations familiales d'agriculture-élevage.

Sur les Hautes Terres du Vakinankaratra, l'élevage bovin, et particulièrement l'élevage laitier, est très largement rependu. A l'intérieur du triangle laitier, le Vakinankaratra occupe une place prépondérante pour la production mais aussi la transformation (fromage, yogourt, beurre), grâce à la présence de quelques unités agroindustrielles (Socolait, TIKO, ROVA). En effet, plus de 80 % de la production laitière de Madagascar provient de la région Vakinankaratra (Kasprzyk et al., 2008). 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 races européennes améliorées (Holstein, Pie Rouge Norvégienne), à fort potentiel de production laitière et complémentés (concentrés, drèches) (Alvarez, 2012). Les techniques d'alimentation des animaux sont intégrées aux systèmes de cultures traditionnels rizicoles, grâce à une production de fourrage dans les rizières en contre saison (Penot et Gaëlle, 2011). Bien que la culture de fourrage soit possible presque toute l'année (Mandimbiniaina, 2009), la majorité des exploitants régulent l'alimentation des vaches laitières en fonction des deux saisons principales. Lors de la saison des pluies, le bétail est alimenté sur pâturage naturel ou cultivé, présentant des plantes fourragères tel qu'*Aristida rufescens*, ou des graminées tel que du Maïs, du *Pennisetum* Cv. Relaza, du *Brachiaria (ruziziensis, decumbens ou brizantha)*, du *Chloris*. En saison sèche, la production de biomasse est limitée en raison des températures basses et des périodes de sécheresse (saison hivernale). A cette période les vaches laitières sont essentiellement alimentées avec les résidus de cultures (paille de riz et paille d'orge) et avec les graminées cultivées sur *tanety* (avoine) et les graminées tempérées cultivées en contre-saison dans les rizières (avoine, ray-grass) (Fifamanor, 2008). Afin d'assurer l'alimentation de l'élevage bovin, la majorité de la biomasse végétale disponible (fourrages, résidus de cultures, *bozaka*) est ainsi exportée des parcelles vers l'animal (Alvarez, 2012). Les agriculteurs utilisent les drèches toute l'année dans la région d'Antsirabe et de Betafo en raison de la proximité avec la brasserie STAR. Peu d'exploitations laitières dans le Vakinankaratra utilisent les fourrages conservés (foin et ensilage) (Rarivoarimanana et al., 2010).

La production laitière du Vakinankaratra est assurée principalement par un cheptel bovin composé de vaches améliorées, que ce soit dans les grandes fermes intensives ou chez les petits paysans. Parmi ces vaches laitières améliorées, on rencontre des animaux de races

*Rana*<sup>2</sup> qui sont meilleures laitières que la vache zébu, et des animaux de races exotiques plus ou moins pures : Pie Rouge Norvégienne (PRN<sup>3</sup>) et Holstein<sup>4</sup> (Kasprzyk et al., 2008).

## **1.2. La place de l'intégration agriculture-élevage au sein de l'exploitation agricole**

L'Intégration Agriculture Elevage (IAE) fait référence à des systèmes de production associant à la fois l'élevage avec des cultures, « plus ou moins en interactions » (Seré et al., 1996). Il correspond en effet à un ensemble d'échanges de flux de matière et d'énergie entre les différentes composantes du système, à savoir les animaux, les cultures et le sol (Stark, 2016). L'intégration agriculture-élevage constitue une alternative pour améliorer durablement la productivité de ces exploitations, en jouant sur les flux entre les deux composantes (Smith et al., 1997 ; Stark, 2016). Ces flux incluent (i) le transfert de l'énergie développée par les animaux de trait vers les systèmes de culture et d'élevage via la culture attelée et le transport des intrants, des produits agricoles et des fourrages ; (ii) le transfert des fourrages provenant en partie des résidus de cultures stockés et marginalement des cultures fourragères (Petersen et al., 2007) vers l'alimentation des animaux ; (iii) le transfert de la fumure organique produite par les animaux et le recyclage des résidus de culture pour le maintien et l'amélioration de la fertilité des sols (Giller et al., 2006).

L'IAE peut être un système plus large et peut se présenter sous plusieurs formes. En effet, l'IAE peut être vue comme un ensemble de pratiques qui mobilisent les processus écologiques inhérents au fonctionnement des écosystèmes (Bonaudo et al., 2014), et plus particulièrement en tant que réseau de flux de nutriments (Altieri et Nicholls, 2005). Globalement, l'intégration de l'agriculture et de l'élevage permet de valoriser les sous-produits de l'élevage pour les

---

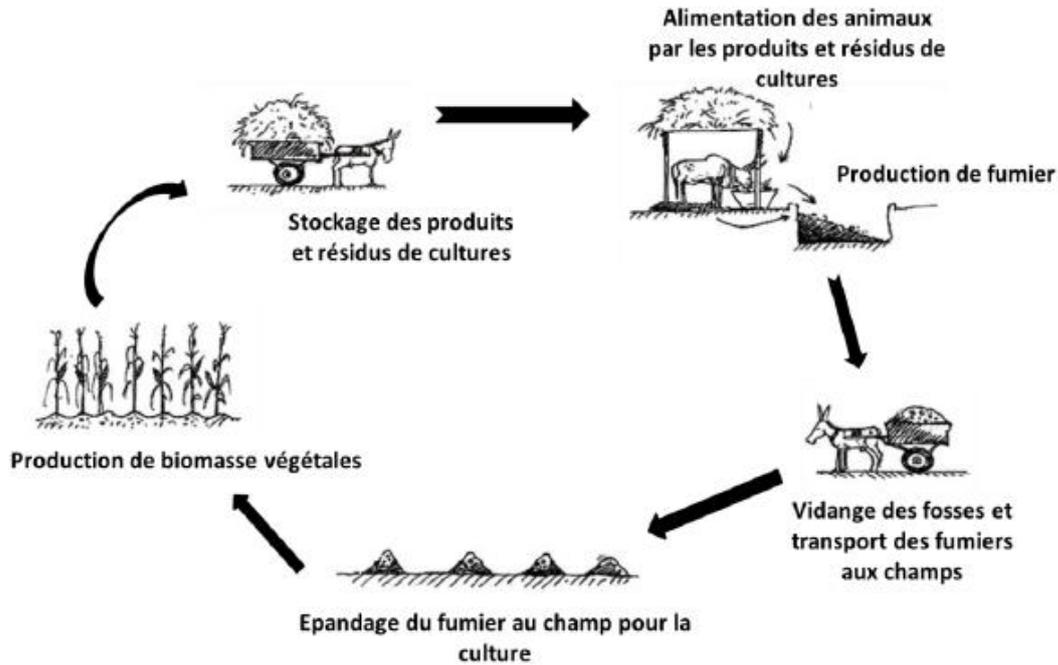
<sup>2</sup> Le bétail *Rana* s'est développé par croisement entre femelles zébus autochtones et mâles de races taurines d'importation : normande, bretonne pie noire, gasconne, bordelaise, frisonne, etc. Ce bétail a une capacité de production laitière assez élevée autour d'Antananarivo. Cette production de lait est d'environ 5 à 8 litres par jour pendant une lactation de 6 mois environ. Les plus grandes productivités sont d'environ 2 800 L de lait en 300 jours.

<sup>3</sup> Vache Pie Rouge Norvégienne (PRN) : introduite par les norvégiens dès les années 60, cette race s'est bien diffusée dans l'ensemble du « triangle laitier ». En race pure, élevée dans des conditions optimales, cette vache peut produire jusqu'à 6 000 L de lait par lactation. Elle produit jusqu'à 3 500 L de lait par lactation chez les éleveurs des Hautes Terres.

<sup>4</sup> Vache Holstein : introduite récemment (fin 2005 et 2006) de Nouvelle Zélande cette vache atteint des capacités de productions proches de celles atteintes en Europe. Quelques vaches plus ou moins pures, sont présentes en milieu paysan, cependant elles semblent être moins rustiques que la PRN, ce qui limite sa diffusion en milieu paysan.

systèmes de culture et les sous-produits des cultures pour les systèmes d'élevage. Ceci apporte plus d'efficacité au système d'exploitation, assurant ainsi sa durabilité. Les bénéfices économiques et environnementaux d'une intégration ont déjà été expliqués dans la littérature scientifique (Blanchard et al., 2011 ; Bénagabou et al., 2013 ; Bell et al., 2013). Lemaire et al. (2014) confirment que l'intégration de l'agriculture avec le système d'élevage devrait permettre : (i) une meilleure régulation du cycle biogéochimique et une réduction des flux environnementaux vers l'atmosphère et l'hydrosphère (à travers le couplage du cycle de C et N avec la végétation, les biomasses microbiennes et le C du sol) ; (ii) une bonne diversification et structuration des paysages ; (iii) une meilleure flexibilité de la totalité du système. Comme l'ont souligné Herrero et al. (2010), les synergies entre les cultures et l'élevage offrent de nombreuses opportunités pour réaliser une agriculture durable, en augmentant la productivité parallèlement à l'efficacité de l'utilisation des ressources. La valorisation des déjections animales par la fertilisation organique est l'autre principale pratique d'IAE. Elle diminue tout d'abord la dépendance des exploitations vis-à-vis des fertilisants minéraux et représente souvent la seule source de fertilisation des petites exploitations agricoles (Rufino et al., 2007). Elle permet aussi de diminuer les pollutions et émissions liées aux déjections animales, principale source de pollution de l'agriculture (van Keulen et al., 2000). Elle contribue à la fertilité des sols à long terme, ainsi qu'à leur structure et leur composition biologique (Lawrence et Pearson, 2002 ; Giller et al., 2006).

Cette complémentarité des productions végétales et animales permet une diversification des revenus de l'exploitation et permet ainsi de diminuer les risques. L'IAE doit ainsi permettre une meilleure durabilité des systèmes de production, une diminution de la dépendance économique aux intrants des exploitations agricoles familiales et une gestion durable des ressources naturelles. A titre indicatif, Lhoste et al. (2010) définissent comme suit les trois « piliers bio-techniques » de l'intégration de l'agriculture et de l'élevage dans les petites fermes des pays en développement : (i) la fourniture d'énergie par l'utilisation de la traction animale ; (ii) l'entretien de la fertilité des parcelles de cultures grâce à la fumure animale ; et (iii) l'alimentation des animaux par les systèmes de cultures (Figure 1-5).



**Figure 1-5:** Intégration de l'agriculture et de l'élevage (Lhoste et al., 2010).

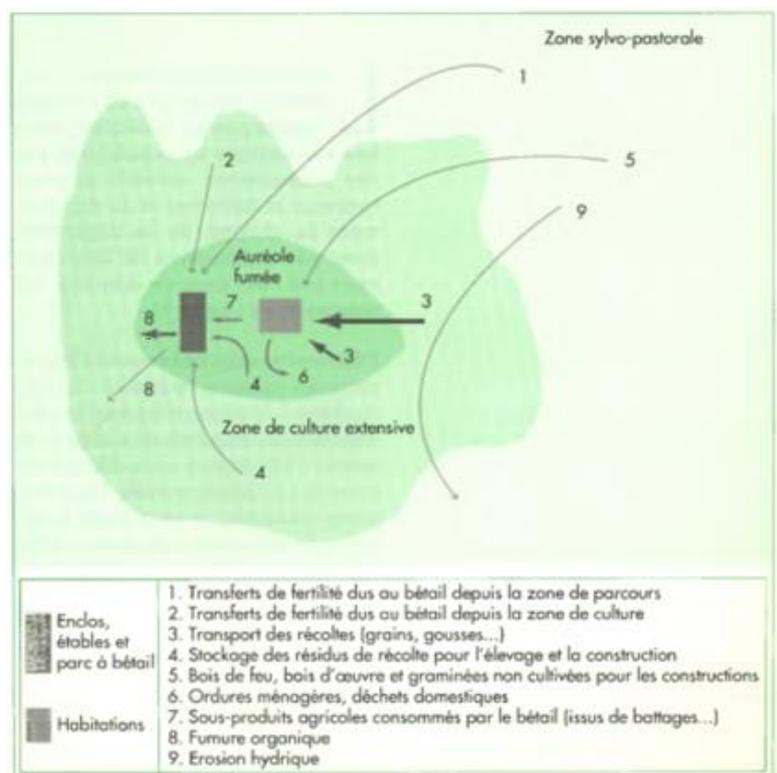
### 1.3. Le transfert de fertilité et flux de biomasses

#### 1.3.1. La notion de transfert de fertilité

Les transferts de fertilité se caractérisent par des flux de matières organiques et minérales liés à leur transport par les populations, par le déplacement du cheptel, ainsi que par des phénomènes naturels (érosion hydrique et éolienne) (Dugué, 1998). 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 (Alvarez, 2012). Ils ne dépendent donc pas uniquement de l'élevage, mais son rôle dans ce domaine est prépondérant. Différents facteurs déterminent l'importance des transferts de fertilité : la taille du cheptel, le niveau d'équipement des exploitations (matériels de transport) et surtout l'importance accordée par les paysans à la fumure animale. Cependant, le mode et l'ampleur du recyclage des éléments nutritifs dépendent du type (grands ou petits ruminants, porcs, lapins et volaille) et du nombre d'animaux disponibles dans un système de production (Lekasi et al., 2003). Ces transferts en éléments nutritifs peuvent se faire à une échelle locale

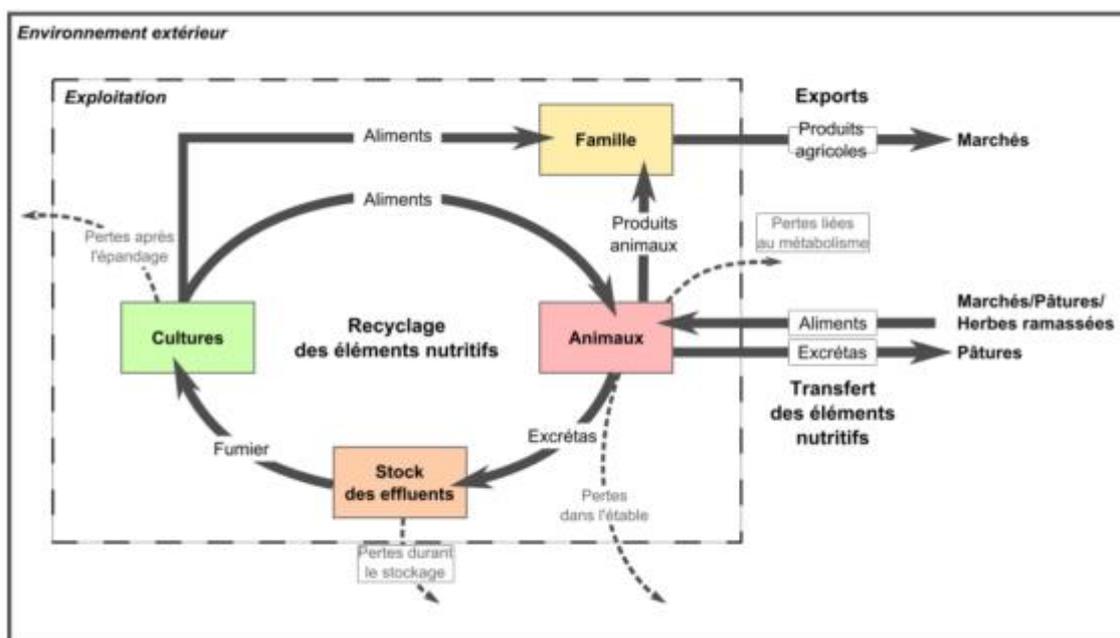
(l'exploitation), régionale (zone autour de l'exploitation) ou à une échelle beaucoup plus large (nationale ou internationale) selon l'origine des matières premières, des aliments concentrés (Galloway et al., 2008).

Les flux de biomasses à l'échelle d'un terroir se présentent sous plusieurs formes et dépendent de plusieurs paramètres car les pratiques de gestion de la fertilité changent suivant la distance au village, la conduite du parcage des animaux, la quantité et la qualité du fourrage disponible, le statut foncier de l'exploitant (Manlay et Ickowicz, 2000). En effet, selon l'étude effectuée en Afrique de l'Ouest par Manlay et Ickowicz (2000), le parcage est généralement localisé en proximité des villages ; moins intense et plus rare en périphérie du terroir. Les disparités sont fortes entre les auroles de champs voisins. Cette disparité s'exprime pleinement entre parcelles et selon la culture menée à la suite du parcage. Ils ont constaté dans leur étude que les céréales bénéficient, en général, de 95 % de la fumure et les savanes arbustive et arborée participent peu aux échanges de biomasse (prélèvements et restitutions). La figure 1-6 illustre les différents transferts de fertilité à l'échelle d'un terroir agro-pastoral selon l'étude de Dugué (1998).



**Figure 1-6 :** Flux de matière à l'échelle d'un terroir (Dugué, 1998).

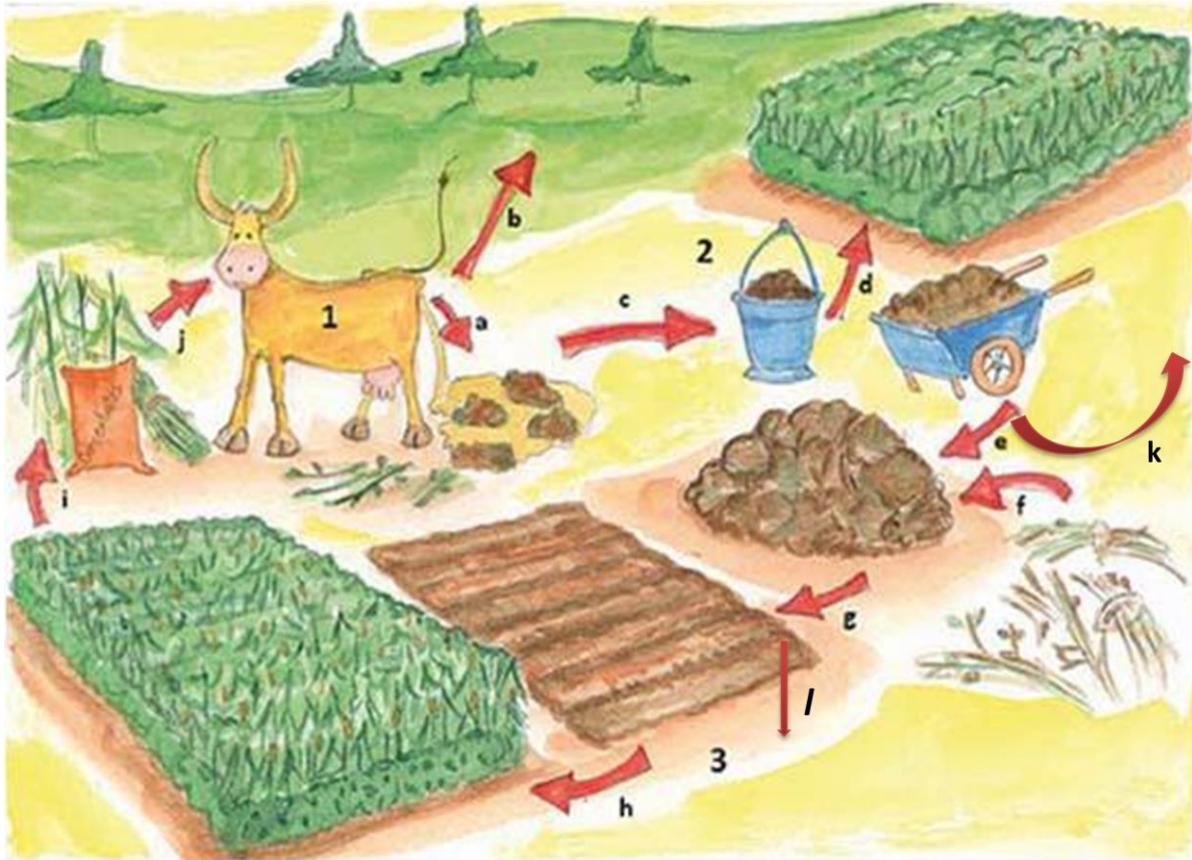
A l'échelle des exploitations, les transferts des éléments nutritifs doivent être repositionnés à une échelle plus large intégrant les relations entre l'exploitation et son environnement (Alvarez, 2012) (Figure 1-7). La commercialisation des produits agricoles (grains, tubercules, etc.) ou des produits d'élevages (lait, viande, œufs, etc.) correspond à une exportation de nutriments. De même, la vente de biomasses (pailles, fumiers) ou le dépôts de fèces par les animaux lorsqu'ils pâturent sur les espaces communs n'appartenant pas à l'exploitant peuvent aussi être considérées comme des pertes d'éléments nutritifs vers le milieu extérieur. Au contraire, les divers achats à l'extérieur pour fertiliser les sols ou pour nourrir les animaux sont des gains de nutriment au niveau du bilan minéral de l'exploitation.



**Figure 1-7 :** Représentation schématique des transferts des éléments nutritifs et des pertes dans une exploitation mixte d'agriculture-élevage (Alvarez, 2012).

Au sein d'une exploitation mixte d'agriculture-élevage, les stocks et les flux de biomasse et de nutriments doivent aussi être quantifiés à chacune des étapes du cycle de transfert, depuis la production des biomasses organiques (fourrages, résidus de culture, couverts végétaux), en passant par la collecte et la gestion de ces biomasses, puis par leur minéralisation dans le sol en éléments minéraux, le prélèvement et la transformation de ces nutriments par la plante (Rufino et al., 2006). De ce fait, quatre étapes majeures dans le transfert et le recyclage des éléments nutritifs ont été définies par Rufino et al. (2006) à l'échelle d'une exploitation agricole, pour le cas de l'azote (Figure 1-8) : (1) la production

d'effluents d'élevage ; (2) la collecte et la gestion des effluents ; (3) le stockage des effluents ; (4) la transformation dans le sol.



**Figure 1-8 :** Transfert de l'azote au sein de la ferme, 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) ; des résidus de culture peuvent leur être ajoutés (flux f) pendant le stockage. 3 : La minéralisation de l'azote dans le sol, sa fixation et sa transformation par la plante. Les effluents sont épandus sur les terres cultivées (flux g) ; les plantes absorbent la fraction minéralisée de l'azote, seule rendue disponible (flux h). L'azote assimilé par la plante est partitionné dans les grains et dans les parties végétatives (flux i). Les résidus des cultures non valorisés par l'homme peuvent être utilisés pour l'alimentation des animaux (flux j). Il y a éventuellement des pertes par volatilisation (flux k) et des pertes par lixiviation (flux l).

### 1.3.2. Transfert de fertilité à l'échelle des exploitations agricoles malgaches

La gestion de la biomasse et des flux de biomasses au sein des exploitations agricoles malgaches présente une grande diversité des pratiques (Alvarez, 2012 ; Randrantoarimbola, 2015). En effet, les flux entrants, sortants et internes au sein de chaque exploitation sont tributaires de plusieurs facteurs : la taille de l'exploitation, l'achat des concentrés, le mode de fonctionnement de l'exploitation, le nombre d'animaux, la surface totale cultivée, les pratiques de fertilisation, l'alimentation de l'élevage bovin laitier, la gestion des effluents d'élevage et la vente des produits agricoles et d'élevage, etc.

En termes de complémentarité de l'agriculture et de l'élevage, par exemple, les animaux bénéficient, d'une manière générale, de la biomasse végétale produite par l'agriculture (Naudin et al., 2015) mais ils fournissent également des engrais organiques. Néanmoins, la qualité du fumier utilisé varie suivant les pratiques de gestion liées à la production du fumier et les conditions d'utilisation du fumier sur la parcelle (Rufino et al., 2006 ; Salgado et al., 2014). Les doses d'épandage des engrais sont, ainsi, différentes selon les paysans et selon le type de culture. D'après les résultats d'enquêtes sur les pratiques liées à la fertilisation des parcelles de cultures par Randrantoarimbola (2015), 89,1 % des exploitations utilisent le mode de fertilisation « organique + minérale » tandis que les 10,9 % restant emploient uniquement la fumure organique. Néanmoins, les doses de fertilisation varient fortement d'une exploitation à une autre et selon le type de culture (Alvarez, 2012). A titre indicatif, le tableau 1-1 montre les fourchettes des doses d'épandages de fumier pour certaines cultures mais qui dépendent surtout de la taille de l'exploitation.

**Tableau 1-1** : Exemple des doses d'épandage des fumures organiques par culture dans la région de Vakinankaratra (adapté d'après les résultats d'Alvarez, 2012).

Parcelles	Moyenne des doses d'épandage (tonnes MS ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )
Riz	0,1 à 0,3
Maïs	0,5 à 7,6
Pomme de terre	2,7 à 7,7
<i>Bracharia</i>	0 à 0,8
Patate douce	0 à 0,6
Avoine +Ray grass	2,7 à 19
<i>Pennisetum</i>	4 à 10

D'une manière générale, les fumures organiques sont généralement appliquées aux cultures fourragères et/ou autres cultures vivrières sur les *tanety*. La majorité des paysans ont estimé que les apports organiques aux cultures de contre saison pour la même parcelle devrait suffire à fertiliser le sol pour la culture du riz (Randrantoarimbola, 2015). Le riz bénéficie de l'arrière effet des doses d'engrais apportées en contre saison. Bien que la fertilisation minérale soit courante dans la région, son utilisation reste une pratique de luxe pour la plupart des paysans. Le NPK et l'urée sont les fertilisants les plus utilisés mais les doses d'épandage restent faibles (de l'ordre de 100 à 200 kg ha<sup>-1</sup>), le plus souvent appliqués sur les cultures fourragères, tomate, pomme de terre selon Randrantoarimbola (2015).

Selon l'étude effectuée par Alvarez (2012) et Salgado et al., (2014) dans la région de Vakinankaratra sur la gestion d'effluents d'élevage, les principales différences dans les pratiques de gestion des effluents résident dans : (i) la nature des sols de l'étable (bétonné, dallé ou sol nu) qui facilite plus ou moins la récupération des liquides ; (ii) la nature et la quantité de la litière employée (certaines exploitations achètent de la litière végétale alors que d'autres emploient les refus de l'alimentation et des pailles de riz) ; (iii) les mélanges d'effluents dans le tas de fumier ; (iv) la pratique du compostage qui se traduit par des ajouts de *bozaka* au tas de fumier, une pratique qui permet d'augmenter le volume de fumier produit.

Les pratiques d'alimentation jouent également un rôle important dans les transferts de fertilité au sein des exploitations agricoles malgaches. Les flux entrants se différencient essentiellement par la nature des aliments employés ou achetés (fourrages cultivés, fourrages sauvages, résidus de cultures et aliments concentrés), et par les quantités distribuées. D'une manière générale, les pailles de riz (*mololo*) sont utilisées pour l'alimentation des bovins, mais dans des proportions différentes selon la disponibilité et possibilité (achats). Certains agriculteurs complètent l'alimentation des bovins avec des drèches (qui varie de 0 à 8 kg de matière brute / jour / animal selon le type d'exploitation) ou provendes (allant de 0 à 5 kg de matière brute / jour / animal) (Alvarez, 2012).

### **1.3.3. Rôle de l'élevage dans le flux de biomasses**

Les animaux, en particulier les ruminants, ont la capacité de valoriser des ressources végétales non utilisées dans l'alimentation humaine, 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, en particulier le N (Alvarez, 2012).

Les herbivores peuvent participer activement aux transferts de fertilité à l'échelle des terroirs agro-pastoraux ; ils mobilisent dans ces transferts les fonctions spécifiques d'ingestion, digestion, excrétion et mobilité qui leur permettent de prélever de la phytomasse en certains points du terroir, s'en nourrir, la transformer et déposer leurs déjections en d'autres points (Lhoste et Richard, 1993). Les animaux sont ainsi d'importants vecteurs de transfert des éléments nutritifs de l'environnement extérieur vers les exploitations. La mobilité des troupeaux assure des transferts de fertilité des zones de pâturage vers les aires cultivées. Durant le pâturage, les animaux peuvent entraîner une redistribution spatiale des éléments nutritifs par des excréments localisés (Rotz et al., 2005). 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. Dans les systèmes d'élevage basés sur la stabulation permanente, les importations d'herbes ramassées à l'extérieur de l'exploitation (affouragement à l'auge) 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).

## **1.4. Intérêts de la spectrométrie infrarouge dans la caractérisation des biomasses**

### **1.4.1. Intérêts de la spectrométrie infrarouge**

D'une manière générale, les données disponibles sur la dynamique des ressources (biomasses, sols) et les performances des systèmes de production agricole et d'élevage restent encore très fragmentaires alors que les méthodes d'analyses pour leur détermination restent toujours très coûteuses. Aussi, l'utilisation de techniques d'analyses moins coûteuses comme la spectrométrie moyen (SMIR) ou proche infrarouge (SPIR) devrait permettre de multiplier les analyses de biomasses et de sols pour effectuer des caractérisations de leurs constituants, d'une part, et de connaître d'une manière plus précise les bilans minéraux à l'échelle de l'exploitation agricole, d'autre part. Dans un tel contexte, l'utilisation de la spectrométrie infrarouge pourrait faciliter le suivi dynamique des stocks et des flux de nutriments au sein d'une exploitation agricole.

Depuis les années 1980, la SPIR est considérée comme une méthode non destructive pour la détermination de la composition chimique dans tous les domaines de la science des aliments et de l'agriculture (Joffre et al., 1992 ; Batten, 1998 ). La SPIR joue un rôle important dans la réduction du coût, du temps requis pour tester une quantité d'échantillons, conjointement avec une augmentation du nombre d'échantillons qui pourraient être analysés (Godin et al., 2015). En effet, la spectrométrie infrarouge est une technique simple, non destructive, bien reproductible, rapide et surtout moins coûteuse pour la caractérisation des biomasses par voie chimique (Batten, 1998 ; Smith et al., 2001 ; Petisco et al., 20008 ; Mbow, 2013 ; Maarschalkerweerd et Husted, 2015) et des sols (Chang et al., 2001 ; Viscarra Rossel et al., 2006 ; Cécillon et al., 2009). A part l'acquisition du matériel, cette technique d'analyse a un faible coût comparativement aux analyses réalisées en laboratoire. La spectrométrie infrarouge est aussi avantageuse étant donné qu'elle ne demande qu'une petite quantité d'échantillons et un minimum de travail de préparation (Batten., 1998). Un des intérêts majeurs de la SPIR, notamment pour les fourrages et les fumiers, est que l'on peut déterminer la qualité des produits végétaux très rapidement, à la ferme, ce qui permet des prises de décision très rapide. En effet, grâce à des avancées technologiques récentes, le développement d'outils portables basés sur la spectrométrie proche infrarouge (LabSpec 5000 ASD Inc) a pu être réalisé pour l'évaluation de la composition des fourrages directement à la ferme (Salgado et al., 2012). Avec la SPIR, on peut aussi calculer rapidement la qualité des fourrages et des

concentrés : les compositions chimiques, la digestibilité, l'apport en énergie, la teneur en protéine, etc. (Dryden, 2003).

Lila et Furstoss (2000) précisent cependant que la SPIR présente certains défauts, notamment :

- il est en général difficile de donner une explication poussée des spectres obtenus. Les harmoniques et les combinaisons de bandes sont en effet complexes à interpréter ;
- les spectres d'une même collection se ressemblent très fortement et il est impossible, par l'observation directe des spectres, de mettre en évidence certaines caractéristiques, qui dépendent principalement de la taille des particules ;
- les bandes spectrales des différents composés biochimiques se recouvrent largement. De ce recouvrement important des bandes découle la stratégie d'exploitation des données spectrales qui repose sur des méthodes statistiques.

Rabetokotany (2013) a synthétisé dans son étude les principaux avantages et inconvénients de la méthode SPIR (Tableau 1-2).

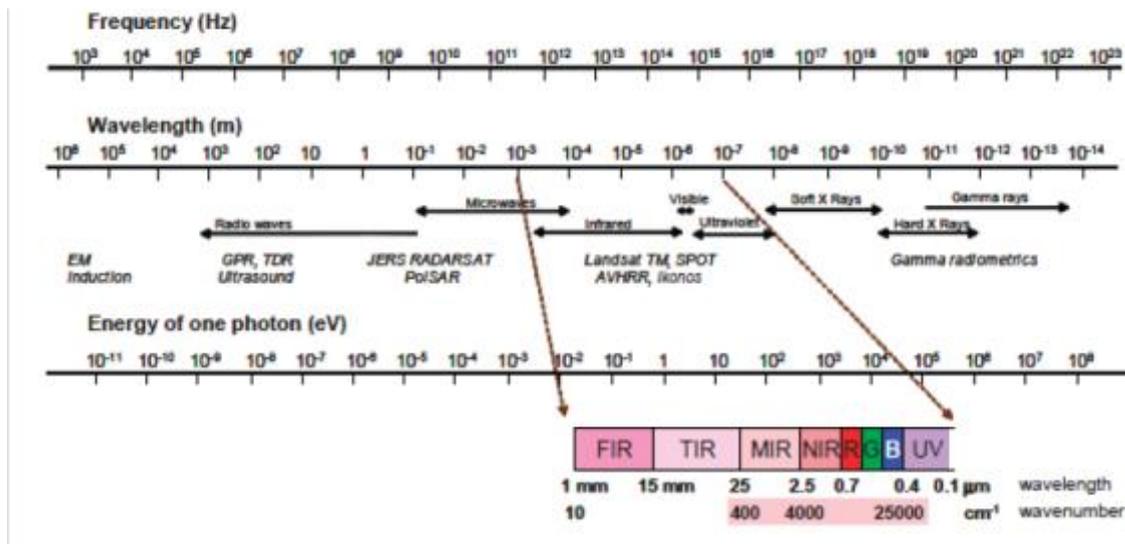
**Tableau 1-2 :** Avantages et limites de la SPIR (d'après la synthèse bibliographique de Rabetokotany (2013).

Avantages	Limites
<p>Rapide : quelques secondes suffisent pour recueillir le spectre d'absorption d'un échantillon, qui servira à la prédiction de sa composition. A comparer avec la très longue durée d'une analyse de composition chimique (plusieurs jours).</p> <p>Non destructif : l'échantillon est récupéré intact après analyse. Cette propriété est particulièrement importante pour des échantillons très peu abondants ou que l'on doit conserver pour des analyses ultérieures</p> <p>Econome en échantillon : classiquement 4 à 5 grammes suffisent. Dans certaines conditions on peut même réaliser des spectres sur des quantités extrêmement faibles.</p> <p>Peu onéreux : le coût de passage des échantillons est très faible. Il faut simplement prévoir quelques analyses de référence au laboratoire (au moins 50) pour vérifier que l'étalonnage reste correct au cours du temps et bien adapté aux nouveaux échantillons.</p>	<p>Investissement initial : si les analyses spectrales sont peu onéreuses, l'appareil est assez couteux (mais, grâce aux progrès technologiques, ces coûts sont en constante réduction).</p> <p>Constitution de modèles de prédiction : des « étalonnages », pour chaque produit et constituant, sont nécessaires avant de pouvoir prédire les caractéristiques d'un échantillon à analyser.</p> <p>Prédiction des substances minérales : puisque la SPIR est basée principalement sur l'absorption du rayonnement par les molécules organiques, la prédiction des substances minérales reste encore limitée. De plus, la prédiction des substances (organiques ou minérales) à l'état de traces est difficile car le signal spectral leur correspondant est trop faible.</p>

### 1.4.2. Principe de la spectrométrie Proche infrarouge

La SPIR, méthode physique basée sur la capacité des composés organiques à absorber le rayonnement infrarouge, permet d'estimer la composition chimique de l'échantillon dans un intervalle de temps beaucoup plus raisonnable qu'avec des méthodes physico-chimiques classiques (Salgado et al., 2012). Norris (1989), un des pionniers du développement de la SPIR, en donne la définition suivante : "La SPIR est une méthode instrumentale basée sur le fait que chacun des composés chimiques majeurs d'un échantillon a une propriété d'absorption dans le proche infrarouge qui peut être utilisée pour différencier un composé parmi d'autres. La sommation de ces propriétés d'absorption combinée avec les propriétés de diffraction de l'échantillon constitue la réflectance diffuse de l'échantillon. Par conséquent, le signal de réflectance dans le proche infrarouge contient une information sur la composition de l'échantillon". Le principe de la SPIR repose sur le fait que les liaisons chimiques O-H, N-H, C-H, etc. se comportent comme des oscillateurs vibrant en permanence à des fréquences spécifiques (Xu et al., 2013). Ces liaisons peuvent absorber une radiation proche infrarouge dont la fréquence est égale à sa fréquence de vibration et ainsi passer d'un état fondamental à un état excité (Mbow et al., 2013).

Les spectres infrarouges correspondent à une partie du spectre électromagnétique (Figure 1-9). Les plages des longueurs d'ondes utilisées en spectrométrie infrarouge se situent entre 800 et 2 500 nanomètres (nm) pour le proche infrarouge (NIR – *Near InfraRed*) et de 2 500 à 11 000 nm pour le moyen infrarouge (MIR – *Mid InfraRed*). Ces plages spectrales peuvent aussi être exprimées en nombre d'ondes (en  $\text{cm}^{-1}$ ), respectivement 12 500 – 4 000  $\text{cm}^{-1}$  pour le NIR et 4 000 – 900  $\text{cm}^{-1}$  pour le MIR, le nombre d'onde étant l'inverse de la longueur d'onde. Dans la pratique du SPIR, la plage spectrale s'étend généralement de 1 100 à 2 500 nm et correspond aux bandes d'absorption des constituants susceptibles d'être dosés dans les produits d'origine végétale ou animale (Lila et Furstoss, 2000).



**Figure 1-9 :** Distribution des spectres électromagnétiques et mise en évidence de la partie visible et moyen infrarouge (d'après McBratney et al., 2003 citée par Ramarosan, 2017).

Le principe de base de l'utilisation de l'information spectrale est le développement de modèles empiriques d'étalonnage. Les spectres d'un produit donné sont discrétisés, c'est-à-dire que les valeurs d'absorbance pour les diverses longueurs d'ondes du spectre, selon un pas défini, sont transformées en autant de variables. Des statistiques multivariées sont effectuées afin de relier les valeurs de références issues des analyses chimiques et les données spectrales (Tableau 1-3). La chimiométrie est l'application d'outils mathématiques, en particulier statistiques, pour l'analyse de données afin d'obtenir le maximum d'informations à partir de données spectrales.

**Tableau 1-3 :** Exemple de présentation des tableaux sur des statistiques multivariées pour relier les résultats d'une analyse chimique à des données spectrales.

	Abs <sub>1100nm</sub>	Abs <sub>1102nm</sub>	...	Abs <sub>2500nm</sub>
éch 1	X <sub>1-1</sub>	X <sub>2-1</sub>	...	X <sub>700-1</sub>
éch 2	X <sub>1-2</sub>	X <sub>2-2</sub>	...	X <sub>700-2</sub>
...	...	...	...	...
éch 100	X <sub>1-100</sub>	X <sub>2-100</sub>	...	X <sub>700-100</sub>

	%C
éch 1	C <sub>1</sub>
éch 2	C <sub>2</sub>
...	...
éch 100	C <sub>100</sub>

Une fois que les spectres et les valeurs de références sont acquis et appariés, les procédures mathématiques et traitements statistiques (analyses multivariées comme la *Partial Least Square*) sont effectués afin de développer l'équation de calibration. Des logiciels spécifiques ont été développés pour le traitement des spectres et la modélisation (exemple : WinISI, Unscrambler, etc.).

Des critères sont nécessaires pour évaluer la robustesse des modèles et la pertinence des résultats de prédiction. Les paramètres statistiques les plus adoptés en spectrométrie sont les suivants :

- Le coefficient de détermination  $R^2$  est le plus fréquent : il représente la proportion de variation représentée par le modèle. La valeur du coefficient de détermination  $R^2$  est souvent employée comme premier critère (Couteaux et al., 2003).  $R^2$  est compris entre 0 et 1. L'équation de calibration décrit au mieux la variabilité des données spectrales quand  $R^2$  tend vers 1. Une valeur de  $R^2$  supérieure à 0,8 qualifie une calibration satisfaisante alors que pour des valeurs de  $R^2$  comprise entre 0,5 et 0,7 le modèle est approximatif (Williams, 2001).
- La racine des erreurs quadratiques moyennes (*Root Mean Squared Error*) en calibration (RMSEC), en cross validation (RMSECV) et en prédiction (RMSEP). En général, on sélectionne les modèles ayant des valeurs de RMSE les plus faibles.
- Le RPD est le rapport entre l'écart-type (SD) de la valeur du lot de calibration ou de validation ou encore de prédiction à la SEC ou SECV ou SEP (*Standard Error*). Une valeur élevée du RPD indique un meilleur modèle (Chang et al., 2001 ; Couteaux et al., 2003). D'après Chang et al. (2001), un RPD supérieur à 2 peut être considéré comme «excellent », un RPD entre 1,4 et 2 est classé comme « acceptable » et un RPD inférieur à 1,4 qualifie une mauvaise prédiction et nécessite encore des améliorations.

### **1.4.3. Application de la Spectrométrie Proche Infrarouge dans l'analyse de plantes et matières organiques**

D'une manière générale, la SMIR et la SPIR sont souvent utilisées pour la caractérisation des matières organiques et des sols (Peltre et al., 2011). Depuis les années 90, la méthode développée sur les plantes, grains, et plus particulièrement les fourrages afin de déterminer leur valeur nutritionnelle, a gagné en précision et en fiabilité (Norris et al., 1976 ; Batten, 1998 ; Corson et al., 1999 ; Lila et Furtoss, 2000 ; Aufrere et al., 2006 ; Tran et al., 2010 ; Mbow et al., 2013 ; Asekova, 2016). Schmitt et al. (2014) a synthétisé les études réalisées pour la détermination des teneurs en minéraux des différents aliments par la SPIR (fromage, vin, grains d'haricot, lait, filet de porc, plantes à tubercules etc. Les résultats pour chaque élément diffèrent d'un produit à un autre. Xu et al. (2013) ont résumé les différents résultats sur la composition des biomasses (cellulose, hemicellulose, cendres, humidité, etc.).

Quelques études ont été déjà entreprises pour évaluer la possibilité d'utilisation de la SPIR dans la détermination des teneurs minérales de certaines plantes (Tableau 1-4) : Na, K, Ca, P, Mg, Fe, Mn, Cu, and Zn des fourrages (Clark et al., 1987 ) et Ba, Li, Mo, Ni, Pb, V, Al, S, and Si (Clark et al., 1989.) ; les teneurs en C, N, P des pins d'Alep (Gillon, 1999) ; les cendres, macronutriments, et éléments en trace des certaines espèces forestières (Petisco et al., 2005 ; Petisco et al., 2008) ; les teneurs minérales des pailles de riz (Huang et al., 2009) ; le N, P, K, Fe, Mn, Zn, Cu des feuilles de citron (Liao et al., 2012). Cozzolino and Moron (2004) ont également utilisé la SPIR pour quantifier la concentration des minéraux en traces dans les légumes. Maarschalkerweerd et Husted (2015) ont présenté une vue d'ensemble des performances de calibration de la composition minérale de certaines plantes. Certains auteurs ont également testé la potentialité de la SPIR pour déterminer les compositions des fumiers et composts (Smith et al., 2001 ; Albrecht et al., 2008 ; Galvez-Sola et al., 2010 ; Huang et al., 2008) (Tableau 1-5).

Globalement, les statistiques obtenues pour la calibration et la validation de ces différentes études citées ci-dessus ont montré la possibilité de déterminer les teneurs en C et N des biomasses (plantes et matière organique) (Batten, 1991 ; Gillon et al., 1999 ; Cozzolino et Moron, 2002 ; Albrecht et al., 2008 ). Néanmoins, pour les autres nutriments, les précisions varient selon le cas étudié. Certains auteurs ont eu des résultats acceptables pour Ca, K (Clark et al., 1987 ; Gillon et al., 1999 ; Cozzolino et Moron, 2002 ; Petisco et al., 2008) et P (Gillon et al., 1999 ; Smith et al., 2000 ; Cozzolino et Moron, 2002 ; Albrecht et al., 2008 ; Galvez-

Sola et al., 2010 ; Huang et al., 2009). Les prédictions des autres éléments (Mg, Cu, Zn, Mn, Na, Fe, S) sont parfois approximatives ou faibles. Shenk et Westerhaus (1985) cité par Dryden (2003) ont obtenu un  $R^2$  variant de 0,17 à 0,74 pour la prédiction du P, K, Ca et Mg des fourrages.

Néanmoins, il y a encore peu de résultats sur l'application de la SPIR pour la caractérisation des minéralomasse des fourrages ou plantes cultivées dans les systèmes de production africains. Il y a donc une forte nécessité à développer des études dans ce sens.

**Tableau 1-4** : Résultats de calibration par SPIR, pour différents minéraux d'échantillons de plantes.

Echantillons	Eléments	$R^2_c$	RPD <sub>c</sub>	n	Auteurs
<i>i) Graminées</i>					
Riz ( <i>Oryza Sativa L.</i> )	N (%)	0,96		67	Batten, 1991
Pailles de riz coupées	K (g kg <sup>-1</sup> )	0,87		222	Huang et al., 2009
	Na (g kg <sup>-1</sup> )	0,58			
	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	0,94			
	Mg (g kg <sup>-1</sup> )	0,90			
	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	0,52			
Pailles de riz broyées	K (g kg <sup>-1</sup> )	0,91			Huang et al., 2009
	Na (g kg <sup>-1</sup> )	0,89			
	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	0,89			
	Mg (g kg <sup>-1</sup> )	0,9			
	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	0,51			
Chiedent ( <i>Agropyron spp.</i> )	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	0,86		200	Clark et al., 1987
	P (g kg <sup>-1</sup> )	0,77			
	Mg (g kg <sup>-1</sup> )	0,77			
	K (g kg <sup>-1</sup> )	0,83			
	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	0,41			
	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	0,44			
	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	0,50			
	Na (mg kg <sup>-1</sup> )	0,27			
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	0,72				

Echantillons	Eléments	R <sup>2</sup> <sub>c</sub>	RPD <sub>c</sub>	n	Auteurs
Prairies naturelles	N		3,9		de Aldana et al., 1995
	P		1,5		cité par van
	K		1,8		Maarschalkerweert et
	Ca		2,2		Husted (2015)
	Mg		1,9		
	Fe		1,8		
	Mn		1,5		
	Zn		1,9		
	Cu		1,8		
i) Légumineuses					
Luzerne (Medicago sativa L.)	N (g kg <sup>-1</sup> )	0,93		191	Cozzolino et Moron,
	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	0,95		191	2002
	K (g kg <sup>-1</sup> )	0,93		172	
	P (g kg <sup>-1</sup> )	0,88		186	
	Mg (g kg <sup>-1</sup> )	0,82		192	
Trèfle blanc (White Clover)	N (g kg <sup>-1</sup> )	0,98		73	Cozzolino et Moron,
	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	0,52		74	2002
	K (g kg <sup>-1</sup> )	0,97		74	
	P (g kg <sup>-1</sup> )	0,76		74	
	Mg (g kg <sup>-1</sup> )	0,75		75	
	S (g kg <sup>-1</sup> )	0,45		75	
ii) Légumes					
Légumes	Na (g kg <sup>-1</sup> )	0,81		261	Cozzolino et Moron,
	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	0,61	5,6	254	2004
	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	0,51	1,7	249	
	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	0,57	1,3	254	
	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	0,76	0,6	249	
	B (mg kg <sup>-1</sup> )	0,8	0,8	257	
	S (g kg <sup>-1</sup> )	0,84	1,8	245	
iii) Esp�ces ligneuses					
Esp�ces foresti�res	N (g kg <sup>-1</sup> )	0,99		183	Petisco et al., 2005
	P (g kg <sup>-1</sup> )	0,93			
	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	0,95			
Esp�ces foresti�res	K (g kg <sup>-1</sup> )	0,9		111	Petisco et al., 2008
	Mg (g kg <sup>-1</sup> )	0,81			
	Cu (ppm)	0,89			
Espèces forestières	Fe (ppm)	0,79			Petisco et al., 2008
	Zn (ppm)	0,85			

Echantillons	Eléments	$R^2_c$	RPD <sub>c</sub>	n	Auteurs
Pin d'Alep ( <i>Pinus halepensis</i> )	C (%)	0,99		84	Gillon et al., 1999
	N (mg g <sup>-1</sup> )	0,94			
	P (mg g <sup>-1</sup> )	0,95			

**Tableau 1-5 :** Résultats de calibration par SPIR, pour différents minéraux d'échantillons de résidus organiques

Echantillons	Eléments	$R^2_c$	n	Auteurs
Fientes de volailles	N (%)	0,99	123	Smith et al., 2001
	C (%)	0,86		
	P (%)	0,93		
Fèces de bovins	N	0,80		Cozzolino et Moron, 2002
	Cr	0,56		
Compost	C(%)	0,95		Albrecht et al., 2008
	N(%)	0,96		Albrecht et al., 2008
	P(%)	0,99		Galvez-Sola et al., 2010
Compost frais	K (g kg <sup>-1</sup> )	0,62	90	Huang et al., 2008
	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	0,32	90	
	Mg (g kg <sup>-1</sup> )	0,83	90	
	Fe (g kg <sup>-1</sup> )	0,79	90	
	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	0,63	90	
Compost sec	K (g kg <sup>-1</sup> )	0,76	120	Huang et al., 2008
	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	0,88		
	Mg (g kg <sup>-1</sup> )	0,92		
	Fe (g kg <sup>-1</sup> )	0,92		
	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	0,45		

## **Chapitre 2. Transfert de fertilité et potentiel d'acidification**

---

## **Nutrient depletion and acidification potential related to biomass transfers within Malagasy mixed crop-livestock farming systems<sup>5</sup>**

Marie Lucia Fanjaniaina<sup>a</sup>, Fidiniaina Ramahandry Andriandrahona<sup>b</sup>, Jean Larvy Delarivière<sup>c</sup>, Paulo Salgado<sup>d</sup>, Emmanuel Tillard<sup>e</sup>, Lilia Rabeharisoa<sup>a</sup>, Thierry Becquer<sup>c</sup>.

<sup>a</sup> Université d'Antananarivo, Laboratoire des RadioIsotopes, BP 3383, 101 Antananarivo, Madagascar

<sup>b</sup> FOFIFA, BP 230, Antsirabe 110, Madagascar

<sup>c</sup> IRD, UMR Eco&Sols, CIRAD-INRA-SupAgro, F-34060 Montpellier Cedex 2, France

<sup>d</sup> CIRAD, UMR SELMET, INRA-SupAgro, BP 319, Antsirabe 110, Madagascar

<sup>e</sup> CIRAD, UMR SELMET, INRA-SupAgro, F-97410 St Pierre, La Réunion

### **Highlights**

Output of nutrients by crop harvesting is the main source of soil nutrient losses.

Biomass removal has a significant impact on soil acidification.

The low quantity and the poor quality of manure inputs are insufficient to balance nutrient losses in mixed crop-livestock systems.

Nutrient balance provides a good overview on soil fertility evolution.

---

<sup>5</sup> Cet article a été soumis à *Biology and Fertility of Soils*

## **Abstract**

Soil fertility decline is widespread in sub-Saharan Africa. Nutrient depletion is mainly related to nutrient mining driven by biomass removal without replenishment of nutrients by fertilizers. The nutrient content and the ash alkalinity of biomass of the main crops produced in mixed crop-livestock farming systems were determined in the Highlands of Madagascar. Samples of rice and forage were collected from seventy rice plots and ninety-one cultivated forage plots. Seventy manure samples were also collected at farm level. Nutrient outputs induced by crop harvest (rice and forage) resulted in losses of 31-57 kg N ha<sup>-1</sup>, 6-9 kg P ha<sup>-1</sup> and 33-57 kg K ha<sup>-1</sup>. The vegetative parts of plants were richer in K than the reproductive parts (grain) and contributed to the greater part of K output. The ash alkalinity of samples, calculated as the difference between cation and anion content, was 49-100 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> for forage crops, 31 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> for rice straw, and only 4 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> for rice grains. Biomass removal caused a loss of nutrients and an increase of soil acidity. Due to the low nutrient retention efficiency during the handling and storage of manure, the traditional input of manure at 5-ton fresh matter ha<sup>-1</sup> is insufficient to balance nutrient losses in Malagasy mixed crop-livestock farming systems. The maintenance of productive and sustainable mixed crop-livestock farming systems requires greater attention in ensuring nutrient balance at both plot and farm levels.

## **Keywords**

Soil fertility; Nutrient output; Ash alkalinity; Manure; Madagascar.

## 2.1. Introduction

Soil nutrient depletion refers to nutrient losses induced through natural and human-induced processes (Tan et al., 2005). Erosion and leaching, which can be increased by farmer activities, are the main natural processes involved. However, human-induced nutrient depletion is mainly related to soil nutrient mining process driven by biomass removal without adequate replenishment of the required nutrients, resulting in negative nutrient balances. According to Tan et al. (2005), at a global scale, soil nutrient deficits were estimated at an average rate of 18.7 kg N, 5.1 kg P, and 38.8 kg K ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> for four main cereal crops (wheat, rice, maize and barley), corresponding to an annual total nutrient deficit of 5.5 Tg (1 Tg = 10<sup>12</sup> g) N, 2.3 Tg P, and 12.2 Tg K, and a potential global cereal production loss of 1,136 Tg yr<sup>-1</sup>.

In Africa, traditional farming systems have led to severe nutrient depletion, low crop yields and poverty (Stoorvogel et al., 1993; Roy et al., 2005; Lal, 2009; Chianu et al., 2012). Different studies indicated that soil fertility decline is a major problem in many tropical countries and, particularly, in sub-Saharan Africa (Stoorvogel et al., 1993; Hartemink, 2006). Stoorvogel et al. (1993) have calculated for the arable soils of around forty sub-Saharan African countries, for the period 1982-1984, the following negative balances for the major nutrients: 22 kg N ha<sup>-1</sup>, 2.5 kg P ha<sup>-1</sup>, and 15 kg K ha<sup>-1</sup>. They also predicted an increase in the loss of nutrients for 2000. More recently, Cobo et al. (2010), reporting 57 studies on nutrient balances in Africa, also showed negative balances for N and K in most of the studies (i.e. 85 and 76% of studies, respectively), whereas, for P the trend was less noteworthy (i.e. only 56% of studies with negative balances). The positive balances in these studies were generally associated with land use systems of wealthier farmers, whereas the systems from poorer farmers had usually negative balances. Soil fertility decreases due to the output of nutrients within the harvested products and crop residues, and through losses such as soil erosion, solution leaching and gaseous losses during denitrification and volatilization. This occurs when the nutrient outputs are not balanced with suitable inputs from mineral and/or organic fertilizers or biological nitrogen fixation (Stoorvogel et al., 1993; Roy et al., 2005). The output of nutrients within harvested products and crop residues account for approximately 50-70% of N, P and K losses, while erosion accounts for about one-third of the losses (Stoorvogel et al., 1993).

The output of biomass is also associated to soil acidification (Curtin and Wen, 2004). As plants grow, they extract nutrients from soil solution and incorporate them into plant tissue. The assimilation of cations by plants is accompanied by a transfer of protons ( $H^+$ ) from the plant to the surrounding soil solution, while the assimilation of anions is accompanied by a transfer of hydroxyl ion ( $OH^-$ ) leading to proton neutralization in the soil (van Breemen et al., 1983). As generally cations uptake exceeds anions uptake (Noble et al., 1996, Noble and Randall, 1999), the output of biomass is associated to soil acidification.

Most farming systems in Africa integrate crop and livestock production. Livestock provide draft power for crop management or transport, as well as meat and milk for households and cash income (Powell et al., 2004). These mixed crop-livestock farming systems play a major role in fertility transfer and nutrient redistribution through harvesting of forage and crop residues to feed animals, and managing manure to sustain soil fertility (Dugué, 1998; Powell et al., 2004; Giller et al., 2006; Rufino et al., 2006; Naudin et al., 2015). As farmers preferentially allocate manure close to the homestead, livestock promote the concentration of nutrients in some fields, resulting in strong negative soil fertility gradients away from the homestead (Manlay et al., 2004; Giller et al., 2006).

Nutrient mining can jeopardize food production hindering a sustainable land management. For an effective and sustainable management of resources available at the farm or landscape scales, the calculation of the nutrient flows through biomass transfer is essential to quantify fertility transfers. This paper aims to determine the nutrient content of the main crops, i.e. rice and forage, and of the manure produced within the mixed crop-livestock farming systems from the Malagasy Highlands. Moreover, the soil acidification/alkalinization occurring through the transfer of biomass was calculated. Finally, the balance of soil nutrients through harvest of crop or forage biomasses and manure management is discussed.

## 2.2. Materials and methods

### 2.2.1. Mixed farming system

The study was conducted in the Malagasy Highlands (1,200 - 1,550 m asl), in the Vakinankaratra region, near Antsirabe (19°51'57'' S, 47°01'59'' E), at around 160 km south of Antananarivo, capital of Madagascar. The climate is characterized by warm and rainy summers from November to April (mean rainfall of 1,300 mm and temperature of 19.2°C) and cold and dry winters from May to October (188 mm and 15.0°C).

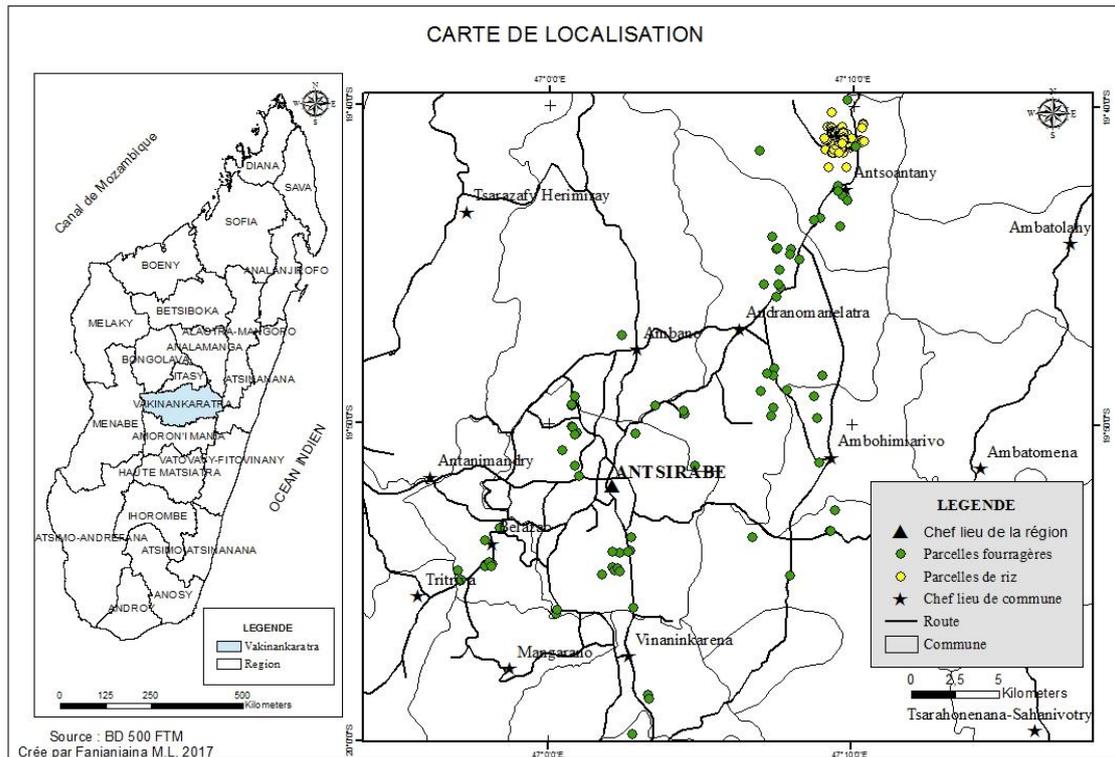
Agriculture is mainly practiced on smallholder farms with dominance of mixed crop-livestock farming systems. The landscape of the region distinguishes hills (locally named *tanety*) and lowlands between the hills. Rainfed crops (mainly rice) and forages are produced on the hills, whereas irrigated rice is produced on the lowlands. Rice, which is by far the most important staple crop of Malagasy people, is produced for both family consumption and for sale.

Livestock production is dominated by small herds, with less than five heads, ranging from low-productive native zebu to more intensive dairy cattle, based on European pure-bred (i.e., Norwegian Red and Holstein). For dairy cattle, cultivated fodders and natural pastures are used, i.e. perennial tropical forages (e.g. *Pennisetum* sp., *Brachiaria* sp., etc.), grown on the hills and/or temperate forages (e.g. oat, ryegrass, etc.) sown on the footslope and lowlands during the dry season. However, in most of the farms, where cattle is mainly used for draft power, crop residues (e.g. rice straw, maize residue, etc.) and weed plants or wild grass species (locally named *bozaka*, and dominated by *Aristida* sp.) are mainly used for cattle breeding (feeding and litter). To ensure the supply of animals, the majority of the available plant biomass (forage, crop residues and *bozaka*) is exported from agricultural plots to the farm, where animals are generally located.

In the Vakinankaratra region, the majority of farmers use livestock manure to fertilize crop plots as the use of mineral fertilizers (urea and NPK) is generally very low in Madagascar (1.4 kg N, 0.6 kg P and 0.7 kg K ha<sup>-1</sup> on average; FAO, 2014). Farmers preferentially allocate fertilizers and labor to the fields close to the homestead, resulting in strong negative soil fertility gradients away from the homestead (food crops: maize, rice, etc.). Common lands are mined for browse and grazing by draft cattle.

### **2.2.2. Sample collection and analysis**

The study was carried out in the vicinity of two small towns, Antsapanimahazo (19°38'24" S, 47°09'29" E) and Andranomanelatra (19°46'51"S, 47°06'16" E) (Figure 2-1). The soils of the plots are classified as Ferralsols (IUSS Working Group WRB, 2014). Samples were taken from seventy rice plots and ninety-one cultivated forage plots from mixed crop-livestock farms. Rice and forage samples were collected from two squares of 1 m<sup>2</sup> randomly selected in each plot. Plant weight was evaluated in the sub plots, before sampling, to evaluate the production per hectare. Rice samples were collected during harvest time and were separated into straw and grains. The forage samples presented different stages (tillering, sprouting, heading and flowering) and were collected according to the management of the plot by the farmers. Forages have been collected only once in a one-year period but farmers usually cut three to five times per year. The several manures used by farmers (70 samples) were also collected at farm level. These manures mainly come from farms where cattle, used as draft animals, were fed with low quality feed and where manure was stored under traditional smallholder practices, resulting in low quality manure. Biomass dry weight was determined after drying at 60°C for 48 hours. Sub-samples were finely ground for analysis. Soil samples were also collected in each plot. The main characteristics of the soils from rice and forage plots are presented in Table 1.



**Figure 2-1:** Samples plots.

The elemental composition of the biomass was determined. The total N was determined by dry combustion in a Flash 2000 CHN Analyzer (Thermo Fisher Scientific GmbH, Dreieich, Germany). Other elements were determined after calcination of 0.5 g of dried and ground material at 550°C. After cooling, the ash was dissolved in warm 2% HCl before analysis. Calcium (Ca), magnesium (Mg) and potassium (K) were determined by atomic absorption using an iCE 3000 spectrophotometer (Thermo Fisher Scientific GmbH, Dreieich, Germany). Total phosphorus (P) was determined colorimetrically, using the molybdenum blue-ascorbic acid method. Total sulfur (S) was measured turbidimetrically after precipitation by acid medium barium chlorite. Chloride (Cl) was determined by argentometric assay (AgCl precipitation) using an automated titrator (Crison, Alella, Spain) after boiling ground plant with distilled water. The total nutrient content in the biomasses exported was determined by multiplying the nutrient concentration of the plant part by the harvest weight of that plant part.

The ash alkalinity or acid neutralizing capacity (ANC) of biomasses was determined by the difference between the total cation and anion contents (Noble and Randall 1999; Curtin and Wen, 2004):

$$\text{ANC} = \sum (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+) - \sum (\text{SO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{Cl}^-).$$

The sodium content of plant biomass was not determined because the ferrallitic soils are particularly poor in exchangeable Na and the sodium content is generally very low in comparison with the potassium content for most plants (i.e. natrophobe plants) (Smith et al., 1980). Nitrogen is not taken into account in the ANC equation, although it is well known that the N-nutrition of plants may play a key role in the proton budget. However, if the extent of organic nitrogen mineralization to  $\text{NO}_3^-$  and/or  $\text{NH}_4^+$  is equivalent to their assimilation by plants, which is the case in non-fertilized agroecosystems, then these  $\text{H}^+$  transfer process balances and the overall process is of no importance for the  $\text{H}^+$  budget of the agroecosystems (van Breemen et al., 1983). The ash alkalinity of the biomasses can be expressed as  $\text{CaCO}_3$  equivalent, i.e.  $1 \text{ mol}_c = 50 \text{ g CaCO}_3$ .

**Table 2-1:** Summary statistics for the main chemical properties of the rice and forage plots studied.

	Rice plots (n = 70)				Forage plots (n = 91)			
	mean	sd	min	max	mean	sd	min	max
pH	4.7	0.3	4.2	5.5	5.1	0.4	4.1	6.0
C <sub>org</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	40	12	16	100	34	29	76	298
P <sub>total</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	784	252	437	2047	1095	663	61	3839
P <sub>iresine</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	1.4	1.0	0.0	7.5	5.0	6.6	0.5	49.1
CEC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	2.6	0.8	1.2	5.3	5.6	3.9	1.6	23.3
Ca (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0.4	0.2	0.1	1.1	1.3	1.5	0.0	6.4
Mg (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0.1	0.1	0.0	0.4	0.7	0.6	0.1	3.7
K (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0.1	0.1	0.0	0.3	0.2	0.3	0.0	2.6
Al (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	1.5	0.9	0.1	3.9	1.2	0.9	0.0	3.6

Basic soil characterization was performed on the air-dried <2-mm material. pH was measured in distilled water using 1:2.5 mass soil to solution ratio; the total organic carbon content (C<sub>org</sub>) was determined by the dichromate oxidation method of Walkley & Black; Total phosphorus (P<sub>total</sub>) and available phosphorus (P<sub>iresine</sub>) were determined by the molybdenum blue method using a UV/VIS spectrophotometer, after digestion with concentrated perchloric acid and extraction with an anion exchange membrane, respectively; the cation exchange capacity (CEC) and exchangeable Ca, Mg and K were measured at soil pH by hexammine cobalt (III) chloride extraction, and Co, Ca, Mg and K were determined by atomic absorption; exchangeable Al was determined by titration with 0.01 N NaOH after exchange with 1N KCl.

### 2.2.3. Statistical analyses

The data on mineral composition of crops (straw and grain) and fodder were analyzed by an analysis of variance (ANOVA) using the parts of rice and species of forage as a factor. Means were grouped according to the Newman-Keuls test. In the tables, means followed by the same letter are not significantly different at p<0.05.

## 2.3. Results

### 2.3.1 .Mineral composition of plants and manures

The statistics of plant composition, including range, mean and standard deviation (SD) are presented in Table 2. The chemical analysis of rice showed that the major nutrients were nitrogen for the grain (13.8 g N kg<sup>-1</sup>), and nitrogen and potassium for the straw (11.3 g N kg<sup>-1</sup> and 12.8 g K kg<sup>-1</sup>), the levels of other nutrients being much lower. Phosphorus and N contents of grains were significantly higher than those of straws. Nevertheless, straws were significantly richer in K, Ca, S and Cl than grains.

Forages had an average content of 15.0 g N kg<sup>-1</sup>, 2.8 g P kg<sup>-1</sup>, 21.1 g K kg<sup>-1</sup>, 3.6 g Mg kg<sup>-1</sup>, 4.0 g Ca kg<sup>-1</sup>, 1.6 g S kg<sup>-1</sup>, 6.4 g Cl kg<sup>-1</sup> for all the species studied. They were significantly richer than rice samples for all nutrients, but particularly for K with 21.1g K kg<sup>-1</sup> for forage vs 2.8 g K kg<sup>-1</sup> and 12.8 g K kg<sup>-1</sup> for rice grain and straw, respectively. No significant differences were found in the mineral composition according to the species of forages. However, the standard deviations of samples were often high due to the different vegetation stages which explained the high variability of nutrient contents of forages.

The mean nutrient contents of manure were 9.1 g N kg<sup>-1</sup>; 0.5 g P kg<sup>-1</sup>; 7.2 g K kg<sup>-1</sup>; 2.3 g Ca kg<sup>-1</sup>; 1.1 g Mg kg<sup>-1</sup> (Table 2-2). They were especially rich in K.

**Table 2-2:** Nutrient dry weight concentrations of rice, forages and manure (mean  $\pm$  standard deviation).

	Sample number	N	P	K	Ca	Mg	S	Cl
		g kg <sup>-1</sup>						
<b>Rice</b>	70							
Grain	70	13.8 $\pm$ 1.7 <sup>a</sup>	1.9 $\pm$ 0.7 <sup>a</sup>	2.8 $\pm$ 0.6 <sup>b</sup>	1.1 $\pm$ 0.3 <sup>b</sup>	1.0 $\pm$ 0.3 <sup>a</sup>	0.3 $\pm$ 0.1 <sup>b</sup>	0.6 $\pm$ 0.4 <sup>b</sup>
Straw	70	11.3 $\pm$ 6.9 <sup>b</sup>	0.6 $\pm$ 0.8 <sup>b</sup>	12.8 $\pm$ 3.8 <sup>a</sup>	2.9 $\pm$ 0.9 <sup>a</sup>	1.0 $\pm$ 0.4 <sup>a</sup>	1.1 $\pm$ 0.4 <sup>a</sup>	4.5 $\pm$ 1.3 <sup>a</sup>
<b>Fodder crops</b>	91							
<i>Brachiaria</i>	22	12.8 $\pm$ 3.9 <sup>A</sup>	2.3 $\pm$ 0.7 <sup>A</sup>	14.8 $\pm$ 8.2 <sup>A</sup>	4.3 $\pm$ 1.4 <sup>A</sup>	3.5 $\pm$ 1.2 <sup>A</sup>	1.1 $\pm$ 0.7 <sup>A</sup>	5.2 $\pm$ 2.4 <sup>A</sup>
<i>Pennisetum</i>	48	17.1 $\pm$ 6.3 <sup>A</sup>	2.9 $\pm$ 1.3 <sup>A</sup>	25.3 $\pm$ 13.3 <sup>A</sup>	3.9 $\pm$ 1.5 <sup>A</sup>	3.9 $\pm$ 2.0 <sup>A</sup>	1.7 $\pm$ 0.8 <sup>A</sup>	6.8 $\pm$ 3.4 <sup>A</sup>
<i>Chloris</i>	12	12.6 $\pm$ 4.2 <sup>A</sup>	2.7 $\pm$ 1.3 <sup>A</sup>	16.1 $\pm$ 12.5 <sup>A</sup>	3.9 $\pm$ 0.5 <sup>A</sup>	1.8 $\pm$ 0.5 <sup>A</sup>	1.8 $\pm$ 0.9 <sup>A</sup>	7.5 $\pm$ 3.2 <sup>A</sup>
Other species	9	13.0 $\pm$ 5.0 <sup>A</sup>	4.0 $\pm$ 2.9 <sup>A</sup>	20.2 $\pm$ 10.5 <sup>A</sup>	3.8 $\pm$ 0.4 <sup>A</sup>	4.3 $\pm$ 2.9 <sup>A</sup>	1.6 $\pm$ 0.6 <sup>A</sup>	7.0 $\pm$ 2.2 <sup>A</sup>
<b>Manure</b>	70	9.1 $\pm$ 3.0	0.5 $\pm$ 0.3	7.2 $\pm$ 6.5	2.3 $\pm$ 0.6	1.1 $\pm$ 0.4	0.5 $\pm$ 0.4	1.2 $\pm$ 1.0

Different small letters, in the same column, indicate significant differences between mineral content in rice grains and straw ( $p < 0.05$ ).

Different capital letters, in the same column, indicate significant differences between mineral content in different forage species ( $p < 0.05$ ).

### **2.3.2. Biomass production and nutrient removal**

The estimates of biomass production, expressed as dry matter and total nutrient contents for rice and forages are presented in Table 3. The mean yields of rice were 2.3 t ha<sup>-1</sup> and 2.2 t ha<sup>-1</sup> for grain and straw, respectively. The total amount of nutrients in plant biomass (i.e. in 2.3 t ha<sup>-1</sup> of grains and in 2.2 t ha<sup>-1</sup> of straw) are about 57 kg N ha<sup>-1</sup>, 6 kg P ha<sup>-1</sup>, 33 kg K ha<sup>-1</sup>, 9 kg Ca ha<sup>-1</sup>, 5 kg Mg ha<sup>-1</sup>, 3 kg S ha<sup>-1</sup> and 11 kg Cl ha<sup>-1</sup>.

The amounts of plant dry matter of the different species of forage varied from 2.5 to 3.9 t ha<sup>-1</sup> for one cut, considering that three to five cuts are usually made every year. These values varied greatly from one species to another due to the high heterogeneity of the samples collected, which depends mainly on the characteristics of each plot. Several factors could explain this high variability: the difference in the vegetative stage, the age of the cutting material, the height of the plants even if they were in the same stage, and the technical management (fertilization, irrigation, etc.) of the plot by farmers. The amount of nutrients in fodder plants was particularly important for N and K, ranging from 31 to 51 kg N ha<sup>-1</sup> and from 29 to 57 kg K ha<sup>-1</sup> for only one cut.

### **2.3.3. Ash alkalinity of biomass**

The ash alkalinity or ANC of biomass, calculated from the excess of cations derived from the mineral composition of plants and manures are presented in Table 4. The ash alkalinity of rice straw and forages were substantially higher than those of the rice grain. The ANC ranged from 49 to 100 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> for the different species of forages and was of 31 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> for rice straw, whereas it was only 4 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> for rice grain. These discrepancies were mainly due to potassium levels and, to a lesser extent, of Ca and Mg levels (Table 2). The ANC of manure was 26 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>. We calculated also the corresponding amount of the ANC in CaCO<sub>3</sub> equivalent (Table 4). They reached 24-48, 16 and 13 kg CaCO<sub>3</sub> t<sup>-1</sup> dry matter (DM), for forages, rice straw and manure, respectively.

**Table 2-3:** Biomass production and nutrient removal by harvesting of rice and forages (mean  $\pm$  standard deviation).

	Sample number	Biomass production t.ha <sup>-1</sup> DM <sup>a</sup>	Nutrient removal						
			N	P	K	Ca	Mg	S	Cl
			kg ha <sup>-1</sup>						
<b>Rice</b>									
Grain	70	2.3 $\pm$ 1.4	32.3 $\pm$ 20.3	4.8 $\pm$ 4.4	6.6 $\pm$ 5.0	2.6 $\pm$ 1.9	2.3 $\pm$ 2.1	0.8 $\pm$ 0.7	1.4 $\pm$ 1.2
Straw	70	2.2 $\pm$ 1.3	24.8 $\pm$ 23.6	0.7 $\pm$ 0.7	27.1 $\pm$ 19.7	6.7 $\pm$ 4.9	2.4 $\pm$ 2.0	2.5 $\pm$ 1.7	9.7 $\pm$ 6.7
<b>Grain+straw</b>	70	4.5 $\pm$ 2.4	57.1 $\pm$ 26.4	5.5 $\pm$ 4.7	33.0 $\pm$ 22.6	9.3 $\pm$ 6.0	4.7 $\pm$ 3.6	3.3 $\pm$ 2.0	11.0 $\pm$ 7.3
<b>Fodder crops</b>									
	91								
<i>Brachiaria</i>	22	3.9 $\pm$ 2.2	51.0 $\pm$ 37.2	8.4 $\pm$ 4.7	56.3 $\pm$ 45.7	16.5 $\pm$ 10.7	13.8 $\pm$ 11.0	5.3 $\pm$ 7.9	21.9 $\pm$ 23.3
<i>Pennisetum</i>	48	2.5 $\pm$ 2.4	40.3 $\pm$ 42.0	9.3 $\pm$ 8.8	56.7 $\pm$ 55.7	9.3 $\pm$ 8.6	9.3 $\pm$ 8.8	3.8 $\pm$ 3.9	16.2 $\pm$ 20.0
<i>Chloris</i>	12	2.7 $\pm$ 2.6	31.4 $\pm$ 29.4	7.9 $\pm$ 8.8	28.8 $\pm$ 18.7	10.6 $\pm$ 10.8	5.1 $\pm$ 5.4	4.2 $\pm$ 4.0	23.6 $\pm$ 28.7
Other species	9	2.5 $\pm$ 1.2	32.2 $\pm$ 22.1	9.4 $\pm$ 7.1	49.8 $\pm$ 36.8	9.5 $\pm$ 5.0	10.4 $\pm$ 7.7	3.7 $\pm$ 1.7	18.2 $\pm$ 13.4

<sup>a</sup> The production of forage, expressed as dry matter, corresponds to only one cut, whereas three to five cuts are usually made each year.

**Table 2-4:** Cation and anion balance, and ash alkalinity of rice, forages and manure (mean  $\pm$  standard deviation).

	$\Sigma$ Cations	$\Sigma$ Anions	Ash alkalinity <sup>a</sup>	CaCO <sub>3</sub> equivalent <sup>b</sup>
	cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup>		kg t <sup>-1</sup> DM	
<b>Rice</b>				
Grain	20 $\pm$ 5	16 $\pm$ 5	4 $\pm$ 3	2 $\pm$ 1
Straw	52 $\pm$ 13	21 $\pm$ 4	31 $\pm$ 11	16 $\pm$ 5
<b>Fodder crops</b>				
<i>Brachiaria</i>	116 $\pm$ 30	36 $\pm$ 10	80 $\pm$ 25	40 $\pm$ 12
<i>Pennisetum</i>	147 $\pm$ 47	47 $\pm$ 16	100 $\pm$ 36	48 $\pm$ 2
<i>Chloris</i>	98 $\pm$ 40	48 $\pm$ 18	49 $\pm$ 36	24 $\pm$ 18
Other species	138 $\pm$ 36	56 $\pm$ 21	83 $\pm$ 44	41 $\pm$ 2
<b>Manure</b>	36 $\pm$ 17	10 $\pm$ 6	26 $\pm$ 16	13 $\pm$ 8

<sup>a</sup> Ash alkalinity calculated according to the balance between  $\Sigma$  Cations and  $\Sigma$  Anions.

<sup>b</sup> Ash alkalinity expressed in units of CaCO<sub>3</sub> equivalent.

## 2.4. Discussion

### 2.4.1. Fertility transfer and soil nutrient losses

The results of the nutrient content of rice straw and grain as well as forages used in our study were within the ranges of values reported by other studies (Rhodes, 1995; Reuter and Robinson, 1997; Dobermann and White, 1999). Nutrient balances in African land use systems have been recently reviewed by Cobo et al. (2010) which reported 57 peer-reviewed studies. It is difficult to get a general picture of the nutrient balance due to the different spatial scales (i.e. from plot to continent) or type of balances (partial or full balances). However, the nutrient outputs induced by crop or fodder harvested in our study were higher than the negative full balances reported by Stoorvogel et al. (1993) and Cobo et al. (2010) that reach

nearly 22-30 kg N ha<sup>-1</sup>, 2-3 kg P ha<sup>-1</sup> and 15-30 kg K ha<sup>-1</sup>. On average, the nutrient outputs from crop yields and residues account for 50-60% of total N-P-K outputs, whereas erosion also represents a large output of nutrients (30-40%) (Stoorvogel et al., 1993). In the latter study, the nutrient outputs related to crop residues are lower comparing to nutrient outputs from crop yields. In mixed crop-livestock farming systems, as the one presented in our study, the outputs related to crop residues (rice straw) and fodder (green forage) represented the most important loss of nutrients at field level. The vegetative parts of plants were richer in K than the reproductive parts (grain) and contributed to a larger output of this element. For forage crops, these outputs can reach 115-160 kg N ha<sup>-1</sup>, 20-40 kg P ha<sup>-1</sup> and 110-230 kg K ha<sup>-1</sup>, according to grass species, for three or four cuts per year (i.e. 10 t DM productions per year). Outputs of Ca and Mg also occurred. They remained quite low for rice (9.3 kg Ca ha<sup>-1</sup> and 4.7 kg Mg ha<sup>-1</sup>), but they were high for green forages (37-42 kg Ca ha<sup>-1</sup> and 19-42 kg Mg ha<sup>-1</sup>, for 10 t DM production).

In the absence of mineral fertilizers or lime, animal manure may be the only nutrient resource which is available to African farmers to fertilize their crops (Tittonell et al., 2010). Large losses of organic carbon and nutrients occurred during handling and storage of manures (Rufino et al., 2006; Bernal et al., 2009; Tittonell et al., 2010). Tittonell et al. (2010), studying smallholder crop-livestock farming systems in Kenya, show that the stored manure lost 45% of its C in the open air and 69% under roof, due to different storage environments in terms of moisture, aeration and temperature. Bernal et al. (2009), who reviewed the effects of manure composting, indicate that organic matter losses by mineralization during composting of animal manures represent around 56% of its initial content. The nutrient content of manure is also generally low with regard to crops or forages, due to the outputs through animal metabolism, growth and animal products (meat, milk) and through losses during manuring (losses of feces and urine; volatilization of N-compounds; leaching of nutrients, etc.). For nitrogen, Rufino et al. (2006) estimate that partial N cycling efficiency ranged from 46 to 121% for livestock production, 6 to 99% for manure handling and 30 to 87% for manure storage. The overall cycling efficiency of nutrients could be very low. Our results showed that nutrient contents of manure were 20% lower for N and P and 45% lower for K than those of rice straw, and up to 30-80% lower than the nutrient contents of forages. This lower nutrient content (20-80%) is also associated with biomass losses (45-70%) during manuring. It suggests that nutrient losses during manure handling and storage correspond to about three-quarters of the nutrients harvested. These estimations are consistent with the efficiencies of

nutrient retention during storage reported by Tittonell et al. (2010) that varied between 24–38% for total N, 34–38% for P and 18–34% for K.

#### **2.4.2. Acidification potential of biomass harvest**

The role of vegetation in soil acidification/alkalinization is well known (van Breemen et al., 1983; Bolan et al., 1991; Noble et al., 1996; Tang and Rengel, 2003). According to van Breemen et al. (1983), the assimilation of cations by plants is accompanied by transfer of  $H^+$  from the plant to the surrounding soil solution while  $H^+$  is transferred into the plant during assimilation of anions. The decomposition of plants *in situ* releases  $OH^-$  to balance the protons excreted by plants during the growing period. However, the removal of vegetation causes soil acidification because it leads to a continuous removal of cations from the soil. When cation assimilation exceeds anion assimilation, the  $H^+$  produced is generally neutralized by weathering or ion exchange reactions, resulting in the decrease of soil pH and the increase of exchangeable aluminium. The low pH and high soluble aluminium content in soil solutions are well known for their toxic effects to plants (Boudot et al., 1994).

The ash alkalinity or acid neutralizing capacity of plant material can be determined by the difference between the total cations and anions (Noble et al., 1996; Noble and Randall, 1999; Curtin and Wen, 2004). It should be noticed that N does not contribute to soil acidification if the extent of organic nitrogen mineralization into  $NO_3^-$  and/or  $NH_4^+$  is equivalent to the original assimilation (van Breemen et al., 1983). The N cycling is only important in the  $H^+$  cycling when nitrogen is supplied to the field or when N leaching occurred. As mineral fertilizers are not often used, or used in very small amounts by Malagasy farmers, and nitrogen leaching is limited in soils without large inputs of nitrogen fertilizer, we assumed that N cycling does not contribute significantly to soil acidification. The harvest of crops and forages is by far the most important factor affecting acidification/alkalinization processes.

The alkalinity of grains ( $4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), rice straw ( $31 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) and forages ( $50\text{-}100 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) highlights the alkalizing power of biomass and the consequences of their harvesting on soil acidification. For our study, forages present a higher ANC than rice crops. Previous studies have also shown that grasses have usually a higher ANC than cereals (Pierre and Banwart, 1973). Forage-feed can cause continually a loss of the alkalinity and tends to acidify fodder plots. The output of 1 t of forage biomass is equivalent to the output of 24–48 kg  $CaCO_3$ , i.e., the output of 250–500 kg  $CaCO_3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  for a forage production of 10 t DM

ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> (i.e., for three or four cuts per year). Similarly, an export of 2.3 t ha<sup>-1</sup> of grain and 2.2 t ha<sup>-1</sup> of rice straw caused an output equivalent to 40 kg CaCO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. Even with a relatively low productivity, the harvest of crops contributed to soil acidification, leading to an unsustainable land management due to a non-compensation with manure or lime inputs. However, highly productive annual forages induced by far a higher soil acidification than traditional cereal crops, such as rice. These ANC values can be considered as an indication of the long-term potential effect of plant residue removal on soil acidity.

### **2.4.3. Manure as an alternative solution to nutrient depletion and soil acidification?**

In conditions where farmers have low access to agricultural inputs (mineral fertilizers and lime), due to their high costs and undeveloped market, the alternatives to manage the decreases of soil fertility and soil acidity are mostly related to the management of manure and plant residues. In many African farming systems, recycling of crop residues and livestock manure is the main source of nutrients available for crops, the manure being relatively rich in N and P (Fronning et al., 2008; Alvarez, 2012; Salgado et al., 2014). A large number of studies demonstrate the benefits of using manure to improve soil fertility and to increase crop yields (e.g. Petersen et al., 2007; Rufino et al., 2007; Zingore et al., 2008).

In agricultural systems, soil fertility declines when nutrient output exceeds input (Hartemink, 2006). It is widely known that African farmers are mining their soils of nutrients (Stoorvogel et al., 1993; Buerkert and Hiernaux, 1998; Sanchez, 2002). Forage or crop residue (for example rice straw) removal can exacerbate soil nutrient depletion. The retention of surface residues can help to conserve soil and water, and to maintain favourable levels of soil organic matter and nutrients (Powell et al., 2004; Scopel et al., 2013). The use of crop residues to feed animals in mixed crop-livestock farming systems can have negative consequences on the nutrient balance, as it favors nutrient losses, due to low nutrient cycling efficiency (Esilaba et al., 2005; Rufino et al., 2006).

According to our results of dry matter production and nutrient contents of rice, and with the hypothesis that 56% of the organic matter is lost during manuring (i.e., mean values of organic matter losses by mineralization during composting of beef and dairy manures reported by Bernal et al., 2009), we can calculate the percentage of nutrients remaining in manure with regard to their amount in straw or in the whole plant (grain + straw). The amount of nutrients remaining in manure with regard to the amount in straw was 36% for N, 69% for P, 26% for

K, 33% for Ca and 44% for Mg. The losses of N are due to the outputs through animal metabolism, growth and animal products (meat, milk) and through losses during manuring (solution leaching and gaseous losses during denitrification and volatilization). Potassium, Ca and Mg are lost through leaching, as counter-ion cations during leaching of nitrate, the main mineral N compound (Tittonell et al., 2010). However, our results showed relatively low N values compared to other studies in Madagascar where nitrogen content of cattle manure with addition of pig manure and poultry litter can reach up to 2.6% of dry matter (Salgado et al., 2014). For the whole rice, the amount of nutrients remaining in manure were only 15% for N, 9% for P, 21% for K, 24% for Ca and 23% for Mg. The nutrients from rice grain can be considered as an irreversible export when eaten or sold by farmers.

The traditional farmer practices correspond to an input of 5 t fresh matter (FM) ha<sup>-1</sup> (nearly 1.5 to 2.5 t DM ha<sup>-1</sup>) of manure. However, a rice production of 2.3 t ha<sup>-1</sup> of grain and 2.2 t ha<sup>-1</sup> of straw resulted in nearly 1 t DM ha<sup>-1</sup> of manure. So, to offset the export of nutrients by a rice crop it would be needed 4 tons of dry matter of manure for Ca, Mg and K, 6 tons for N and 11 tons for P. For *Brachiaria*, it would be needed 14 tons DM of manure for N (18-20 tons for K and Ca, 32 tons for Mg and 43 tons for P) to offset the export of nutrients by 10 tons of forage. Therefore, manuring the entire plot of the farm is possible only every 3 to 5 years. The composition and the fertilizer value of manure are highly variable from one farm to another, and are strongly related to farming systems and to management and storage practices of organic matter (Tittonell et al., 2010). Adding-value to manure and to other livestock effluents is essential to maintain soil fertility (Salgado et al., 2014).

In the long term, the export of grains and the loss of nutrients after feeding cattle with straw and forage, as well as manure storing, can reduce the amount of bioavailable minerals if no return of the exported nutrients is undertaken. In mixed crop-livestock systems nutrients are removed along with harvested crops and forages and supplied through animal manures. This study shows that manure input can help to compensate a part of nutrient outputs and to reduce soil acidification. Livestock has a major effect in the transfer of biomass from a plot to another plot and cause a fertility transfer (loss and/or enrichment) at the farm scale (Giller et al., 2006). Some of the nutrient flows and transfers that result in gradients in soil fertility vary strongly among farmers of different social status; notably between cattle owners and non-cattle owners (Giller et al., 2006). Crop and forage fields away from the farmhouse are generally mined for nutrients by harvesting. On the other hand, gardens, irrigated rice plots and fields closer to the homestead receive larger amounts of manure. In such situations, soil

fertility may have been maintained or improved at the expense of other lands through biomass transfer (Giller et al., 2006; Hartemink, 2006). Heterogeneity in soil fertility is also created by management. Manlay et al. (2004) reported similar results for mixed crop-livestock systems in West Africa at the village territory scale, with carbon, nitrogen and phosphorus flows from the most distant plots to the nearest plots of the village center, creating gradients of elements across landscape. To balance losses of nutrients in these integrated systems and to obtain sustainable increases in production, external inputs of nutrients are necessary (Buerkert and Hiernaux, 1998). These can be introduced by different pathways, for example, by a better management of organic matter to prevent nutrient losses, by mineral fertilizers or lime applied to cropland, and through externally produced concentrate feed to livestock.

## **2.5. Conclusion**

The decline of the productive potential of land is one of the main concerns of the Malagasy farmers. Removal of harvested products is the main output of nutrients and also leads to soil acidification. The sustainability of the production system requires that nutrients be returned to the cultivated plots. Manure is the major nutrient resource in many tropical farming systems, but its quantity is generally limited. In addition, the low efficiency of nutrient retention during manure handling and storage leads to large nutrient losses corresponding to up to three-quarters of the nutrients harvested. Manure management practices are of prime importance to increase nutrient cycling efficiency and to limit nutrient depletion. However, the amount of manure is generally insufficient to balance nutrient losses, resulting in soil fertility gradients with the most fertile fields near to the farmhouse whereas the fields away are generally mined for nutrients by harvesting. Efforts to improve the quality of manure and limit nutrient losses are essential. Moreover, the input of externally produced supplements fed to livestock and of mineral fertilizers should be considered to balance nutrient losses in mixed crop-livestock systems.

## **Acknowledgements**

This research was financed by BIOVA project, supported by African Union, under the reference AURG/197/2012. The authors are grateful to Marie-Paule Razafimanantsoa (LRI), Modeste Rakotondramanana (IRD), Bernadette Razaiarivony and Jules Rakotomahandry (FIFAMANOR) for their technical assistance in the field and in the laboratory. We thank

farmers from Vakinankaratra region who contributed with their time and patience to data collection.

**Chapitre 3. Flux de biomasses et  
nutriments à l'échelle des exploitations  
mixtes d'agriculture-élevage  
de la région Vakinankaratra**

---

### **3.1. Introduction**

L'agriculture tient une place très importante dans l'économie malgache. Selon le FAO/PAM (2009), plus de 70 % de la population sont des agriculteurs. La production agricole représente 43 % du produit intérieur brut (PIB) du pays (FAO, 2001). L'élevage représente quant à lui plus de 20 % de la contribution agricole au PIB (Jahnke, 1982). Néanmoins, l'agriculture est caractérisée par des systèmes de culture à faibles niveaux d'intrant de type familiaux (Rasoamampionona et al., 2008).

Actuellement, la durabilité de la production représente un défi majeur de l'activité agricole (Machinet et al., 2009). Cette durabilité des systèmes de cultures repose sur la gestion rationnelle de la fertilité des sols nécessitant une bonne gestion des nutriments et des biomasses (Crozier et al., 2004 ; Girma et al., 2007). En effet, la fertilité des sols en zone tropicale, notamment en Afrique, diminue du fait de l'exportation d'éléments nutritifs dans les récoltes et des pertes par lixiviation et érosion, non compensées par l'apport d'intrants fertilisants (Stoorvogel et Smaling, 1990) entraînant ainsi un appauvrissement rapide des sols en nutriments et une baisse de la productivité des cultures (Cattan et al., 2001 ; Schreinemachers et al., 2007). Du fait de la raréfaction des ressources fossiles et la volatilité des prix des intrants et des produits agricoles (Cochet et Devienne, 2006 ;), de la croissance démographique et de l'augmentation de la demande alimentaire associée (Courtin et Guengant, 2011), des changements des habitudes alimentaires et de l'évolution de la demande sociétale vers des pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement (Chaumet et al., 2009) les systèmes de production sont soumis à diverses contraintes. Un système de production durable devra valoriser efficacement les ressources locales et mobiliser de façon efficiente les intrants agricoles (Dugué et al., 2011).

Ainsi, une connaissance précise des bilans minéraux (sortie de nutriments / apports de nutriments / flux de nutriments au sein de l'exploitation), est indispensable pour estimer la durabilité des systèmes afin de mieux gérer les ressources minérales à l'échelle de l'exploitation agricole. En dressant le bilan des éléments minéraux exportés ou importés à l'échelle de l'exploitation, ainsi que les flux de nutriments entre les diverses composantes du système de production (agriculture, élevage, ménage) il sera possible de détecter un éventuel déséquilibre au niveau des bilans minéraux, qui remettrait en cause la durabilité de la fertilité des sols.

L'objectif de cette étude est de caractériser au niveau de l'exploitation les stocks et les flux de biomasses et de nutriments (le carbone (C) et les teneurs en macronutriments : azote (N), phosphore (P), calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), potassium ( $\text{K}^+$ ), soufre ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et chlorure ( $\text{Cl}^-$ ), afin d'aboutir à un bilan minéral à l'échelle de l'exploitation. Nous cherchons à analyser si certaines pratiques d'intégration agriculture-élevage créent des systèmes plus productifs et plus durables.

L'évaluation des stocks et flux de nutriments à chacune des étapes de transfert au sein de l'exploitation est indispensable pour :

- i) estimer les bilans minéraux, tant au niveau de l'exploitation qu'au niveau de chaque compartiment de l'exploitation. En l'absence d'apports d'éléments fertilisants, les transferts de biomasse et de nutriments entre les différents compartiments des systèmes de production agricole conditionne largement l'évolution temporelle de la fertilité des sols des diverses parcelles des exploitations agricoles (cf. Chapitre 2) ;
- ii) déterminer l'efficacité technique de restitution de nutriments intra-exploitation via l'apport de fumiers.

Pour cette étude, nous avons donc sélectionné quatre exploitations représentatives des exploitations du Vakinankaratra. Dans un premier temps, nous avons collecté et analysé diverses biomasses issues du système agricole ou du système d'élevage de ces exploitations. A partir des mesures de masse et des analyses élémentaires de ces composants, nous avons calculé des flux de biomasse et de nutriments, puis des bilans à l'échelle des exploitations et entre les deux compartiments agriculture et élevage.

## **3.2. Méthodologie**

### **3.2.1. Typologie des exploitations mixtes d'agriculture-élevage de la région Vakinankaratra**

L'étude de Randrantoarimbola (2015), un étudiant de Master 2 du projet BIOVA, via des enquêtes auprès des agriculteurs de la région du Vakinankaratra a révélé les spécificités globales des ménages, ce qui a permis de proposer une typologie des exploitations de la région. Cette étude typologique, menée sur 119 exploitations réparties dans les différentes

communes et districts de la région, a révélé l'existence de six types d'exploitations distincts par leurs pratiques d'élevage, de cultures, et/ou leur structure.

Les principales caractéristiques des six groupes (Tableau 3-1) sont les suivantes :

- **Groupe 1 - Eleveurs de bovin de trait à faible surface agricole** (n=16 ; 13,4 %) : c'est le groupe des exploitations où sont concentrées les familles nombreuses. La plupart des ménages ne possède pas de bovins laitiers. Les ménages disposent en moyenne de deux bovins de traits. Dans ce groupe les cultures fourragères sont presque absentes.

- **Groupe 2 - Agro-éleveurs à surface faible, élevant des bovins de traits et laitiers** (n=27 ; 22,7 %) : il rassemble le plus grand effectif de ménages avec 27 exploitations. Ce groupe détient en moyenne un bovin laitier et un bovin de trait, mais les surfaces cultivées sont assez faibles (0,6 ha en moyenne). La plupart de ces exploitations ne pratique aucune culture fourragère et laisse pâturer les animaux sur les *tanety*.

- **Groupe 3 - Exploitants à surface assez élevée, élevant des bovins de traits et laitiers** (n=16 ; 13,4 %) : ce groupe réunit des exploitations agricoles qui possèdent en moyenne deux vaches laitières et un bovin de trait. Ils cultivent des surfaces assez grandes, d'une moyenne de 1,5 ha. Ces exploitants font pâturer les animaux sur les *tanety*.

- **Groupe 4 - Agro-éleveurs à faible surface et faible nombre de bovins** (n=25 ; 21,0 %) : le groupe est constitué, pour la plupart, de familles qui possèdent en moyenne un seul bovin laitier. La majorité des exploitants ne détient pas de bovin de trait. Les surfaces cultivées sont les plus faibles (souvent inférieure à 0,5 ha).

- **Groupe 5 - Petits éleveurs laitiers à faible surface agricole utilisant les races améliorées** (n=14 ; 11,8 %) : ce sont les petits exploitants laitiers qui possèdent en moyenne deux bovins laitiers. Ils utilisent des races améliorées et pratiquent diverses cultures fourragères pour alimenter les bovins à l'auge. La surface cultivée est relativement faible (0,5 ha en moyenne).

- **Groupe 6 - Grands éleveurs laitiers avec surfaces agricoles importantes** (n=21 ; 17,6 %) : ce groupe est caractérisé par l'intensification de la production laitière. En moyenne les familles possèdent neuf vaches laitières. La traction animale est aussi très utilisée car en moyenne les exploitations possèdent 1,6 bovin de trait. La plupart de ces ménages ont recours à des salariés permanents. Les surfaces cultivées sont aussi les plus importantes car les familles cultivent en général plus de 3 ha.

**Tableau 3-1** : Synthèse des caractéristiques des six groupes.

	<b>Surface agricole</b>	<b>Vache laitière moyenne</b>	<b>Bovin de trait</b>	<b>Cultures fourragères</b>
<b>Groupe 1</b> Éleveurs bovins de traits à faible surface	Faible	0	2	Non
<b>Groupe 2</b> Agro-éleveurs à surface faible élevant en même temps des bovins de traits et laitiers	Faible (60 ares)	1	1	Non
<b>Groupe 3</b> Exploitants à surface assez élevée et élevant en même temps des bovins de traits et laitiers	Moyenne (150 ares)	2	1	Non
<b>Groupe 4</b> Agro-éleveurs à faible surface et faible nombre de bovins	Faible (< 50 ares)	1	0	Non
<b>Groupe 5</b> Petits éleveurs laitiers à faible surface agricole utilisant des races améliorées	Faible (50 ares)	2		Oui
<b>Groupe 6</b> Grands éleveurs laitiers avec surfaces agricoles importantes	Importante (> 300 ares)	9	2	Oui

### 3.2.2. Identification et choix des exploitations étudiées

Parmi la large diversité de situations observée à travers l'étude typologique, nous avons choisi d'étudier des exploitations présentant une forte « **Intensification laitière** », c'est à dire des exploitations où les cultures fourragères sont présentes, et où la production laitière est importante. Il s'agit donc (Tableau 3-2 ; Figure 3-1) :

- de deux exploitations du **groupe 6**, qui ont un nombre assez important de vaches laitières (supérieur à 5) et des surfaces agricoles, notamment fourragères, importantes. Ce groupe correspond aux « grands éleveurs laitiers » de la région ;
- de deux exploitations du **groupe 5**, qui ont un nombre de vaches réduit, mais qui présentent des signes d'intensification fourragère. Ce sont les « petits éleveurs laitiers ».

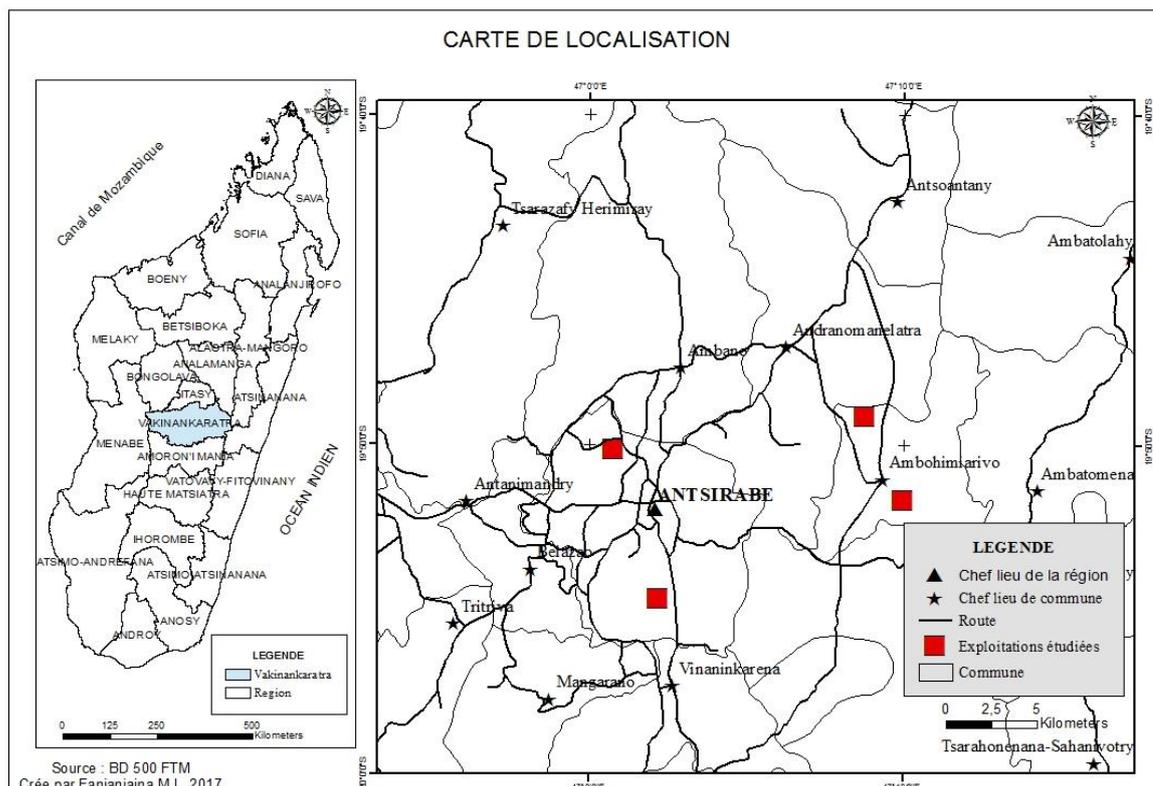
Ensuite, divers critères pratiques ont été retenus pour la sélection des exploitations d'agriculture-élevage préalablement enquêtées par Randrantoarimbola (2015) et déjà suivies par le FIFAMANOR, un centre d'appui agricole pour les paysans de la région : (i) la localisation géographique et l'accessibilité ; (ii) la motivation et l'ouverture d'esprit pour accepter de participer à notre étude ; (iii) quelques critères techniques comme l'existence de cultures fourragères de contre-saison ou l'effectif de bovins. Les quatre exploitations sélectionnées sont décrites dans le Tableau 3-2.

**Tableau 3-2 : Principales caractéristiques des quatre exploitations de l'étude.**

	<b>Communes</b>	<b>Activité principale</b>	<b>Activités secondaires</b>	<b>Surface Agricole Totale (ha)</b>	<b>Nombre vache laitière</b>	<b>Organisation paysannes (OP)</b>	<b>Intérêts des exploitations dans OP</b>
<b>Exploitations du Groupe 6</b>							
Exploitation 1	Andrano-manelatra	Agriculteur	Aucun	13,00	15	ROVA <sup>6</sup> /MDB <sup>7</sup>	Formation, Récolte du lait et Marché/ Matériels agricole
Exploitation 2	Antsenakely	Agriculteur	Aucun (retraité)	3,00	4	ROVA	Marché Lait
<b>Exploitations du Groupe 5</b>							
Exploitation3	Mandairesaka	Agriculteur	Employé par la mairie et fokontany	1,35	1	MDB	Matériel (concernant le lait)/Protection, Formation
Exploitation 4	Antsirabe I	Employé par la mairie et le fokontany	Agriculteur	1,22	2		

<sup>6</sup> ROVA : organisation des producteurs de laits de Vakinankaratra, qui collecte et commercialise le lait des producteurs

<sup>7</sup> MDB : Malagasy Dairy Board



**Figure 3-1 :** Localisation des quatre exploitations étudiées.

### 3.2.3. Collecte des données

Différentes approches ont été adoptées pour acquérir le maximum d'information afin de caractériser les flux des biomasses au sein de chaque exploitation :

- *Enquêtes/entretiens directs sur le terrain* : il s'agit d'entretiens semi-directifs à l'aide d'un questionnaire auprès des agriculteurs. Pour quantifier chacun des flux, il a été indispensable de détailler les pratiques de chaque exploitation : intrants utilisés, valorisation de résidus de culture, déjections animales, produits exportés etc. Pour améliorer la qualité des informations, nous avons également effectué des recoupements d'informations qui ont permis d'enrichir et d'améliorer la qualité des données recueillies et de consolider les résultats obtenus.
- *Mesures directes* : les enquêtes ont été complétées par des suivis mensuels des exploitations (d'août 2015 à juillet 2016) pour quantifier les flux de résidus de culture, les déjections animales et le niveau des productions (productions agricoles à la récolte, productions fourragères, production de fumures organiques). Pour chacune des

exploitations retenues, les passages sur les exploitations ont été de durée variable en fonction de la complexité des combinaisons d'activités et de la disponibilité des paysans.

- Afin de quantifier les flux de nutriments, les mesures directes et enquêtes ont été ensuite complétées par des *analyses au laboratoire* et des estimations à partir de la littérature, suivant la nature des flux. Il a ensuite été nécessaire de calculer les flux pour une période de référence, l'année dans notre cas, correspondant au cycle moyen de production.

Les enquêtes et les suivis en exploitation ont permis d'apporter des connaissances fines sur : (i) la structure des exploitations ; (ii) l'historique des exploitations ; (iii) le fonctionnement des exploitations et leurs pratiques ; (iv) les conséquences de ces pratiques en termes de flux de biomasses. Un canevas détaillant : les différentes activités, les mesures de biomasses et les mesures de la minéralomasse pour chaque système d'agriculture et d'élevage de chaque exploitant, les protocoles de prélèvement a été élaboré (Tableau 3-3).

**Tableau 3-3** : Synthèse des différentes mesures et activités effectuées.

Compartiments	Désignation	Mesures directes	Données collectées	Types d'échantillons prélevés
<b>Famille</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Composition de la famille</li> <li>- Activités permanentes et secondaires</li> <li>- Appartenance à des organisations paysannes</li> </ul>	
<b>Agriculture</b>	<b>Riz, fourrages maïs, autres cultures annuelles</b>	<b>Rendement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Surface totale de l'exploitation et type du sol (tanety, bas-fond)</li> <li>- Cultures (types de cultures, par type de sol, surfaces par cultures)</li> <li>- Productivité agricole (estimation des rendements, quantités vendues et autoconsommées)</li> <li>- Nature et quantité des intrants</li> </ul>	<b>Riz, fourrages, autres plantes</b>
<b>Elevage</b>	<b>Structure</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Effectifs des bovins par race, sexe, stade physiologique</li> <li>- Effectifs des autres animaux (volailles et porcs)</li> <li>- Variation des stocks d'animaux (achats et ventes) depuis 12 mois</li> </ul>	
	<b>Alimentation</b>	<b>Quantité d'aliments ingérés</b>	Système d'alimentation de l'exploitation : cultures fourragères, résidus de culture, concentrés, résidus, herbes sauvages	<b>Résidus, herbes, fourrages, compléments</b>
	<b>Production animale</b>	<b>Production laitière</b>	- Quantité produite au sein de l'exploitation, vendue, autoconsommée	
		<b>Production de viande</b>	- Quantité de viande qui sort de l'exploitation (viande vendue, animal vendu...), sur une base mensuelle et annuelle, etc.	
		<b>Œufs</b>	- Production journalière / base de la production annuelle ; destination des produits	
<b>Collecte et gestion des biomasses</b>	<b>Effluents d'élevage</b>	<b>Quantité de lisier produit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gestion des effluents</li> <li>- Quantité du lisier collectée tous les jours</li> </ul>	<b>lisier</b>
	<b>Fumiers</b>	<b>Evolution du fumier</b>	- Fumier produit / vendu / acheté Evolution du fumier en fonction des stades : avant stockage, durant le stockage, avant épandage.	<b>Fumier</b> : avant stockage, durant le stockage, avant sorti étable

### 3.2.4. Prélèvements d'échantillons et mesures de biomasses

La méthode directe, dite destructive, a été utilisée pour la mesure des biomasses aériennes (riz, fourrage). Elle consiste à faucher les plantes dans une surface de 0,5 x 0,5 m (Razafindramanana, 2011), avec deux à trois points par parcelle, à l'aide d'un cadre métallique placé au hasard dans la parcelle (Figure 3-2). Dans le cas du riz, les grains et les pailles ont été prélevés séparément. Les divers prélèvements réalisés sur une parcelle sont regroupés pour faire un échantillon composite. Le rendement en grain et en biomasse du riz et des fourrages ont été mesurés (Figure 3-3). Le poids sec a été obtenu après le passage des échantillons de grain et de biomasse prélevés à l'étuve, à 60°C pendant 48 heures. Les résultats ont été convertis en kg de matière sèche par hectare. Des sous-échantillons ont ensuite été broyés avec un moulin électrique à une taille d'environ 0,2mm pour être analysés.



**Figure 3-2 :** Prélèvement de biomasses **Figure 3-3 :** Mesure des biomasses fraîches aériennes.

La quantification de l'alimentation animale et la production du fumier (fourrages distribués, fumier épandu, etc.) s'est avérée souvent difficile 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 (par exemple, peser une charrette de fumier, un sac de *bozaka*, etc.) ou procéder à des mesures réelles, directement à la ferme.

Pour le fumier, trois types d'échantillons à différents stades ont été prélevés à chaque visite d'exploitation et ceci pour chaque exploitation : fumiers avant stockage (c'est-à-dire des effluents d'élevage fraîchement produits et mélangés avec des résidus), durant le stockage, avant épandage. Ces collectes successives de fumiers ont été réalisées afin de mieux caractériser leur hétérogénéité étant donné que la composition des engrais de ferme évolue au cours du temps. Pour que l'échantillonnage soit représentatif, des échantillons élémentaires ont été prélevés, à l'aide d'une pelle sur toute l'épaisseur du tas de fumier et mélangés dans un seau. Les produits prélevés ont été conservés dans un sac plastique et ramenés au laboratoire pour les analyses de référence. Des aliquotes des diverses biomasses animales ont aussi été récupérés pour déterminer les masses sèches au laboratoire et réaliser les analyses dans les mêmes conditions que précédemment.

Dans le calcul du bilan, les teneurs en C et nutriments de certaines ressources tels que les laits, viandes ont été estimées à partir de la littérature, du fait de l'absence de moyens d'effectuer leurs caractérisations (Tableau 3-4).

**Tableau 3-4** : Composition du lait, viandes utilisés dans le calcul.

	Unités	Teneur	Références
<b>Lait</b>			
C	%	7,2	Wikipédia.com
N	mg l <sup>-1</sup>	5500	Yyengar, 1982
P	mg l <sup>-1</sup>	1000	
Ca	mg l <sup>-1</sup>	1200	
Mg	mg l <sup>-1</sup>	120	
K	mg l <sup>-1</sup>	1000	
<b>Viande bovine</b>			
C	%	16	Gourlez et al., 2006
N	g 100 g <sup>-1</sup>	3,68	<a href="https://www.yazio.com/fr/aliments/viande-doriginal-crue.html">https://www.yazio.com/fr/aliments/viande-doriginal-crue.html</a>
P	mg 100 g <sup>-1</sup>	158	
Ca	mg 100 g <sup>-1</sup>	5,0	
Mg	mg 100 g <sup>-1</sup>	23	
K	mg 100 g <sup>-1</sup>	317	
<b>Viande Volailles</b>			
N	g 100 g <sup>-1</sup>	4,1	<a href="https://ndb.nal.usda.gov/ndb/search/list?qlookup=05301">https://ndb.nal.usda.gov/ndb/search/list?qlookup=05301</a>
P	mg 100 g <sup>-1</sup>	132	
Ca	mg 100 g <sup>-1</sup>	138	
Mg	mg 100 g <sup>-1</sup>	12	
K	mg 100 g <sup>-1</sup>	104	
<b>Viande de porc</b>			
N	%	4,02	Vautier, 2006
P	%	0,21	
Ca	mg 100 g <sup>-1</sup>	7,06	
Mg	mg 100 g <sup>-1</sup>	23,6	
K	mg 100 g <sup>-1</sup>	362	

### 3.2.5. Détermination des éléments nutritifs des biomasses

La minéralomasse ou les teneurs minérales des grains et des pailles de riz, des fourrages et d'autres productions agricoles, ainsi que des fumiers (Tableau 3-5), a été analysée afin de déterminer le Carbone et les teneurs en macronutriments : azote (N), phosphore (P), calcium (Ca<sup>2+</sup>), magnésium (Mg<sup>2+</sup>), potassium (K<sup>+</sup>), sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) et chlorure (Cl<sup>-</sup>). Le C et N total ont été déterminés en utilisant un analyseur CHN (Leco, CHN-100 0). Le chlorure a été déterminé par dosage argentimétrique (précipitation AgCl) automatisé à l'aide du titrateur Crison après avoir bouilli la poudre végétale avec de l'eau distillée. Les autres éléments ont été dosés après calcination des échantillons suivie d'une minéralisation des cendres à l'aide d'acide chlorhydrique concentré (HCl). Le P a été dosé par colorimétrie, suite à la formation

d'un complexe phosphomolybdique de couleur bleue en présence de molybdate d'ammonium. Les concentrations de K, Ca et Mg ont été mesurées par absorption atomique. Les sulfates sont dosés par turbidimétrie après précipitation sous forme de sulfate de baryum en milieu acide.

Le potentiel d'acidification, qui correspond à l'alcalinité des plantes ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) est calculé par la différence de charge des cations et des anions minéraux de la biomasse, selon la formule (Noble et al., 1996 ; Noble et Randall, 1999 ), afin de calculer l'alcalinité des cendres (ANC) de chaque type d'échantillons mais également l'ANC de l'exploitation elle-même :

$$\text{Alcalinité des cendres (ANC)} = (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+) - (\text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$$

**Tableau 3-5 :** Nombre d'échantillons de chaque type.

<b>Nombres d'échantillons</b>	
Fumiers	59
Fourrages	80
Autres aliments pour animaux	15
Grains de riz	40
Pailles de riz	32
<b>Total</b>	<b>226</b>

### **3.2.6. Quantification des flux de ressources à l'échelle de l'exploitation et de chaque compartiment**

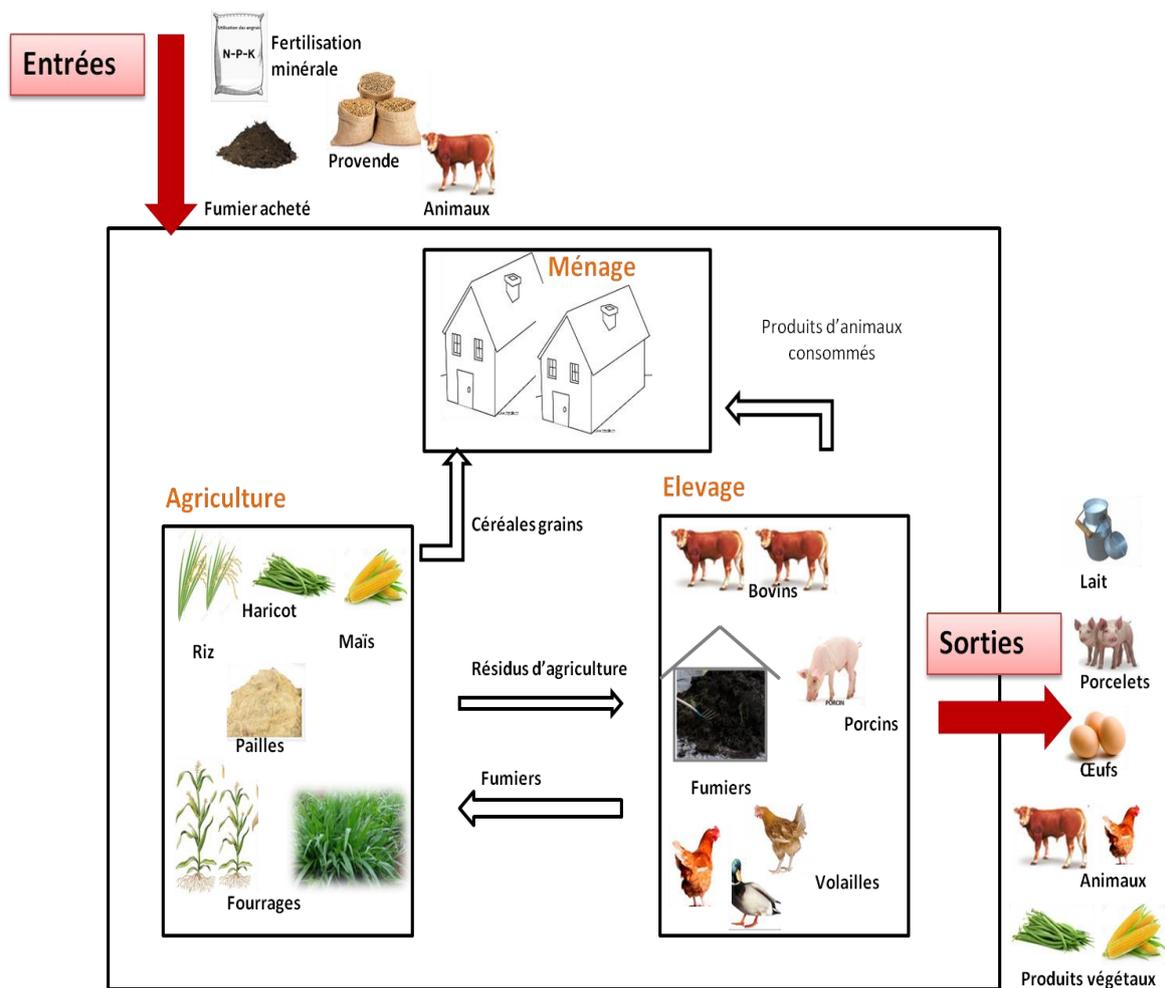
#### **3.2.6.1. Carte des flux de ressources**

Les flux de biomasses et de nutriments à chacune des étapes du cycle (animal, étable, stockage, parcelle, plante, etc.) ont été évalués à partir des mesures (ou des estimations) des biomasses et des analyses chimiques des diverses biomasses. La majorité des valeurs ont été, en effet, mesurées et évaluées directement à la ferme (production de biomasses, aliments pour les animaux) et au laboratoire pour les teneurs en C et nutriments (riz, fourrages, fumiers)

alors que certaines données ont été estimées (teneurs en C et nutriments des viandes, lait, œufs).

Les flux de nutriments sont quantifiés par multiplication des matières sèches avec leurs concentrations.

La synthèse des données collectées lors des travaux d'enquête a permis d'établir les dites « carte des flux de ressources » pour chaque exploitation agricole établie à l'aide un schéma conceptuel des fermes mixtes d'agriculture-élevage (Figure 3-4). Ces cartes de flux représentent l'ensemble de la structure et du fonctionnement des exploitations agricoles. L'exploitation a été subdivisée en trois sous-systèmes : l'agriculture, l'élevage et le ménage. Les flèches présentent les différents transferts entre les compartiments.



**Figure 3-4 :** Schéma conceptuel des fermes mixtes d'agriculture-élevage.

### 3.2.6.2. Méthode du bilan apparent

Le bilan est défini comme étant la différence entre les sorties et les entrées au niveau de la ferme, qui représente la perte ou le gain en carbone ou nutriments (Stoorvogel and Smaling, 1990 ; Kobayashi, 2010). Il est positif quand les sorties sont inférieures aux entrées et vice-versa. Elle n'intègre ni les entrées par les dépôts atmosphériques, ni les sorties par volatilisation, dénitrification et lixiviation, d'où le qualificatif de bilan « **apparent** » (Simon et al., 2000). Ce bilan est dressé pour une année agricole donnée. Les informations nécessaires à ce calcul sont recueillies par enquête auprès des agriculteurs et se réfèrent à l'année agricole précédant l'enquête.

$$\begin{array}{l} \text{Bilan} \\ (\text{kg ferme}^{-1} \text{ an}^{-1}) \end{array} = \begin{array}{l} \sum \text{Entrées} \\ (\text{kg ferme}^{-1} \text{ an}^{-1}) \end{array} - \begin{array}{l} \sum \text{Sorties} \\ (\text{kg ferme}^{-1} \text{ an}^{-1}) \end{array}$$

Dans cette étude, les entrées (IN) en nutriments sont estimées à partir des achats d'engrais minéraux (ENG), des déjections animales provenant d'exploitations voisines (FUM), des aliments du bétail achetés (ALI), des entrées en animal (ANI), d'entrées diverses comme les achats de paille, fourrages, son de riz, etc. (AUTR).

$$\text{IN (kg ferme}^{-1} \text{ an}^{-1}) = \text{ENG} + \text{FUM} + \text{ALI} + \text{ANI} + \text{AUTR}$$

De la même façon, les sorties (OUT) sont estimées à partir des produits végétaux (VEG) et animaux vendus (lait (LAI), viande (VIA) et œufs(OEU)), des déjections animales vendues à des tiers ou sortant de l'exploitation (FUMV) :

$$\text{OUT (kg ferme}^{-1} \text{ an}^{-1}) = \text{VEG} + \text{LAI} + \text{VIA} + \text{OEU} + \text{FUMV}$$

Le sol a été considéré comme une boîte noire et les flux de ressources internes au niveau du sol n'ont pas été pris en compte dans les calculs. Deux types de bilan ont été calculé : (i) un bilan global au niveau de la ferme mixte d'agriculture-élevage, comparant les entrées et les sorties de nutriments de l'exploitation ; (ii) un bilan partiel au niveau des compartiments agriculture et l'élevage, pour évaluer les transferts de nutriments entre ces deux compartiments au sein de l'exploitation.

La méthode du bilan permet de déterminer la quantité de matières organiques (C, N) ou nutriments (P, Ca, Mg, K) excédentaires qui restent sur l'exploitation ainsi que l'ANC des ressources de l'exploitation et de préciser l'importance relative des différents flux conduisant

à ce surplus/déficit. Elle permet, également, de préciser les indicateurs de fonctionnement pour une exploitation agricole donnée et d'affiner l'analyse du degré d'utilisation effective des nutriments d'un élément donné par chaque composante qui se définit par le ratio entre les sorties et les entrées engendrées par le système de production considéré (Kobayashi et al., 2010).

### 3.3. Résultats

#### 3.3.1. Caractérisation des exploitations agricoles

##### 3.3.1.1. Caractérisation socio-économique

Les exploitations ont été qualifiées de « *grande* » ou « *petite* » exploitation selon leur structure (Tableau 3-6). L'Exploitation 1 possède les plus grandes surfaces cultivées. Elle est alors qualifiée de « grande exploitation ». Les Exploitations 3 et 4 présentent, par contre, les plus petites surfaces cultivées, le plus petit troupeau de bovin, peu de matériel agricole et de faibles superficies allouées aux cultures fourragères. Elles sont alors qualifiées de « petite exploitation » (Groupe 5 de la typologie). L'exploitation 2 possède, par contre, des troupeaux et des surfaces cultivables de tailles intermédiaires, avec d'importants matériels agricoles, comparé aux deux exploitations de taille petite, ce qui permet quand même de la classer en tant que « grande exploitation » (Groupe 6 de la typologie).

**Tableau 3-6 :** Structure des quatre exploitations d'agriculture-élevage sélectionnées.

Structure		Exploitation 1	Exploitation 2	Exploitation 3	Exploitation 4
<b>Taille de l'exploitation</b>		Grande	Grande	Petite	Petite
<b>Ménage</b>					
Membres de la famille	nombre de personnes	4	2	4	4
Nombre d'Actif <sup>8</sup>	nombre de personnes	4	2	4	4
<b>Surfaces</b>					
Surface Agricole (SAU)	ha	12	2,5	0,8	1,0
Surface riz irrigué	ha	0,6	0,9	0,1	0,2
Riz pluvial	ha	7,6	0,1	0,1	0,1
Cultures fourragères	ha	2,0	1,3	0,1	0,1

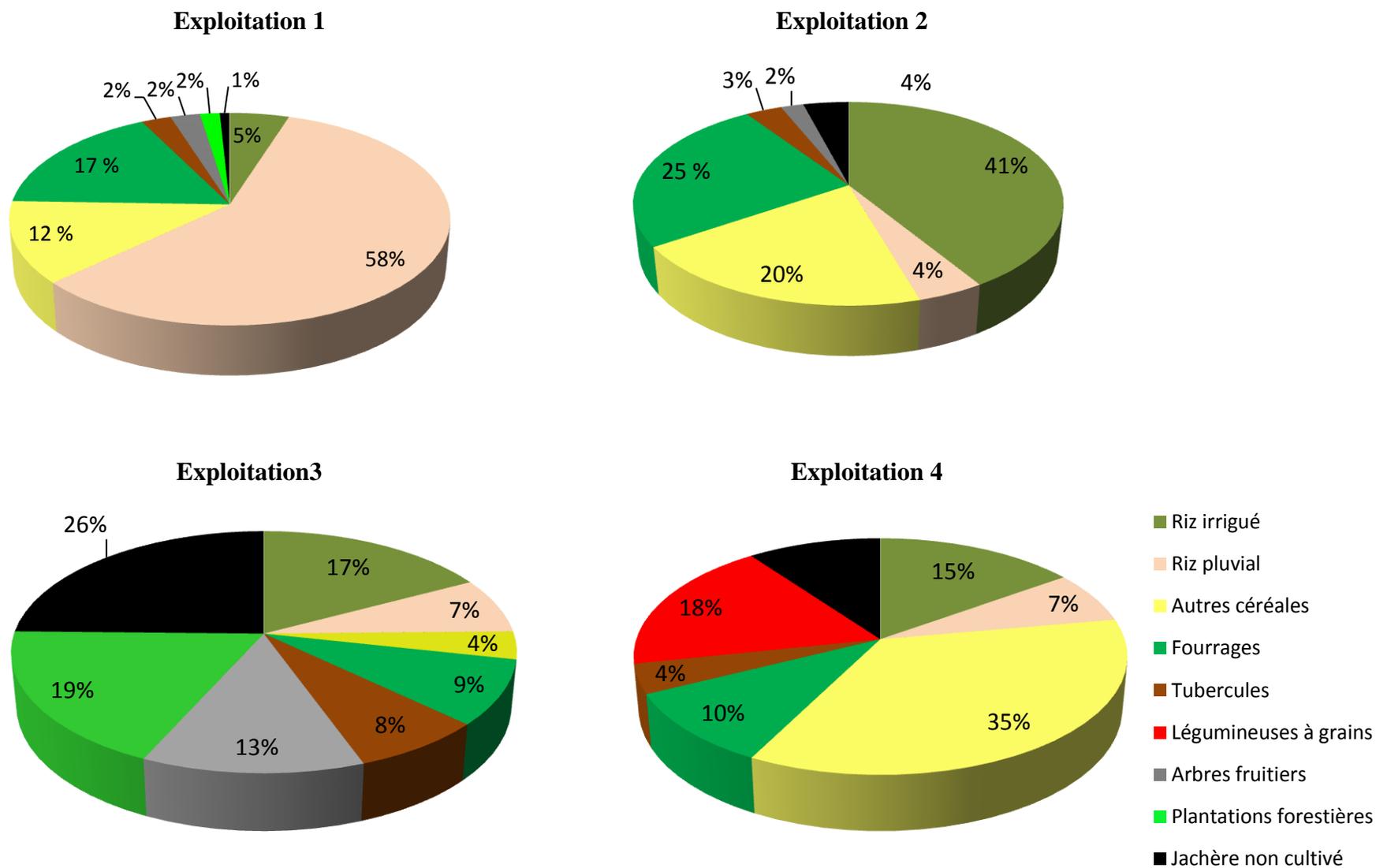
<sup>8</sup> Les enfants sont déjà assez grands et peuvent travailler sur l'exploitation avec leurs parents.

### 3.3.1.2. Les productions agricoles des exploitations

Les quatre exploitations étudiées diversifient toutes leurs cultures, points communs des exploitations de la région Vakinankaratra. Elles présentent des traits indiquant une certaine spécialisation vers l'élevage bovin laitier mais offrent des profils très variés en termes de pratiques. Il existe, en effet, dans la région une proportion non négligeable de producteurs possédant quelques vaches mais qui ne cultivent pas de fourrages et nourrissent les animaux par divagation, résidus de cultures et achats de ressources extérieures. Tous les producteurs étudiés cultivent des cultures fourragères avec une proportion assez différente en fonction de leur caractéristique (Figure 3-5). D'une manière générale, l'intensification des cultures fourragères est surtout pratiquée et développée par les exploitations de grande taille.

L'exploitation 1 fait partie des grands éleveurs laitiers de la région avec des surfaces agricoles importantes (SAU=12 ha). Environ 17 % de ses terres sont utilisées, pour partie, pour des cultures fourragères et pour l'alimentation des vaches laitières. Elle présente ainsi un niveau d'intensification poussée visant à se spécialiser principalement dans la production de lait. L'exploitation 2 présente, elle aussi, une intensification assez importante vers la production laitière car 52 % de sa superficie cultivable est destinée aux cultures fourragères, avec une dominance de culture de graminées fourragères (*Pennisetum* et raygrass), associé à la culture de maïs fourrager en contre saison du riz irrigué.

Les exploitations 3 et 4 font partie des petits éleveurs laitiers à faible surface agricole mais qui pratiquent des cultures fourragères, avec 9 % et 10 % de la SAU, respectivement. Cela montre que ces exploitants essaient d'intensifier leurs activités agricoles, malgré les contraintes liées à une faible surface agricole disponible et avec une production majoritairement orientée pour l'autoconsommation.



**Figure 3-5 :** Assolement de chaque exploitation.

### 3.3.1.3. Les productions animales des exploitations

Le tableau 3-7 ci-après présente la structure de l'élevage des quatre exploitations étudiées. L'exploitation 1 présente le nombre de vache laitière le plus important (15) avec un nombre de bœuf élevé par rapport à l'exploitation 2. L'exploitation 2 possède quatre vaches laitières contre 2 bœufs de traits. Les deux petites exploitations sont caractérisées par l'absence de bœufs de traits et un nombre très limité en vache laitière (1 à 2 seulement).

Toutes exploitations confondues, le chargement varie entre 2,5 à 3,0 UGB herbivore ha<sup>-1</sup> par ha de surface agricole utile (SAU).

**Tableau 3-7 :** Structure de l'élevage des quatre exploitations d'agriculture-élevage sélectionnées.

Structure	Exploitation	Exploitation	Exploitation	Exploitation
	1	2	3	4
Taille de l'exploitation	Grande	Grande	Petite	Petite
<b>Nombres d'animaux</b>				
Taureau	1			
Vaches laitières	15	4	1	2
Génisses laitières 2-4ans	10	2	1	1
Bœufs de traits	6	2		
Veaux	6	1		
Volailles	135	119	31	26
Porcs	20	4	0	2

### **3.3.2. Les flux de biomasses et nutriments dans les exploitations**

#### **3.3.2.1. Caractérisation chimique des biomasses**

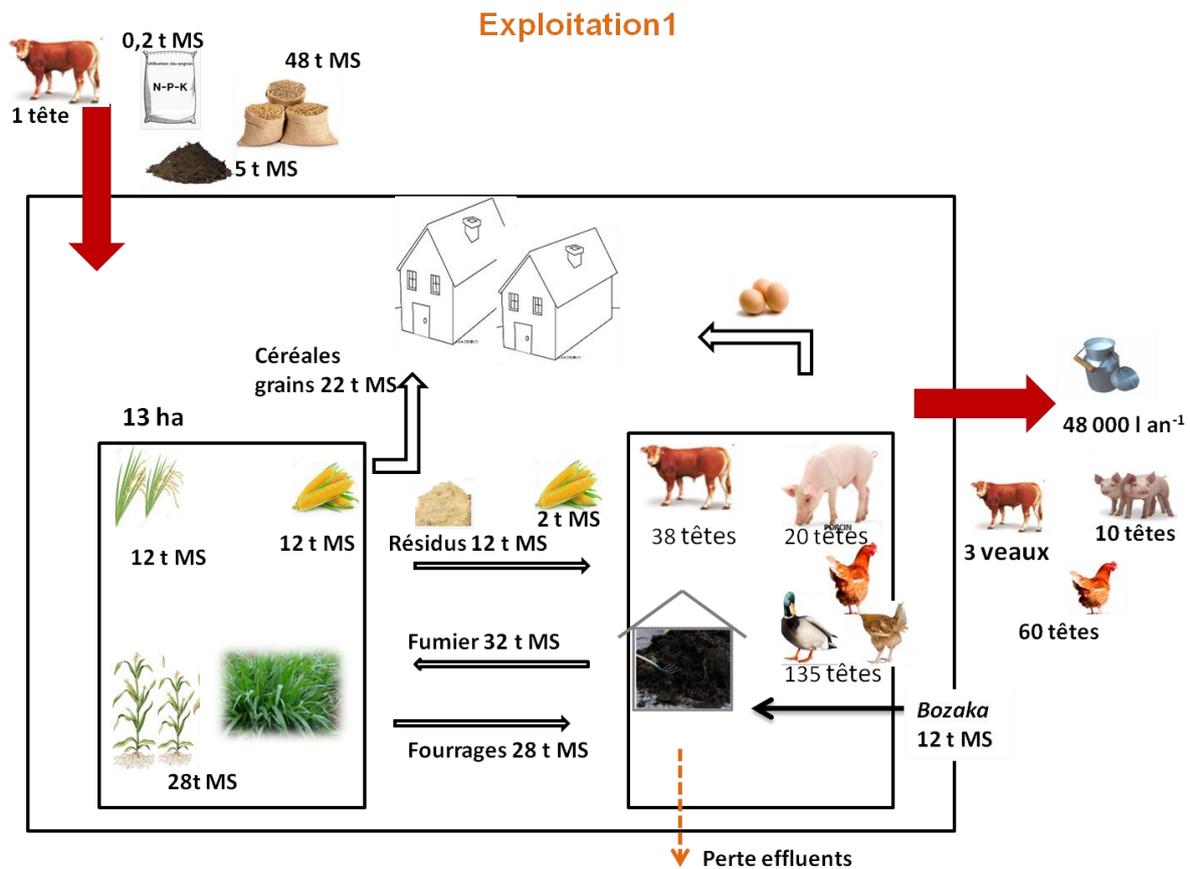
Les teneurs en C et N et nutriments (P, K, Ca, Mg, S, Cl) des matières organiques, ainsi que l'ANC des différentes biomasses végétales et animales, pour chaque exploitation, sont regroupées dans le tableau 3-8. Les résultats d'analyses ont montré une forte hétérogénéité des teneurs en éléments de chaque type d'échantillons, quel que soit l'élément donné.

**Tableau 3-8** : Caractérisation chimique des biomasses des exploitations étudiées.

	<b>C</b> (g kg <sup>-1</sup> )	<b>N</b> (g kg <sup>-1</sup> )	<b>P</b> (g kg <sup>-1</sup> )	<b>Mg</b> (g kg <sup>-1</sup> )	<b>Ca</b> (g kg <sup>-1</sup> )	<b>K</b> (g kg <sup>-1</sup> )	<b>S</b> (g kg <sup>-1</sup> )	<b>Cl</b> (g kg <sup>-1</sup> )	<b>ANC</b> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )
<b>Exploitation 1</b>									
Grains	413,7 ± 12,9	10,0 ± 0,5	1,3 ± 0,5	1,0 ± 0,9	0,6 ± 0,4	2,5 ± 1,4	0,3 ± 1,3	0,7 ± 1,3	5,6 ± 10,1
Paille	386,0 ± 22,3	7,1 ± 2,1	0,7 ± 2,1	0,8 ± 0,2	2,3 ± 0,9	9,6 ± 4,6	0,7 ± 4,6	2,5 ± 4,6	26,1 ± 4,6
Fourrage	414,4 ± 16,8	17,1 ± 9,3	1,9 ± 1,0	1,9 ± 4,1	2,9 ± 4,1	22,2 ± 11,2	1,4 ± 0,6	2,6 ± 2,4	58,8 ± 29,4
Fumier	350,7 ± 55,2	18,7 ± 2,4	4,4 ± 3,0	2,8 ± 4,1	8,6 ± 4,1	10,1 ± 11,2	1,5 ± 0,6	1,3 ± 1,4	50,9 ± 19,8
Aliments pour animaux	386,8 ± 93,9	11,6 ± 2,4	3,1 ± 2,4	1,7 ± 1,0	6,2 ± 6,9	6,7 ± 4,7	0,5 ± 0,2	2,7 ± 0,5	31,2 ± 1,0
<b>Exploitation 2</b>									
Grains	407,9 ± 22,4	9,4 ± 3,3	1,4 ± 0,5	1,2 ± 0,6	1,0 ± 0,9	4,2 ± 2,1	0,4 ± 0,4	1,2 ± 1,4	10,7 ± 9,5
Paille	357,9 ± 159,2	7,0 ± 4,4	1,1 ± 0,4	1,8 ± 0,3	3,1 ± 1,7	12,8 ± 8,7	0,9 ± 0,4	2,5 ± 1,4	43,8 ± 26,2
Fourrage	410,3 ± 20,3	21,9 ± 16,5	2,8 ± 1,4	3,5 ± 1,4	4,1 ± 1,5	20,8 ± 16,4	1,9 ± 0,5	2,5 ± 1,8	65,9 ± 37,9
Fumier	327,6 ± 56,1	18,4 ± 2,9	5,7 ± 1,3	4,7 ± 1,8	9,6 ± 3,6	14,1 ± 9,7	1,8 ± 0,5	1 ± 0,7	72,4 ± 36,9
Aliments pour animaux	407,8 ± 49,5	22,2 ± 16,1	5,3 ± 1,7	2,6 ± 1,0	4,7 ± 3,3	4,9 ± 3,4	0,3 ± 0,2	1,6 ± 1,1	16,3 ± 19,5
<b>Exploitation 3</b>									
Grains	415,9 ± 11,8	10,1 ± 1,4	1,1 ± 0,6	1,3 ± 1,4	0,7 ± 0,6	2,5 ± 0,8	0,2 ± 0,11	0,6 ± 0,5	9,9 ± 14,3
Paille	409,9 ± 20,8	5,7 ± 0,8	0,8 ± 0,6	1,2 ± 0,4	1,8 ± 0,8	5,1 ± 1,2	1,0 ± 0,5	2,6 ± 2,0	13,3 ± 13,5
Fourrage	394,9 ± 39,0	16,5 ± 8,5	1,7 ± 0,8	2,5 ± 1,3	5,7 ± 5,2	20,3 ± 12,8	1,6 ± 1,0	2,9 ± 2,6	71,9 ± 47,9
Fumier	303,5 ± 82,9	18,2 ± 7,0	3,9 ± 1,7	3,5 ± 1,2	8,8 ± 2,8	9,7 ± 6,8	1,6 ± 0,4	0,9 ± 0,6	59,6 ± 32,2
<b>Exploitation 4</b>									
Fourrage	392,9 ± 13,9	27,4 ± 10,6	2,7 ± 1,0	3,6 ± 1,6	7,7 ± 1,6	28,9 ± 13,7	1,8 ± 0,9	2,2 ± 2,1	107,5 ± 52,5
Fumier	294,7 ± 13,9	17,0 ± 7,0	4,2 ± 2,2	4,9 ± 3,0	10,1 ± 5,1	11,9 ± 8,6	1,4 ± 0,4	0,7 ± 43,9	82,9 ± 43,9
Grains	410,9 ± 13,9	9,6 ± 2,1	1,8 ± 0,4	1,1 ± 0,4	1,0 ± 1,1	3,7 ± 3,3	0,2 ± 3,3	0,5 ± 3,3	9,3 ± 16,2
Paille	397,3 ± 15,5	5,8 ± 1,5	0,9 ± 0,6	1,6 ± 0,2	2,7 ± 0,2	7,8 ± 0,2	0,9 ± 0,2	3,3 ± 0,2	26,0 ± 7,7

### 3.3.2.2. Flux de biomasses

Les enquêtes et suivis ont fourni des informations précises sur les pratiques et le fonctionnement général des quatre exploitations qui ont permis de quantifier les flux des biomasses au sein des exploitations. Ci-dessous 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, pour chacune des exploitations (Figures 3-6, 3-7, 3-8 et 3-9).



**Figure 3-6 :** Carte des flux de ressources des « Grands éleveurs laitiers » - Exploitation 1.

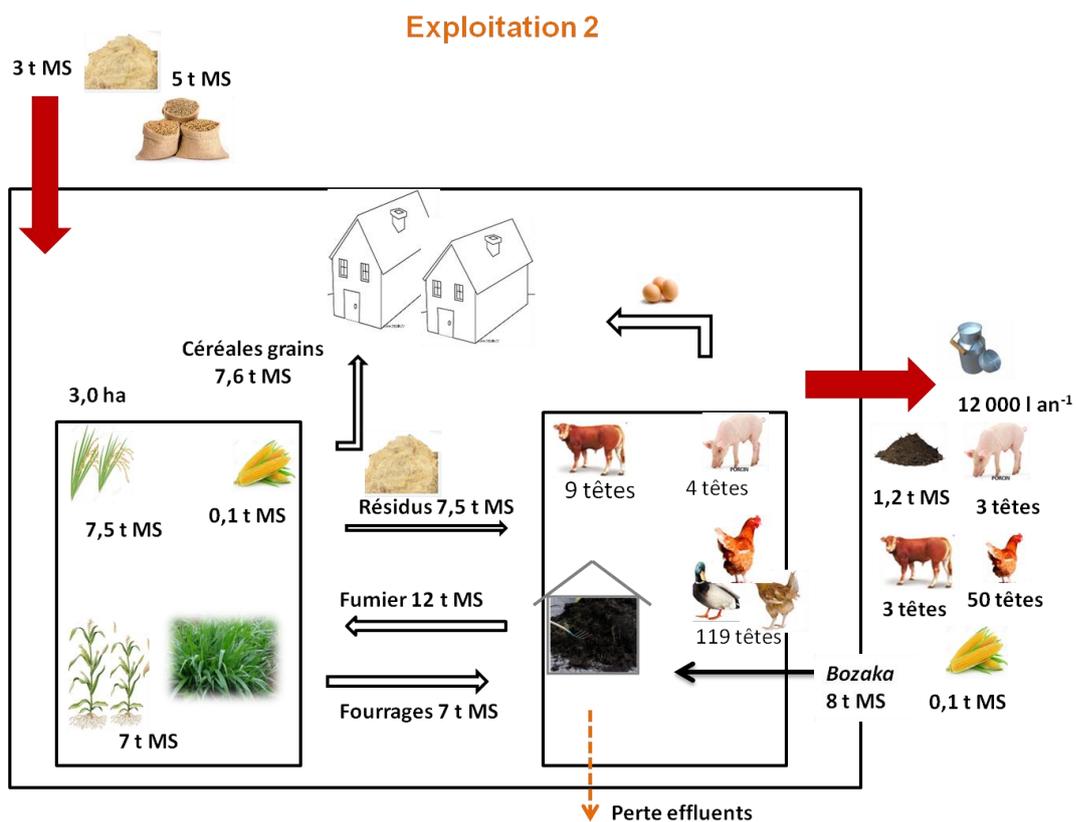


Figure 3- 7 : Carte des flux de ressources des « Grands éleveurs laitiers » - Exploitation 2.

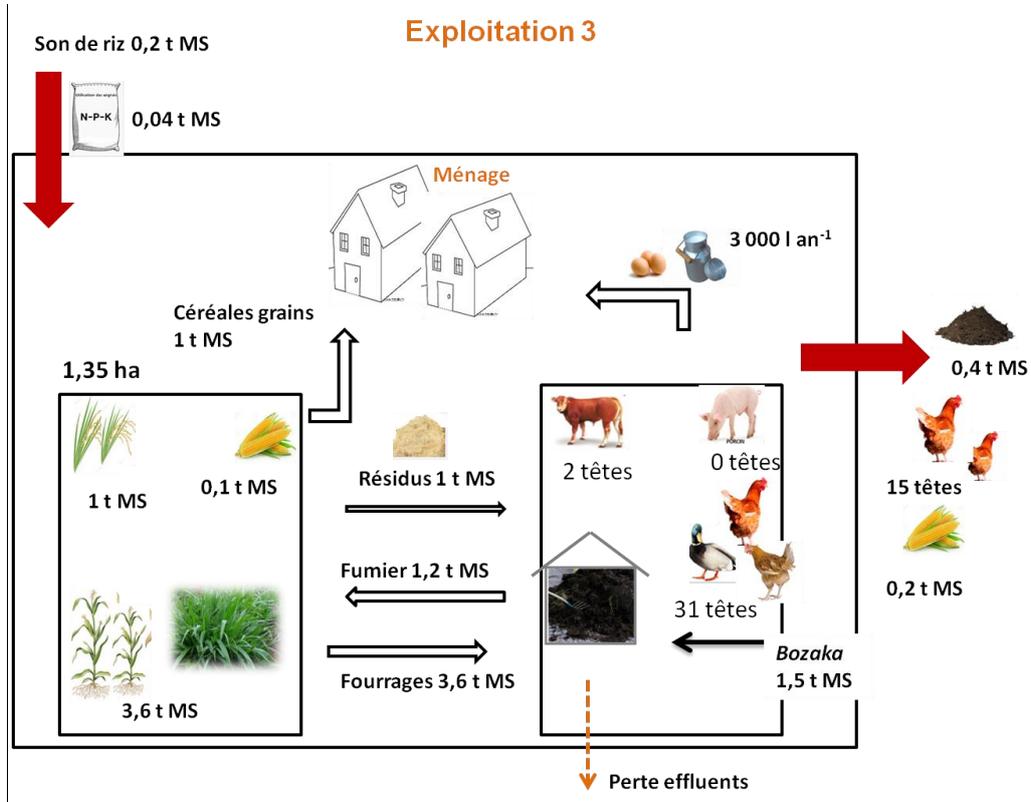
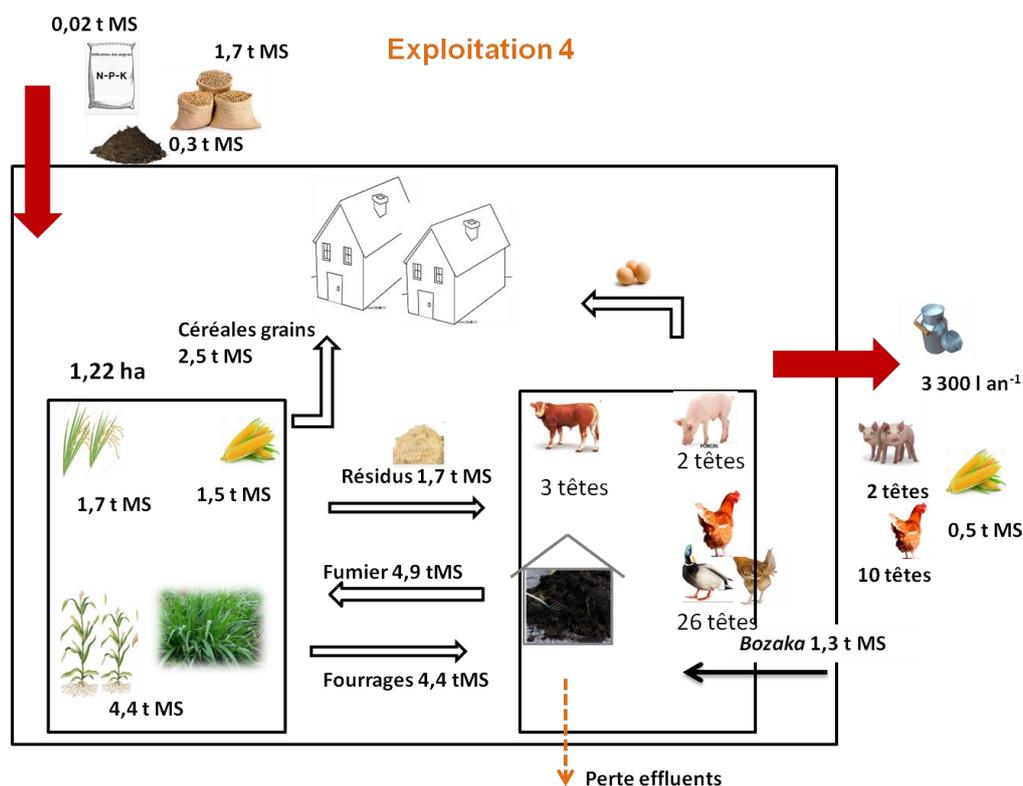


Figure 3- 8 : Carte des flux de ressources des « Petits éleveurs laitiers » - Exploitation 3.



**Figure 3-9 :** Carte des flux de ressources des « Petits éleveurs laitiers » - Exploitation 4.

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. 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.

Les pratiques d'alimentation des élevages au sein des 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. Dans les cas d'études : alimentation à base d'herbes naturelles (*bozaka*) consommés à l'extérieur de l'exploitation lors du pâturage et de pailles de riz.

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 (48 t MS de concentrés). Cette exploitation est, ainsi, la seule qui a une entrée en intrants très importante.

Pour l'exploitation 1 et 2, bien qu'ils sont tous les deux qualifiés de « Grands éleveurs laitiers » et 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 1 par une volonté de diminuer l'achat des aliments concentrés. Les exploitations 3 et 4 ont des fonctionnements plus ou moins similaires et, des quantités de flux de biomasses relativement proches, mais des différences structurelles et de pratiques sont constatées.

Dans l'ensemble, la fertilisation organique des parcelles de culture est largement dominée par les apports en fumier de bovins issus de l'élevage ou acheté au niveau des fermes voisines (Exploitation 1 et 4). Néanmoins d'autres types d'apports tels que le fumier de porc et de volaille pourraient différencier leurs pratiques notamment en termes de quantités. En termes d'entrées en nutriments, l'exploitation 3 n'importe que de l'engrais minéral alors que l'exploitation 4 achète en plus de l'engrais minéral, des concentrés et des fumiers issus des exploitations voisines. D'une manière générale, l'exploitation 3 est plus tournée vers l'autosubsistance que l'exploitation 4. Les flux entrants, sortants et internes à l'Exploitation 3 et 4 sont dans l'ensemble les plus faibles comparés à l'exploitation 1 et 2.

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 entrées en nutriments, les pratiques de fertilisation, alimentation de l'élevage bovin laitier et gestion des effluents d'élevage. La variabilité des pratiques de gestion des effluents pourrait se traduire par des niveaux différents de recyclage des éléments nutritifs présents dans les excréta. 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, conditionnent, par la suite, la production laitière et donc les sorties en éléments nutritifs du système.

### 3.3.3. Bilans de carbone et nutriments à l'échelle des exploitations

Les bilans apparents pour chaque exploitation (entrées-sorties de l'exploitation) ont été calculés pour C, N, P, K, Ca et Mg. Les transferts de C et de nutriments entre l'agriculture et l'élevage, au sein de l'exploitation, ont aussi été évalués afin de : (i) comprendre les flux en matière organique et en éléments minéraux au sein des exploitations et (ii) connaître les transferts de biomasses végétales et de fumure organique entre les deux systèmes d'agriculture et élevage. La connaissance des situations où des déficits et des excès de biomasses et de nutriments ont lieu permettent d'envisager les innovations techniques et organisationnelles qui doivent être développées pour limiter ces déséquilibres. Ces différentes quantifications permettront ultérieurement de discuter de la durabilité des pratiques mises en œuvre au niveau des différents systèmes d'activités valorisant les biomasses.

Dans nos bilans, l'estimation des exportations sous forme de production de viande a été obtenue à partir de l'enquête préliminaire faite auprès des agriculteurs en début de cycle. Ces données correspondent donc à l'année précédant nos résultats sur les flux de biomasses et nutriments. Les ventes d'animaux peuvent toutefois varier d'une année à l'autre, en fonction de divers facteurs tels que les besoins de trésorerie des agriculteurs, la demande de bétail, les aléas climatiques (sécheresse, grêle), les variations des prix du riz, des événements familiaux (décès, etc.). Le taux de renouvellement des troupeaux, qui est tributaire de plusieurs paramètres, est donc difficile à évaluer. En ce qui concerne les œufs, ils sont soit autoconsommés soit destinés à la couvaison pour renouveler l'effectif et donc n'ont pas été pris en compte dans les sorties.

#### 3.3.3.1. Bilan C et N

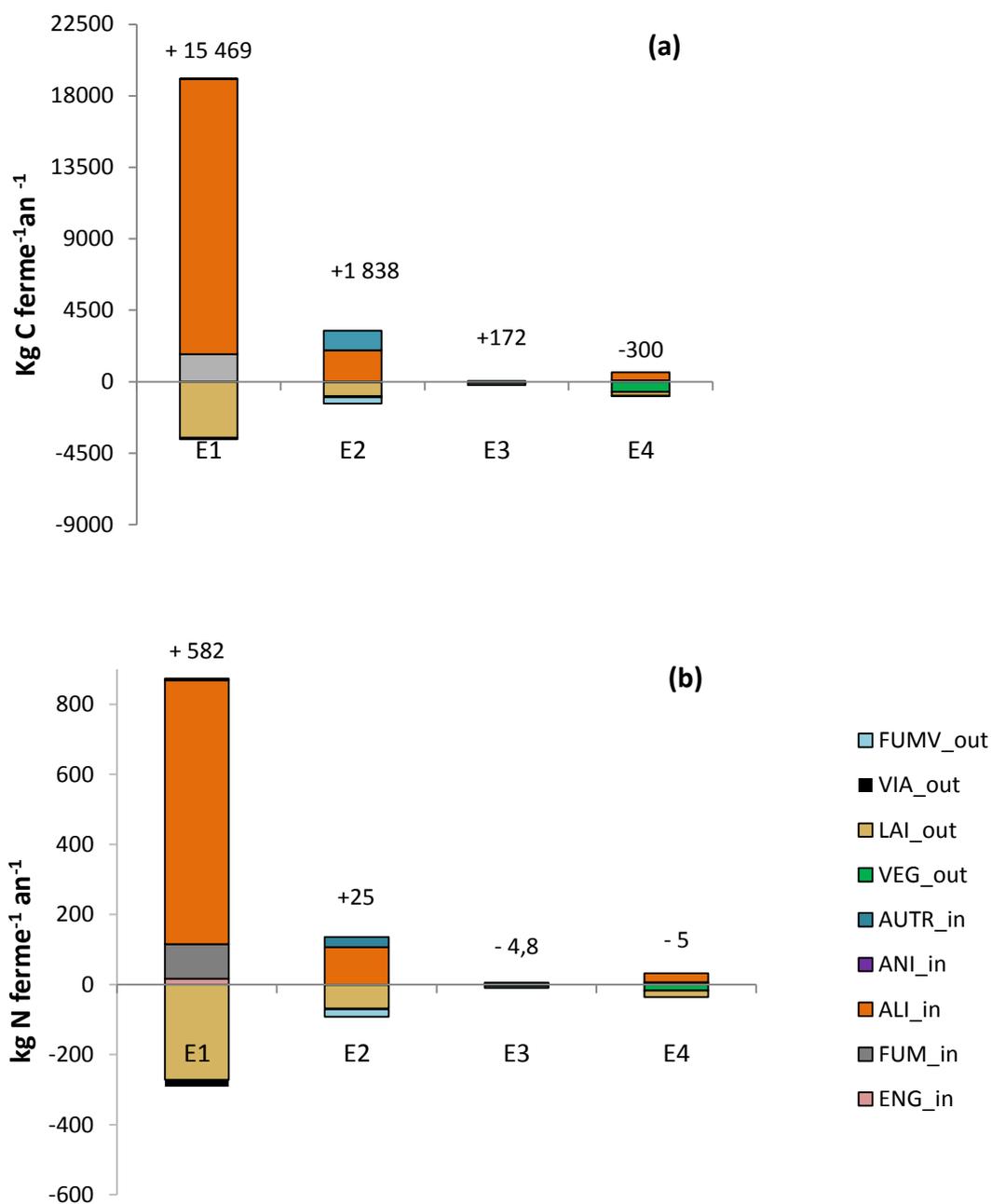
##### *i. Entrées-sorties à l'échelle de l'exploitation*

Les bilans apparents, calculés pour le C au niveau des grandes les exploitations, sont positifs (Figure 3-10a). La plus grande exploitation (E1 - grand éleveur laitier) présente le bilan de C le plus élevé (+15 469 kg C an<sup>-1</sup>), associé à l'achat importants en concentrés. L'exploitation E2 affiche aussi un bilan positif de +1 838 C an<sup>-1</sup>), mais moins important du fait de la taille plus faible de l'exploitation, comparé à l'exploitation 1. Les deux petites exploitations E3 et E4 présentent des bilans faibles de +172 et -300 kg C an<sup>-1</sup>,

respectivement. Le bilan en C négatif de l'exploitation E4 est, principalement lié aux ventes d'une partie des produits agricoles. Pour l'N (Figure 3-10b), E1 et E2 présentent des bilans apparents positifs, de + 582 kg N an<sup>-1</sup> et + 25 kg N an<sup>-1</sup>, respectivement, qui correspondent aux achats d'intrants externes, notamment de concentrés alimentaires pour le bétail, riches en N. Les deux petites exploitations laitières (E3 et E4) ont des bilans pratiquement équilibrés en N (-5 kg N an<sup>-1</sup>).

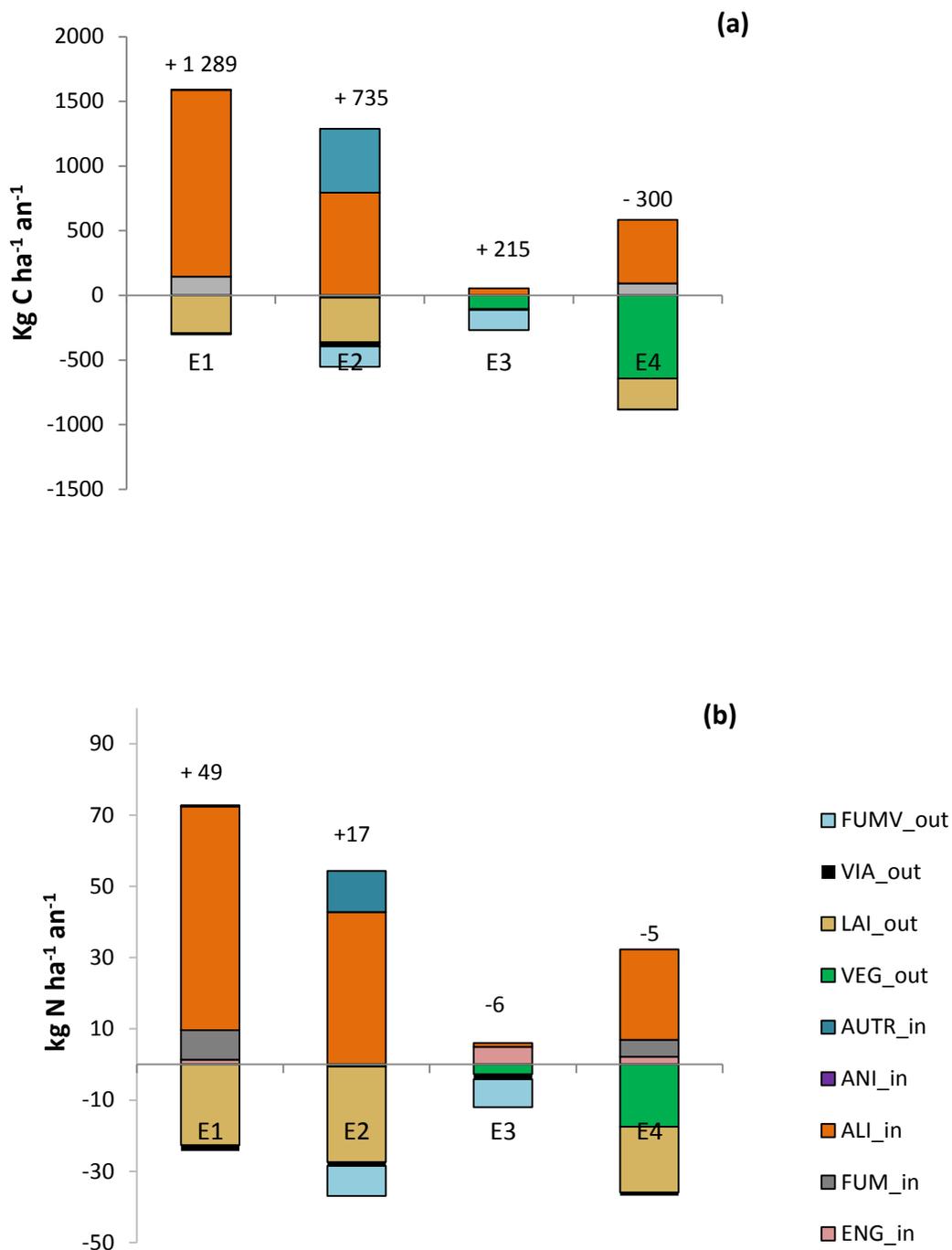
D'une manière générale, l'exploitation E1, fortement orientée vers la production laitière et utilisant une importante quantité de concentrés alimentaires a montré les plus hauts flux entrants et sortants de C et N, avec un excès lié à l'achat de concentrés. L'exploitation 2 présente des tendances similaires, mais avec des flux moindre du fait de la taille beaucoup plus petite de cette exploitation. Les petites exploitations laitières (E3 et E4), peu intégrées au marché, avec des ventes de lait et des achats de concentrés limités, présentent des bilans apparents légèrement en déficits pour C et équilibrés pour N (Figure 3-10 b).

Ramenés en hectare, les bilans en C et N sont toujours positifs au niveau des grands éleveurs grâce aux achats de concentrés. Globalement, la plus grande exploitation (E1) affiche des valeurs élevées (+ 1 289 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> et + 49 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) par rapport aux trois autres exploitations liées aux achats importants d'aliments de bétails. L'exploitation 2 présente, par contre, des valeurs intermédiaires (+ 735 kg C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> et + 17 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>). Les deux petites exploitations affichent des situations plus ou moins similaires avec des bilans assez proches de l'équilibre pour C et N (Figure 3-11).



**Figure 3-10 :** Bilan de C (a) et N (b) à l'échelle des exploitations.

FUMV\_out = fumier vendu ; VIA\_out = viande vendue, LAI\_out = lait vendu, VEG\_out = produits agricoles vendus ; AUTR\_in = divers entrées de produits, ANI = flux entrant d'animaux, ALI\_in = achats de concentrés, FUM\_in = achats de fumiers, ENG\_in = achats d'engrais.



**Figure 3-11** : Bilan de C (a) et N (b) à l'échelle des exploitations ramené l'hectare par ferme.

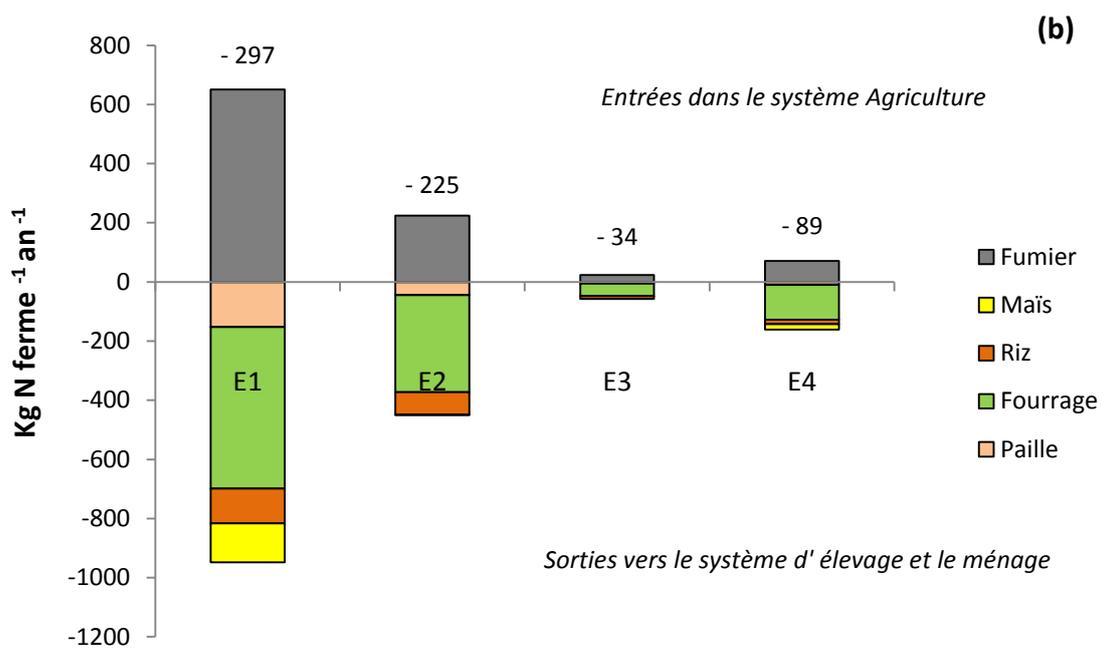
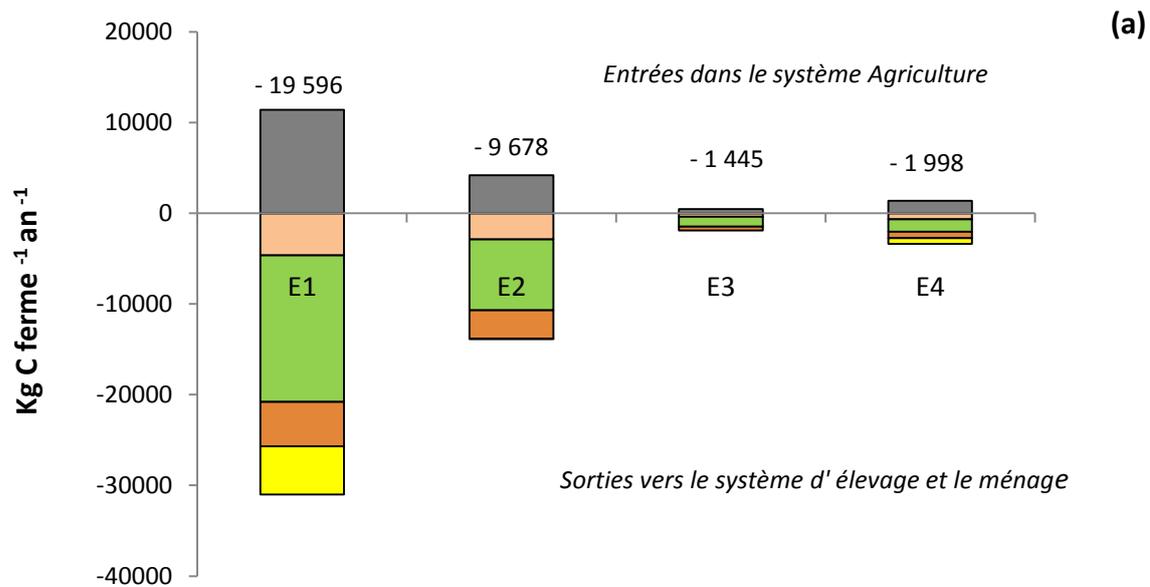
FUMV\_out = fumier vendu ; VIA\_out = viande vendue, LAI\_out = lait vendu, VEG\_out = produits agricoles vendus ; AUTR\_in = divers entrées de produits, ANI\_in = flux entrant d'animaux, ALI\_in = achats de concentrés, FUM\_in = achats de fumiers, ENG\_in = achats d'engrais.

## ii. *Transfert agriculture – élevage*

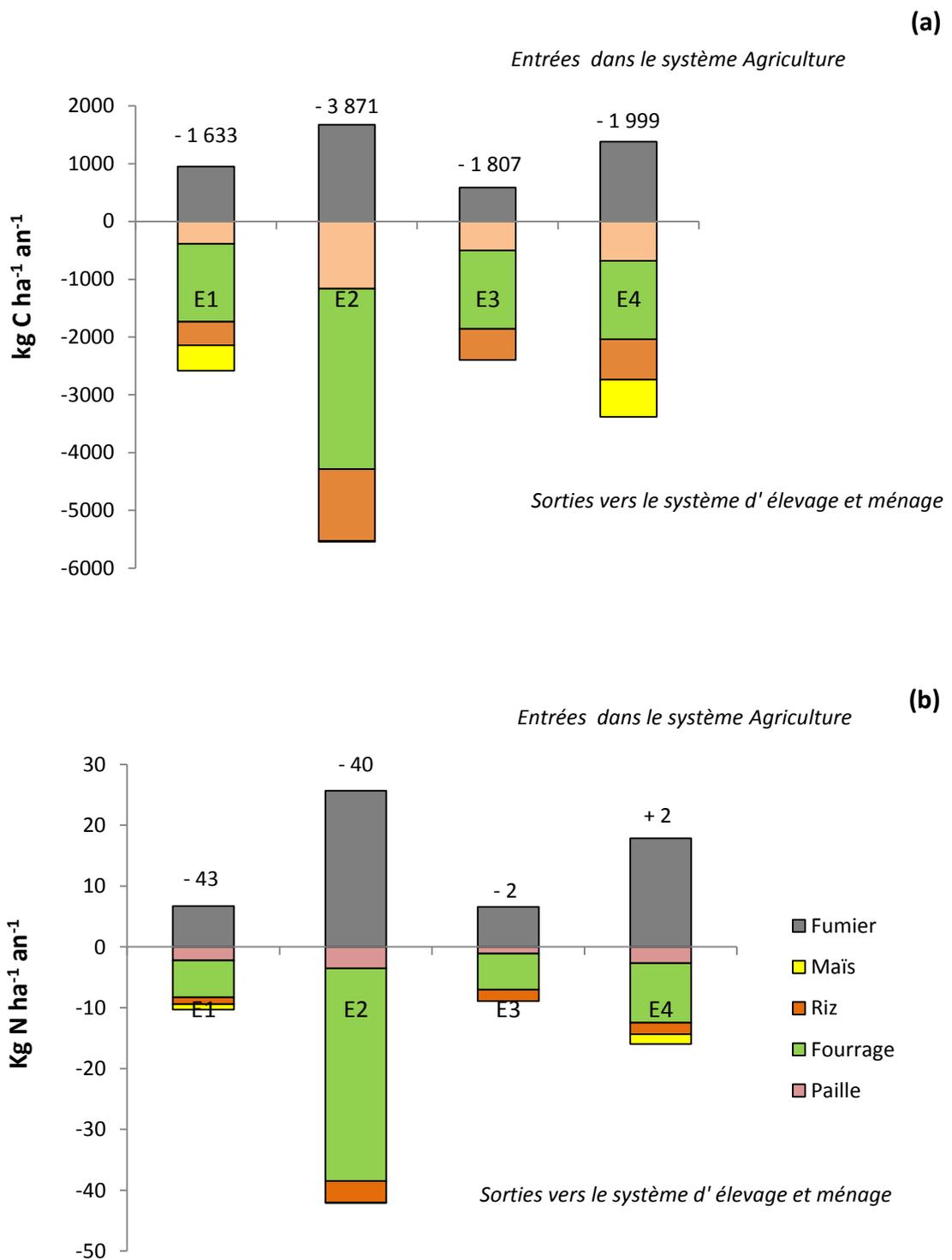
En ce qui concerne le bilan interne entre les deux ateliers, agriculture et élevage, on note, toutes exploitations confondues, des pertes importantes de C au niveau de l'atelier agriculture non compensées par les restitutions à partir du système d'élevage et conduisant à un bilan négatif (de -1 445 et -1 998 kg de C an<sup>-1</sup> pour les petits éleveurs laitiers E3 et E4, respectivement, à -9 678 et -19 596 kg de C an<sup>-1</sup> pour les grands éleveurs laitiers E2 et E1, respectivement) (Figure 3-12). La majorité du C prélevé dans les biomasses agricoles produites n'est pas restituée d'une manière satisfaisante par les apports d'amendements organiques (fumier). Ce bilan négatif du système agriculture pourrait induire un déséquilibre permanent au niveau des stocks de C du sol.

Pour l'N, toutes les exploitations présentent également des bilans négatifs entre agriculture et élevage. Les deux grands éleveurs présentent des déficits importants (de l'ordre de - 297 kg N an<sup>-1</sup> et - 225 kg N an<sup>-1</sup> pour E1 et E2, respectivement), entre les systèmes agriculture et élevage au détriment du système agriculture. Pour les petits exploitants laitiers, les déficits au niveau du système agriculture sont nettement moindre, du fait de la faible taille des exploitations, mais elles atteignent - 34 kg N an<sup>-1</sup> et - 89 kg N an<sup>-1</sup> pour E3 et E4, respectivement.

Ramenés à l'hectare, les bilans en C et en N entre les deux compartiments agriculture-élevage sont relativement similaires pour les quatre exploitations étudiées. La taille de l'exploitation et les différences de pratiques n'influent pas énormément les valeurs du bilan. Par exemple, E1 et E2, de taille différente (grande et moyenne), affichent des bilans plus ou moins comparables, de l'ordre de - 1 633 kg C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> et - 43 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> pour E1 et de - 3 871 kg C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, - 40 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> pour E2 (Figure 3-13). E3 et E4 présentent aussi des bilans par ha très proches (- 1 807 kg C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> et - 1 999 kg C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> pour E3 et E4, respectivement). Cependant, contrairement aux grandes exploitations, le bilan en azote de E3 et E4 est à l'équilibre entre les deux compartiments.



**Figure 3-12 :** Transfert de C (a) et N (b) entre les systèmes agriculture et élevage au sein des exploitations.



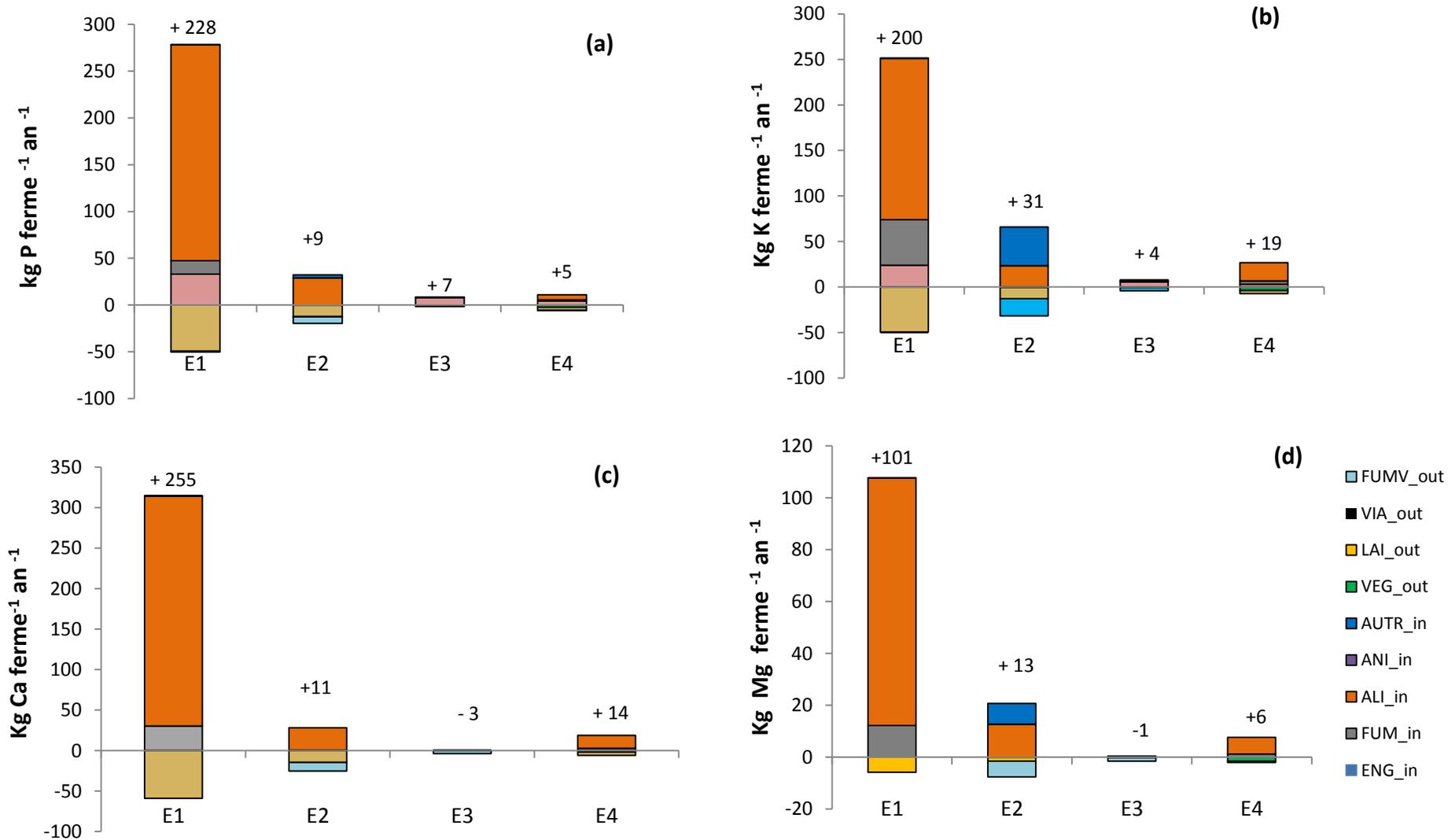
**Figure 3-13 :** Transfert de C (a) et N (b) entre les systèmes agricole et élevage au sein des exploitations ramenés à l'hectare par ferme.

### 3.3.3.2. Bilan en nutriments

#### *i. Entrées-sorties à l'échelle de l'exploitation*

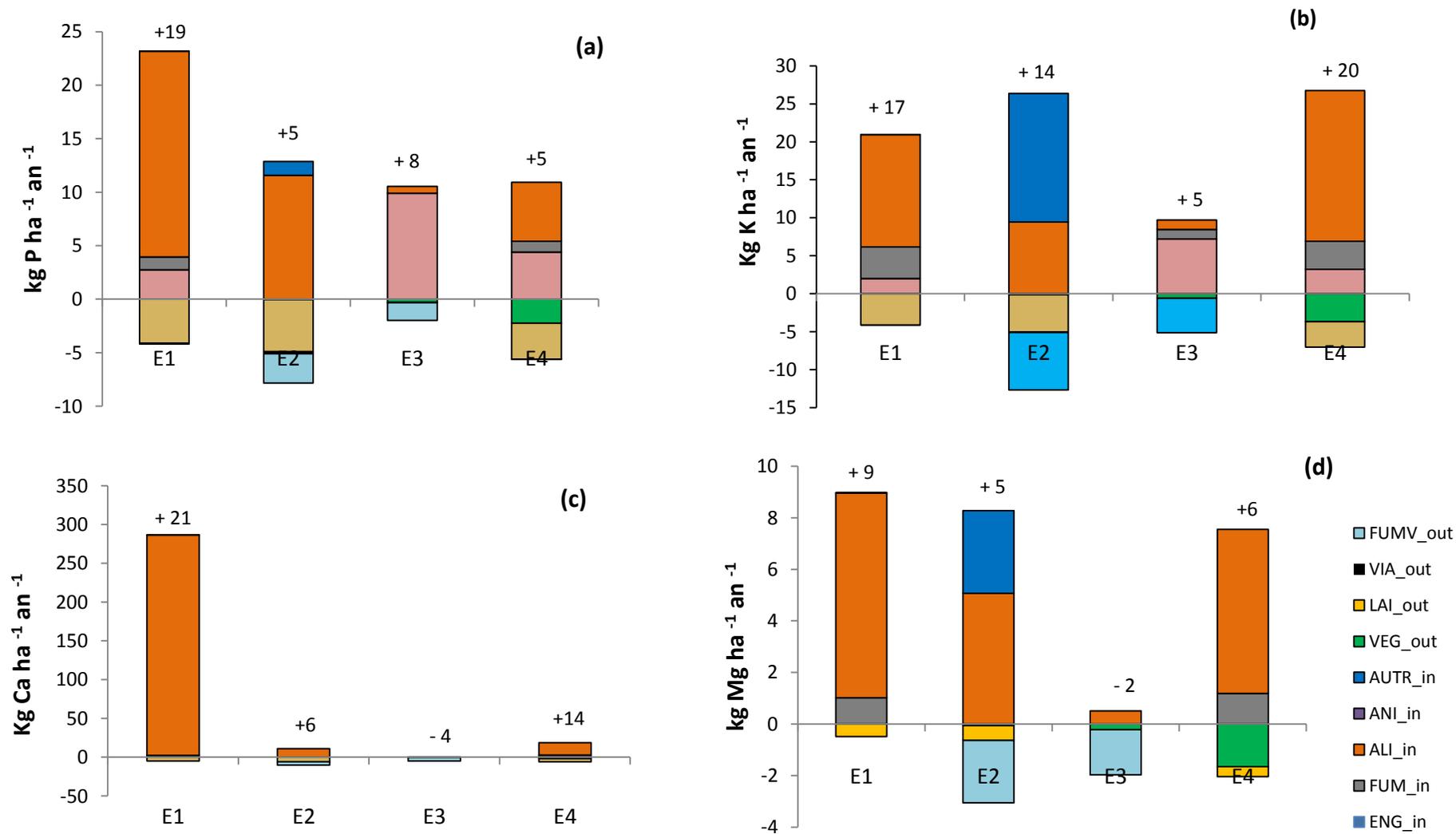
La figure 3-14 illustre les variations des bilans globaux en nutriments, P, K, Ca, Mg, dans le cas des exploitations mixtes d'agricultures-élevage. Elle met en évidence une grande variabilité du déficit du bilan apparent, quel que soit le nutriment, mais dont la valeur évolue suivant la taille de l'exploitation. L'exploitation E1 présente toujours des bilans très élevés par rapport aux trois autres exploitations. Les deux petites exploitations (E3 et E4), orientées vers l'autoconsommation, ont un bilan proche de l'équilibre pour tous les éléments, du fait de la faiblesse des achats et des ventes. E2 présente des situations plus ou moins intermédiaires.

Tous nutriments confondus, le bilan global, ramené à l'hectare, est relativement homogène d'une exploitation à une autre. La plus grande exploitation (E1) présente des valeurs légèrement supérieures aux trois autres exploitations, du fait qu'elle achète d'importantes quantités d'aliments concentrés. Dans presque tous les cas (à l'exception de Ca et Mg pour l'exploitation E3), les bilans de nutriments sont excédentaires, avec un enrichissement de 5 à 19 kg P ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, 5 à 2 kg K ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, -4 à 21 kg Ca ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> et -2 à 9 kg Mg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. La taille de l'exploitation et les pratiques n'ont pas influencé de manière très significative les valeurs des bilans par hectare dans ces exploitations d'agriculture-élevage.



**Figure 3-14 :** Bilan de nutriments, P (a), K (b), Ca (c), Mg (d) à l'échelle des exploitations.

FUMV\_out = fumier vendu ; VIA\_out = viande vendue, LAI\_out = lait vendu, VEG\_out = produits agricoles vendus ; AUTR\_in = divers entrées de produits, ANI\_in = flux entrant d'animaux, ALI\_in = achats de concentrés, FUM\_in = achats de fumiers, ENG\_in = achats d'engrais.



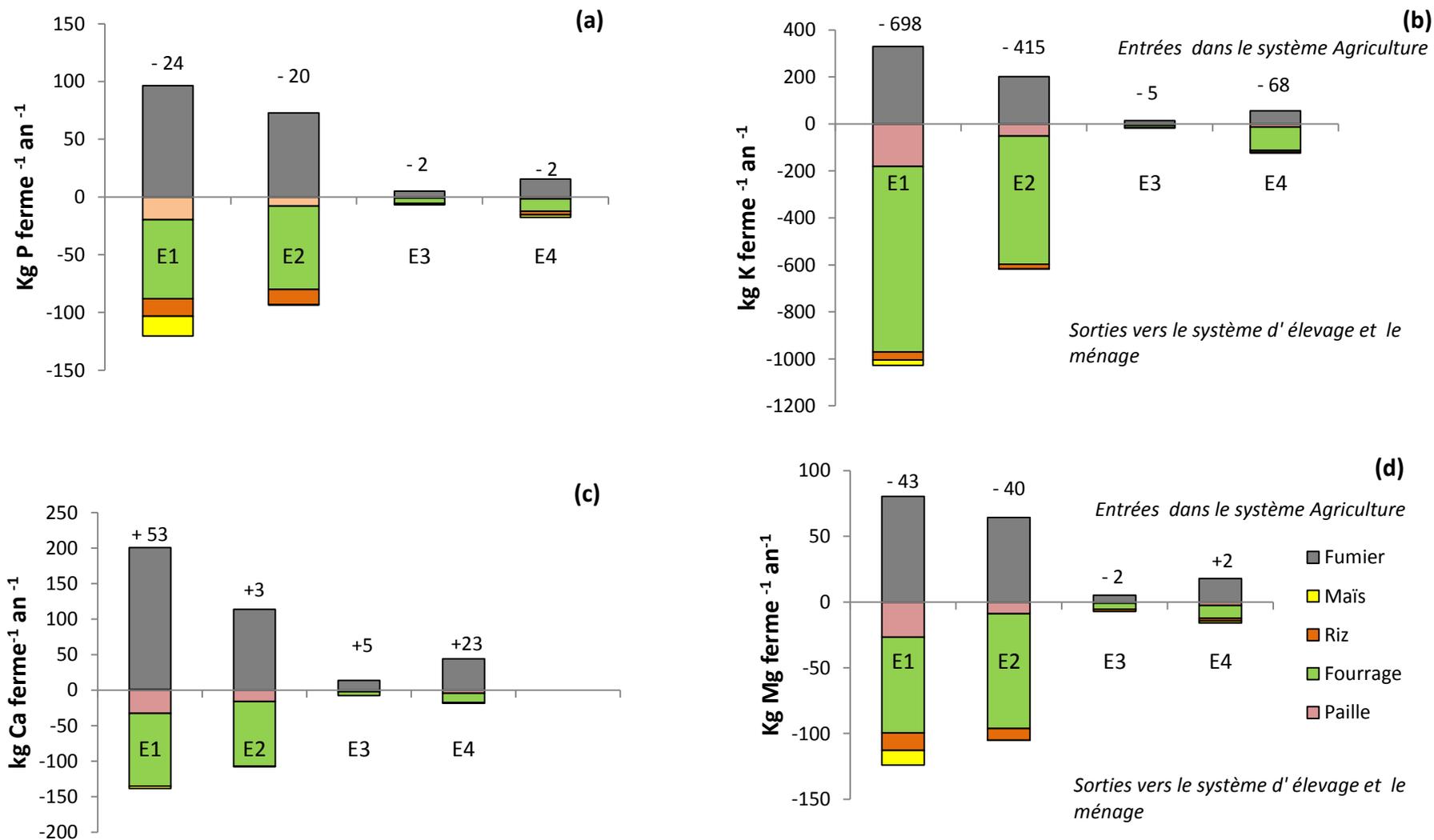
**Figure 3-15 :** Bilan de nutriments, P (a), K (b), Ca (c), Mg (d) à l'échelle des exploitations ramené à l'hectare.

FUMV\_out = fumier vendu ; VIA\_out = viande vendue, LAI\_out = lait vendu, VEG\_out = produits agricoles vendus ; AUTR\_in = divers entrées de produits, ANI\_in = flux entrant d'animaux, ALI\_in = achats de concentrés, FUM\_in = achats de fumiers, ENG\_in = achats d'engrais.

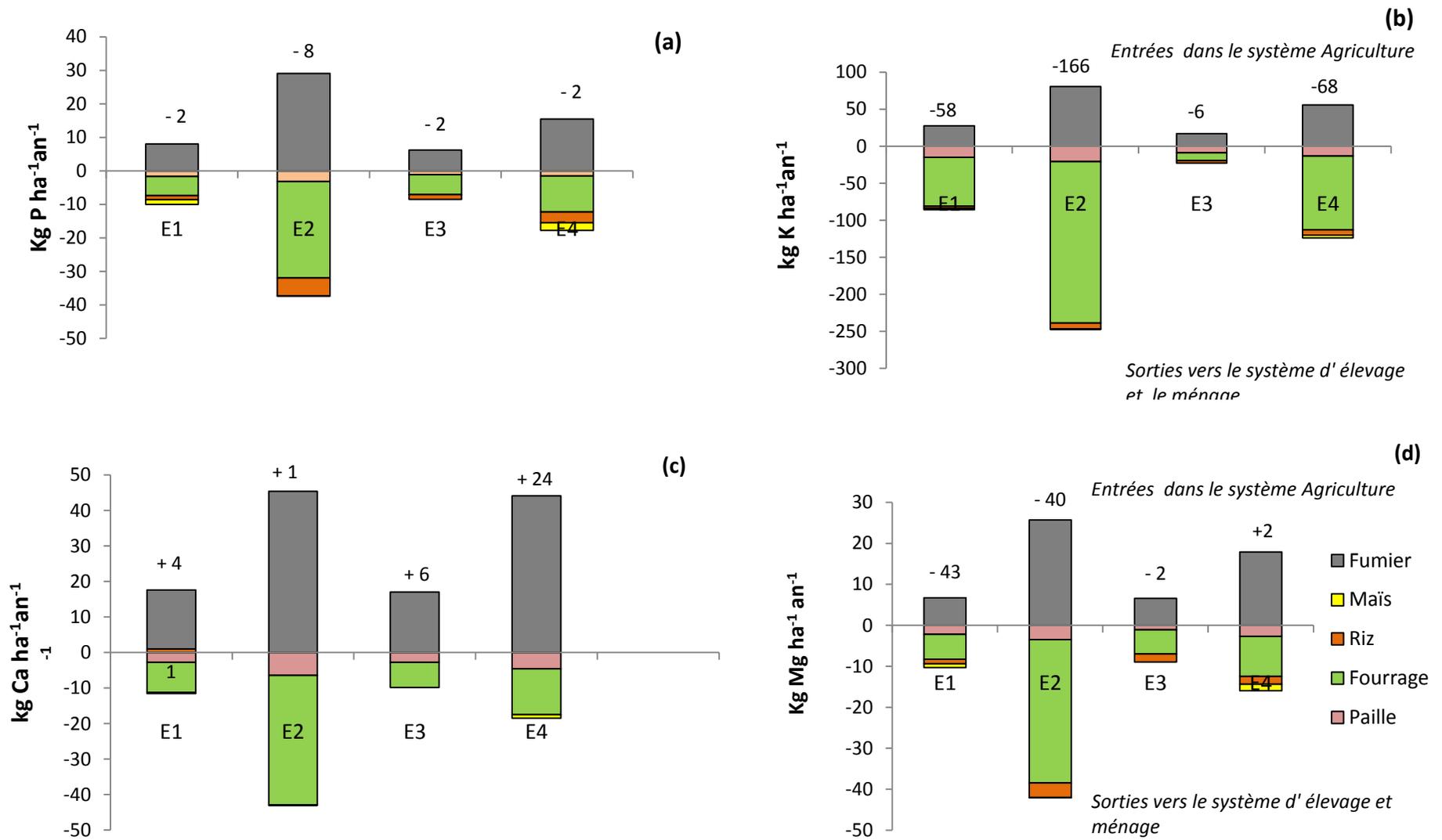
## ii. *Transfert agriculture – élevage*

Le transfert en nutriments entre les deux compartiments agriculture et élevage est présenté dans la Figure 3-16. Quel que soit le type d'exploitation et quel que soit le niveau d'intensification, les bilans en nutriments sont majoritairement déficitaires, excepté le Ca (avec une valeur légèrement positive). Ces bilans négatifs sont toujours très élevés pour E1 en raison d'exportation d'éléments minéraux via les productions importantes de biomasses (riz et fourrages). En particulier, les fourrages sont particulièrement riches en K, ce qui explique l'importance du déficit pour cet élément. Les déficits en nutriments, rapportés en Kg d'élément ferme<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, sont très variables d'une exploitation à une autre en fonction de leur taille et du type de production. En particulier, les teneurs en nutriments sont beaucoup plus élevées dans les fourrages que dans le riz. Les petits éleveurs laitiers, qui ont des surfaces fourragères réduites ont donc, proportionnellement à la surface des exploitations, des transferts d'éléments minéraux plus faibles.

Rapportés à l'hectare, les transferts entre les deux compartiments agriculture et élevage des quatre exploitations étudiées présentent diverses variations (Figure 3-17). Cependant, ces bilans en nutriments ne semblent pas évoluer en fonction de la taille des exploitations, mais plutôt en fonction de l'importance de la composante fourragère, avec des bilans plus négatifs lorsque cette composante est plus importante (E2 et E4). Les quatre exploitations étudiées présentent des bilans en P légèrement négatifs (-2 à -8 kg P ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>). Les bilans sont légèrement négatifs pour Mg (-43 à +2 kg Mg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) et légèrement positifs pour Ca (+1 à +24 kg Ca ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>). Le potassium est l'élément le plus déficitaire, (-6 à -166 kg K ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>). L'exploitation E2, bien qu'elle ait une taille moyenne comparable à l'exploitation E1, présente un bilan très négatif en K (-166 kg K ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) par rapport à E1 (-58 kg K ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>).



**Figure 3-16:** Transfert de P (a), K (b), Ca (c), Mg (d) entre les systèmes agricole et élevage au sein des exploitations.

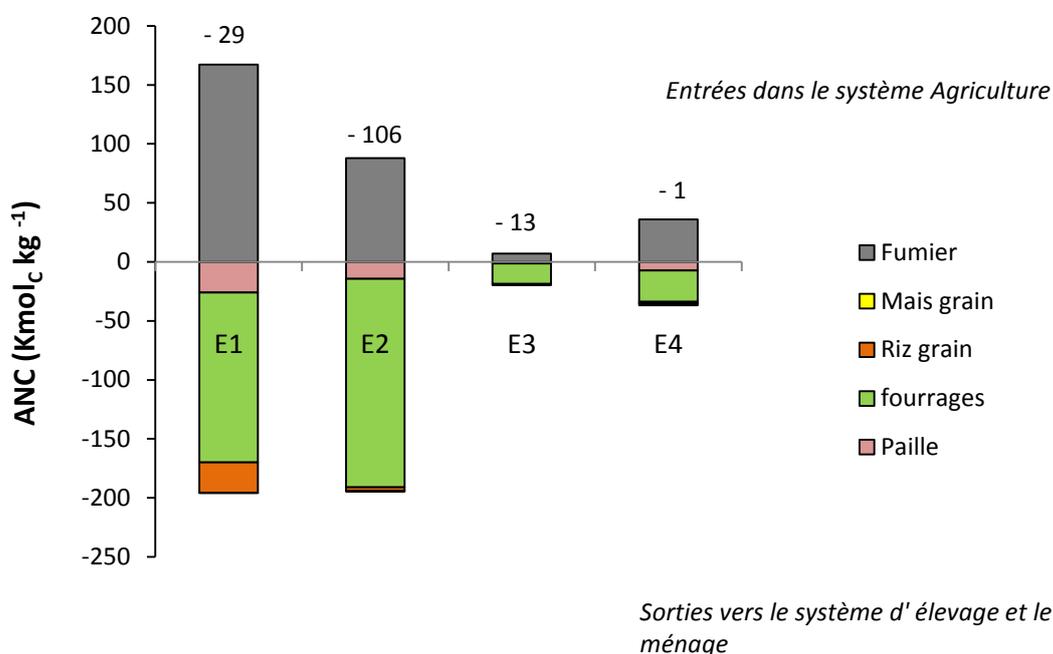


**Figure 3-17:** Transfert de P (a), K (b), Ca (c), Mg (d) entre les systèmes agriculture et élevage au sein des exploitations ramené à l'hectare.

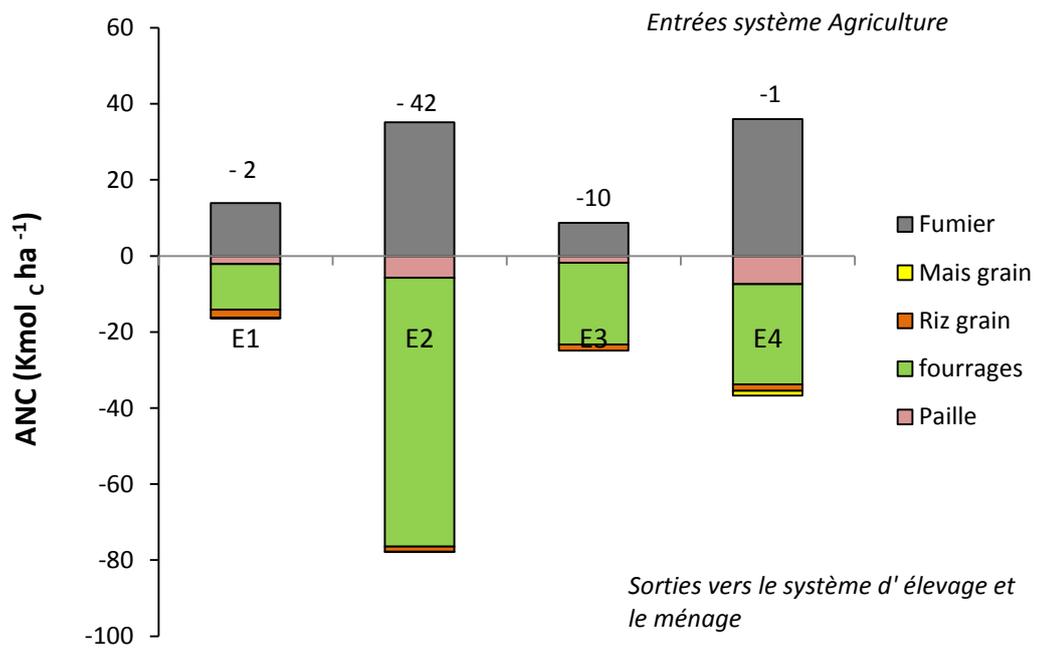
### iii. Transfert d'alcalinité agriculture – élevage

La figure 3-18 présente le bilan du transfert d'alcalinité (ANC) entre le système agriculture et élevage. Toutes exploitations confondues, l'ANC est négatif. Cela est en relation avec l'importance de perte en cations (K, Ca, Mg) via les récoltes et la non compensation de ces pertes par le fumier apporté. En d'autres termes, les valeurs négatives correspondent à des pertes d'alcalinité des biomasses, qui conduisent à l'acidification des sols.

Rapportée en hectares, la perte d'alcalinité induite par les exportations de biomasses varie en fonction de l'exploitation (Figure 3-19). Les exploitations E2 (moyenne) et E3 (petite) perdent plus d'alcalinité que les exploitations E1 (grande) et E4 (petite). Ces pertes d'alcalinité correspondent à un apport d'équivalent  $\text{CaCO}_3$  de 1\_775  $\text{kg CaCO}_3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  pour E2 et 806  $\text{kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  pour E3. La perte d'alcalinité des exploitations E1 et E4 sont faibles (36-119  $\text{kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  équivalent  $\text{CaCO}_3$ ).



**Figure 3-18 :** Transfert d'alcalinité entre le système agriculture et élevage.



**Figure 3-19 :** Transfert d'alcalinité entre le système agricole et élevage ramené à l'hectare.

### **3.4. Discussion**

#### **3.4.1. Limites méthodologiques**

La détermination du bilan en éléments nutritifs au niveau des exploitations présente, parfois, certaines imperfections, liées notamment à l'estimation de certains flux et à la détermination précise des quantités de biomasses échangées.

Dans la méthodologie employée pour l'estimation des biomasses produites, des quantités de fourrages distribués aux animaux, des quantités de fumiers restitués sur les champs, certaines valeurs ont été obtenues à partir des dires des paysans. Par ailleurs, les quantités de certains aliments ont été évaluées par les paysans en nombre de charrettes ou de sacs. Ces estimations peuvent induire des surestimations ou sous-estimations de certains flux de biomasse, ce qui a rendu difficile l'étude. Des mesures plus détaillées pourraient être envisagées, sachant que des mesures précises des biomasses à l'échelle d'exploitations agricoles peuvent se révéler extrêmement lourdes à mettre en œuvre.

Par ailleurs, dans le cadre de cette étude, certaines ressources, qui n'ont pas été caractérisées, pourront encore augmenter la variabilité des flux. Il s'agit principalement des flux au niveau du ménage (déchets ménagers, excréments familiaux). Les apports par des déjections d'animaux issus d'autres exploitations lors des parcours d'animaux, les dépôts atmosphériques, etc. n'ont pas été quantifiés. Les pertes par volatilisation, lixiviation ou érosion sont difficiles à estimer pour des bilans complets. Par exemple, les pertes d'éléments nutritifs par l'urine, qui sont très élevées en raison de la lixiviation et de la volatilisation (FAO, 2003), n'ont pas été considérées dans notre étude.

En outre, des répétitions plus nombreuses pour chaque groupe typologique nous auraient permis de mieux quantifier les flux d'éléments, en fonction de l'hétérogénéité des situations agricoles. De plus, nous avons choisi de ne travailler qu'avec deux types d'exploitations, fortement tournées vers la production laitière, ce qui reste limité car les pratiques des autres types d'exploitations seraient également intéressantes à étudier. En particulier, une comparaison avec des exploitations moins tournées vers la production laitière nous semble nécessaire. Dans ces cas, la vente importante de produits végétaux et les ressources plus limitées en fumiers ou autres fertilisants organiques pour compenser les pertes liées aux récoltes peuvent accentuer la dégradation de la fertilité de ces exploitations, comme on peut commencer à la percevoir pour les petites exploitations laitières étudiées (E3 et E4).

### 3.4.2. Flux de ressources et bilans d'éléments nutritifs

Les exploitations d'agriculture élevage du Vakinankaratra que nous avons étudiées correspondent à deux groupes typologiques où la production laitière joue un rôle important. En conséquence, les échanges entre les exploitations et leur environnement économique ne concernent pratiquement que l'élevage laitier : la vente de lait et l'achat de compléments alimentaires pour les vaches laitières. La vente d'autres produits animaux autres que le lait est assez limitée. Surtout, les productions agricoles (grains, tubercules, fourrages) sont autoconsommées en presque totalité au niveau de l'exploitation (sauf pour une petite part pour E3 et E4), soit par la famille, soit par les ateliers d'élevage.

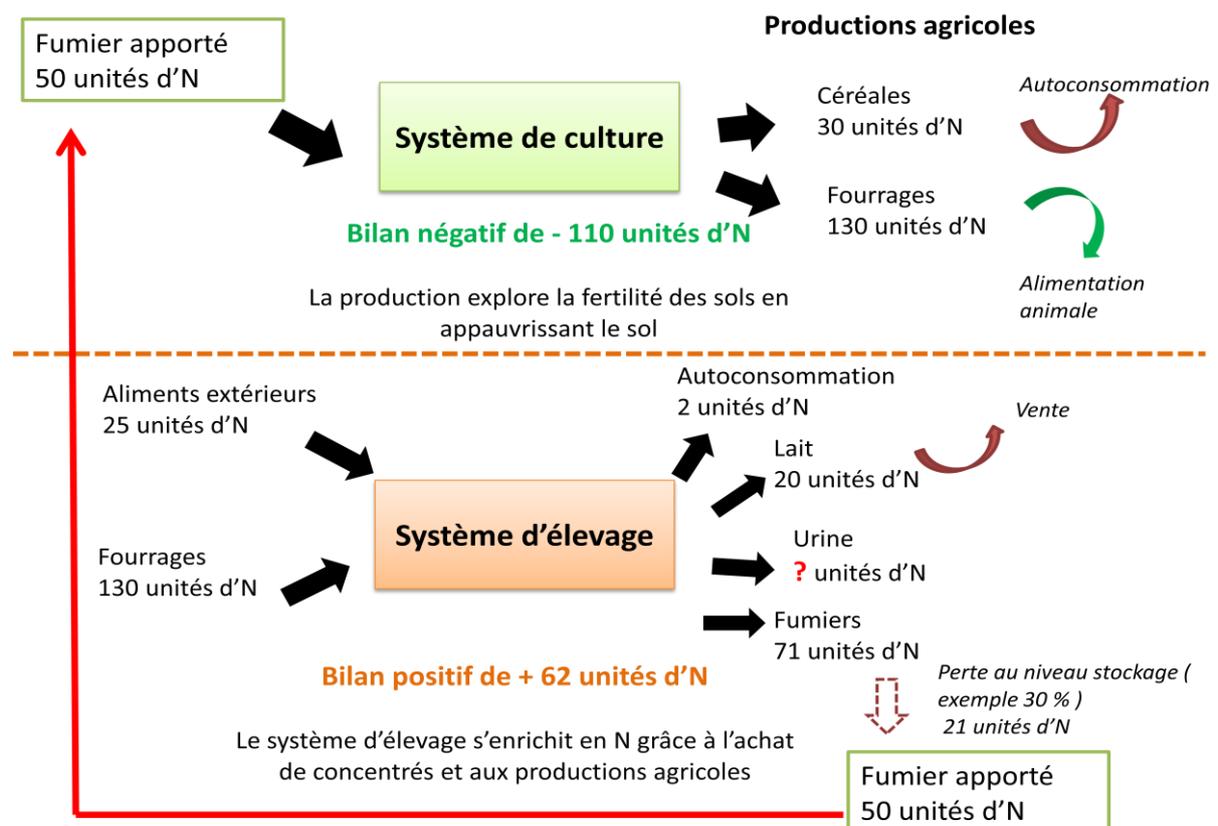
À l'échelle de l'ensemble des exploitations, les bilans de biomasses et de nutriments sont positifs ou proche de l'équilibre. Les grands éleveurs laitiers ont des bilans très positifs en raison notamment de l'achat de quantités importantes de compléments alimentaires pour les vaches laitières. Ces aliments du bétail sont riches en azote et en éléments minéraux. Les produits animaux vendus, principalement le lait et, dans une petite proportion, la viande, n'induisent pas des sorties très importantes de nutriments. Par contre, les petits éleveurs laitiers, beaucoup moins intégrés aux marchés, achètent assez peu d'aliments du bétail et vendent peu de production. Les bilans sont alors assez proches de l'équilibre (parfois légèrement négatifs). La taille de l'exploitation et le niveau d'intensification de l'élevage jouent donc des rôles importants en termes de bilan global par exploitation. Les grandes exploitations ont pu, en effet, avoir des bilans excédentaires via l'achat d'importantes quantités d'aliments qui compensent les pertes liées à la vente du lait. Les bilans de C, N et nutriments varient donc énormément entre les agro-éleveurs de différentes classes sociales (Tittonell, 2007). Néanmoins, rapportés à l'hectare, les flux et les bilans sont relativement similaires, malgré la diversité des tailles et des pratiques des quatre exploitations.

Au niveau de la ferme, le compartiment « élevage » s'enrichit en matière organique (C, N) et en nutriments du fait des transferts des produits récoltés (grains, pailles, fourrages) et de l'achat de concentrés alimentaires. Ces entrées externes sont, généralement, plus élevées que la vente de lait et le fumier produit. Les restitutions depuis le compartiment « élevage » vers le compartiment « agriculture » se font à travers l'épandage de fumiers ou autres résidus organiques. Les bilans internes de C et nutriments entre les systèmes d'agriculture et d'élevage ont révélé des bilans négatifs quelques soit les nutriments, excepté pour le Ca. Le fumier (enrichi par les apports de nutriments en excès dans les aliments du bétail par rapport aux sorties par la vente de lait) n'arrive pas à compenser les pertes au niveau du système

agriculture occasionnées par les récoltes. Globalement, selon les exploitations, seulement 25-41 % de C, 41-69 % de N, 73-87 % de P, 32-75 % de K, 102-216 % de Ca et 61-112 % de Mg retournent sur les surfaces cultivées avec l'épandage de fumiers. L'efficacité de restitution de N et K est particulièrement faible. Seule la restitution de Ca est en excès du fait de la richesse des aliments de bétail en cet élément. En effet, des pertes importantes de carbone organique et de nutriments surviennent lors de la manipulation et du stockage des fumiers (Rufino et al., 2006 ; Bernal et al., 2009 ; Tittonell et al., 2010). Bernal et al. (2009), qui ont fait une synthèse bibliographique sur les effets du compostage du fumier, indiquent que les pertes de carbone organique par minéralisation sont d'environ 56 % de la teneur initiale. Tittonell et al. (2010), qui ont étudié les systèmes de culture et d'élevage de petits exploitants au Kenya, montrent aussi des pertes de 45 à 69 % du C du fumier stocké, en fonction des différents environnements (humidité, aération, température) créés selon les modes de stockage. Les teneurs en éléments fertilisants du fumier sont également généralement faibles en raison des pertes lors de la gestion et de la conservation des fumiers (pertes de matières fécales et d'urine, volatilisation des composés azotés, lixiviation des nutriments, etc.). Pour l'azote, Rufino et al. (2006) estiment que l'efficacité du recyclage varie de 6 à 99 % pour la manutention et de 30 à 87 % pour le stockage du fumier. Dans des conditions où l'efficacité du recyclage est faible, les teneurs en éléments minéraux peuvent donc être très faibles. Nos estimations sont d'ailleurs supérieures aux efficacités de rétention des nutriments pendant le stockage rapportées par Tittonell et al. (2010), qui variaient entre 24-38 % pour le N total, 34-38 % pour le P et 18-34 % pour K, du fait des gains en nutriments apportés par les concentrés alimentaires. Ce déficit des restitutions depuis le compartiment « élevage » vers le compartiment « agriculture » est en accord avec les observations antérieures de Mapfumo et Giller (2001) et conduit à une dégradation de la fertilité des sols.

La Figure 3-20 illustre les transferts d'azote entre le système d'élevage et le système d'agriculture liés au recyclage de biomasses. D'une manière générale, le compartiment « agriculture » présente un bilan négatif en N. Le système de culture perd de l'N suite aux exportations de cet élément dans les productions agricoles qui ne sont pas compensées par l'apport d'N via le fumier. La production agricole consomme, peu à peu, la fertilité du sol qui, à moyen ou à long terme, pourrait épuiser la capitale fertilité du sol. Cette faible restitution d'N par le fumier peut être due aux pertes par ruissellement, volatilisation, lixiviation, etc. qui ont lieu lors des étapes de collecte (incomplète) au niveau de l'étable, puis des pertes lors du stockage du fumier ou les possibilités de pertes de nutriments lors de la divagation des

animaux et lors de l'épandage. Une mauvaise gestion et conservation des effluents d'élevages conduit ainsi à des fumiers de moins bonne qualité fertilisante. Dans notre exemple (Figure 3-20), une perte de 30% d'N au niveau du stockage du fumier entraîne une perte de 21 unités d'N (avec une production totale de 71 unités d'N) alors que cette perte d'N pourrait être encore plus importante, allant jusqu'à 87% selon certaines pratiques de gestion décrites par Ruffino et al. (2006). Une perte de 87% d'N au niveau du stockage se traduirait par une perte de 61 unités d'N dans notre cas d'étude. L'amélioration de la gestion des effluents d'élevage et en particulier du stockage du fumier, se révèle donc être une des alternatives pour une efficacité azotée accrue des exploitations d'agriculture-élevage. Si, l'exploitant utilise des bonnes pratiques de gestion des effluents d'élevage, nous considérons qu'il pourrait améliorer le bilan négatif du système de culture. Le système d'élevage présente un bilan positif en N grâce aux entrées extérieures (aliments concentrés et fourrages) qui sont supérieures aux sorties d'N via la vente du lait et la production de fumier. L'excédent d'N est fortement dépendant des entrées d'N par les aliments destinés à l'alimentation animale (Simon et al., 2000).



**Figure 3-20 :** Flux d'azote à l'échelle d'une exploitation agricole – Bilan au niveau du système d'agriculture et d'élevage.

La dégradation de la fertilité du compartiment « agriculture » s'accompagne, également, de pertes importantes de l'alcalinité (ANC) au niveau de chaque exploitation. Ces résultats permettent de mieux illustrer l'importance des pertes en nutriments par les récoltes (riz, fourrages) et notamment par l'exportation des pailles et des fourrages pour l'alimentation animale. À moyen ou à long terme, l'exportation des biomasses diminuera les quantités d'éléments minéraux bio-disponibles du sol, si les restitutions en matière organique et/ou en fertilisants minéraux ne sont pas suffisantes.

Outre ce bilan global entre les systèmes agriculture et élevage, la localisation et la répartition des nutriments en fonction des espaces cultivés sont importantes. Par exemple, les bilans sont très concentrés et probablement positifs pour les jardins ou les champs près de la ferme (Harris, 1998 ; Manlay, 2004). En effet, les déchets ménagers et les résidus de culture provenant d'autres champs sont, normalement, ramenés aux jardins familiaux et aux champs/pâturages les plus proches, sous la forme de compost ou de fumiers. Donc, même à l'échelle de la ferme, des gradients de transfert de fertilité peuvent se créer entre les différentes zones, avec un appauvrissement pour certaines zones et un enrichissement pour d'autres (Dugué, 2004).

Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'une bonne gestion des ressources organiques dans des systèmes intégrant agriculture et élevage au niveau des exploitations agricoles ou au niveau des paysages afin de compenser les transferts de fertilité liés aux exportations des cultures. Le recyclage des biomasses végétales et/ou animales sous forme de fumier permet à la fois d'apporter de nutriments et de matière organique au sol et de corriger l'acidité du sol grâce à son pouvoir alcalinisant important. Un des points clés de la conservation de la fertilité des systèmes agriculture-élevage dépend donc des pratiques visant à limiter les pertes de nutriments lors de la manutention et du stockage des nutriments.

### **3.4.3. Opportunités d'intégration agriculture - élevage**

Quel que soit le type d'exploitation, des signes d'intégration d'agriculture élevage sont distingués. Cela s'explique premièrement, par le transfert de fourrages et résidus de cultures du système d'agriculture vers l'atelier élevage, et l'apport du fumier pour les cultures. L'apport de fumier vise à compenser les pertes en éléments par les cultures et ainsi permettre de limiter l'achat d'engrais minéraux par les paysans. Cela est illustré par une fertilisation

presque uniquement organique pour l'ensemble des cas d'étude. La valorisation des déjections animales par la fertilisation organique diminue la dépendance des exploitations vis-à-vis des fertilisants minéraux et représente souvent la seule source de fertilisation des petites exploitations agricoles (Rufino et al., 2007). De plus, l'apport de fumure organique au champ participe à la conservation de la fertilité des sols en renforçant le statut organique des sols, améliorant la rétention en eau et en éléments minéraux, favorisant la micro et macrofaune du sol, participant à la structuration et la protection des éléments fins du sol (Blanchart, 2011).

Les grands éleveurs laitiers présentent globalement des excédents en biomasses et en nutriments par rapport aux petites exploitations. L'amélioration de la gestion interne de nutriment grâce à une meilleure intégration de l'élevage et de l'agriculture, et l'utilisation plus efficace des engrais disponibles est la première option pour les exploitations à faible capacité en ressources de production (Diarisso, 2015). Les synergies entre les cultures et l'élevage offrent de nombreuses opportunités pour réaliser une agriculture durable, en augmentant la productivité parallèlement à l'efficacité de l'utilisation des ressources (Herrero, 2010). Comme l'ont souligné Herrero et al. (2010), les synergies entre les cultures et l'élevage offrent de nombreuses opportunités pour réaliser une agriculture durable.

### **3.5. Conclusion**

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude montrent la difficulté d'obtenir des bilans équilibrés entre les compartiments « agriculture » et « élevage », malgré des bilans excédentaires, à l'échelle globale, pour les grandes exploitations laitières, du fait d'achats d'aliments du bétail à l'extérieur. Les modes de gestion/conservation et stockage des fumiers sont probablement les principales causes des pertes de C et nutriments. Malgré la diversité des tailles, des pratiques des exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra, les flux et les bilans sont relativement similaires rapportés à l'hectare. Des améliorations sont donc à rechercher au niveau des modes de gestion des fumiers pour limiter les pertes. Ces pertes affectent principalement l'azote et, dans une moindre mesure, le potassium, les autres éléments étant apportés en quantités assez importantes par les aliments du bétail et étant moins sujet à des pertes par volatilisation ou lixiviation que l'azote. Malgré quelques difficultés méthodologiques, la méthode du bilan a donc permis d'obtenir des connaissances sur les flux d'éléments nutritifs et elle peut être un outil utile pour la compréhension par l'exploitant agricole des problèmes de gestion des ressources (sols, biomasses, etc.).

**Chapitre 4. La Spectrométrie Proche  
Infrarouge comme outil de  
caractérisation des flux de nutriments**

---

## 4.1. Introduction

L'appauvrissement en éléments nutritifs est un aspect majeur de la dégradation des sols, notamment en Afrique sub-saharienne (Stoorvogel et al., 1993 ; Hartemink, 2006). En effet, les systèmes de culture classiques ont conduit à un appauvrissement important des teneurs en nutriments des sols, accompagnée d'une baisse de rendement des cultures et d'un appauvrissement des populations (Stoorvogel et al., 1993 ; Roy et al., 2005 ; Lal., 2009 ; Chianu et al., 2012). Dans les systèmes intégrant agriculture et élevage, les transferts de fertilité, à l'échelle de l'exploitation ou du paysage, sont particulièrement importants. Ils se caractérisent par des flux de matières organiques et minérales liés à leur transport par les populations, par le déplacement du cheptel, ainsi que par des phénomènes naturels (érosion hydrique et éolienne) (Dugué, 1998). Ces transferts de biomasses et d'éléments nutritifs s'opèrent entre les différents compartiments du système : animaux, stockages des effluents (fumiers, lisiers, composts), parcelles de culture (plantes et sol), et la famille (Alvarez, 2012). Ils conduisent en général à un appauvrissement important de certaines zones périphérique des exploitations au bénéfice d'un enrichissement des parcelles proches de la ferme (Dugué, 1998 ; Manlay et Ickowicz, 2000 ; Rufino et al., 2006 ; Alvarez, 2012).

La connaissance quantitative de la perte ou du gain en éléments nutritifs à travers les transferts de biomasses (plantes, productions agricoles, résidus de culture ou d'élevage) contribue à comprendre l'état de dégradation de certains sols et peut se révéler utile pour concevoir des stratégies de gestion des éléments nutritifs à l'échelle de l'exploitation (FAO, 2001). La gestion des éléments nutritifs est, ainsi, devenue une préoccupation majeure afin de développer la production végétale mondiale (van Maarschalkerweerd et Husted, 2015).

Le carbone (C), l'azote (N), le phosphore (P), le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et le potassium (K) sont quelques-uns des composants biochimiques les plus importants de la matière organique végétale. Par conséquent, l'estimation de ces composants peut aider à surveiller les processus métaboliques, la santé des plantes et la fertilité des sols. Ils sont, habituellement, estimés en utilisant des analyses chimiques en laboratoire qui, ont été développées pour fournir sur la composition chimique aux industries, aux agriculteurs et aux chercheurs.

Les méthodes d'analyses classiques sont souvent coûteuses et longues à mettre en œuvre (Shenk et Westerhaus, 1994 ; Deville et Flinn, 2000) pour caractériser les constituants des biomasses (végétales et animales) et pour réaliser des suivis des stocks et flux de nutriments

dans des exploitations agricoles. L'un des facteurs limitant est la nécessité de réaliser de nombreuses analyses chimiques, avec des coûts et des délais de réponse souvent excessifs. La caractérisation des ressources est, de ce fait, très limitée parce ce qu'on ne peut pas multiplier les analyses pour évaluer de manière satisfaisante les facteurs de variation spatiotemporelle et l'impact des modes de conduite sur les teneurs en nutriments des biomasses. Dans ces conditions, il s'avère difficile d'effectuer un diagnostic précis des systèmes de production et d'évaluer les bénéfices de solutions techniques innovantes, tant en ce qui concerne l'accumulation de matière organique par les sols (restitutions de résidus de culture), qu'en ce qui concerne l'estimation des bilans organiques et minéraux suite à l'exportation de produits agricoles (grains, pailles, fourrages) ou à l'apport de résidus (amendements organiques, fumiers, composts). Une bonne gestion de la production nécessiterait, par conséquent, des diagnostics à l'aide de techniques analytiques rapides et rentables (Batten, 1998) afin de prendre des décisions immédiates.

Trouver une alternative à la méthode d'analyse conventionnelle a été une des préoccupations des scientifiques ces deux dernières décennies. Depuis les années 1980, la Spectrométrie Proche Infrarouge (SPIR) a été considérée comme une méthode non destructive pour la détermination de la composition chimique dans tous les domaines de la science des aliments et de l'agriculture (Givens et Deaville, 1999). Elle a été introduite en tant que méthode rapide, peu coûteuse et précise pour l'analyse des céréales, des oléagineux et des fourrages (Norris et al., 1976 ; Murray, 1992). D'après Batten (1998), les avantages de la SPIR, par rapport à d'autres techniques analytiques, comprennent (i) une préparation minimale des échantillons, (ii) un temps de réponse réduit au laboratoire, (iii) le besoin de bâtiments simples, (iv) une formation minimale du personnel et v) la détermination simultanée de plusieurs composants dans chaque échantillon. Ces avantages contribuent donc à réduire le coût et la durée d'analyse par échantillon lorsqu'on utilise la SPIR par rapport à l'analyse par des techniques traditionnelles. La SPIR a été utilisée depuis de nombreuses années pour analyser la composition (humidité, protéines, fibres, lignine, lipides, etc.) des fourrages et matières premières. Depuis un certain temps, elle a été aussi utilisée pour analyser des matières organiques de composts (Thuriès et al. 2005 ; Galvez-Sola et al., 2010) et d'effluents d'élevage (Reeves, 2001). Néanmoins, très courante dans certains domaines, comme l'agro-alimentaire, l'analyse des sols, l'analyse de la qualité des fourrages, elle a cependant tardé à être utilisée pour quantifier les teneurs en nutriments (N, P, Ca, Mg, K, S, Cl) des biomasses agricoles. Peu d'études ont été entreprises pour évaluer la possibilité

d'utilisation de la SPIR dans la détermination des teneurs minérales des plantes et matières organiques. L'adaptation de la SPIR à l'analyse des fourrages et matières organiques permettrait une caractérisation plus fréquente et précise de leurs constituants afin de pouvoir optimiser leur gestion et leur valorisation.

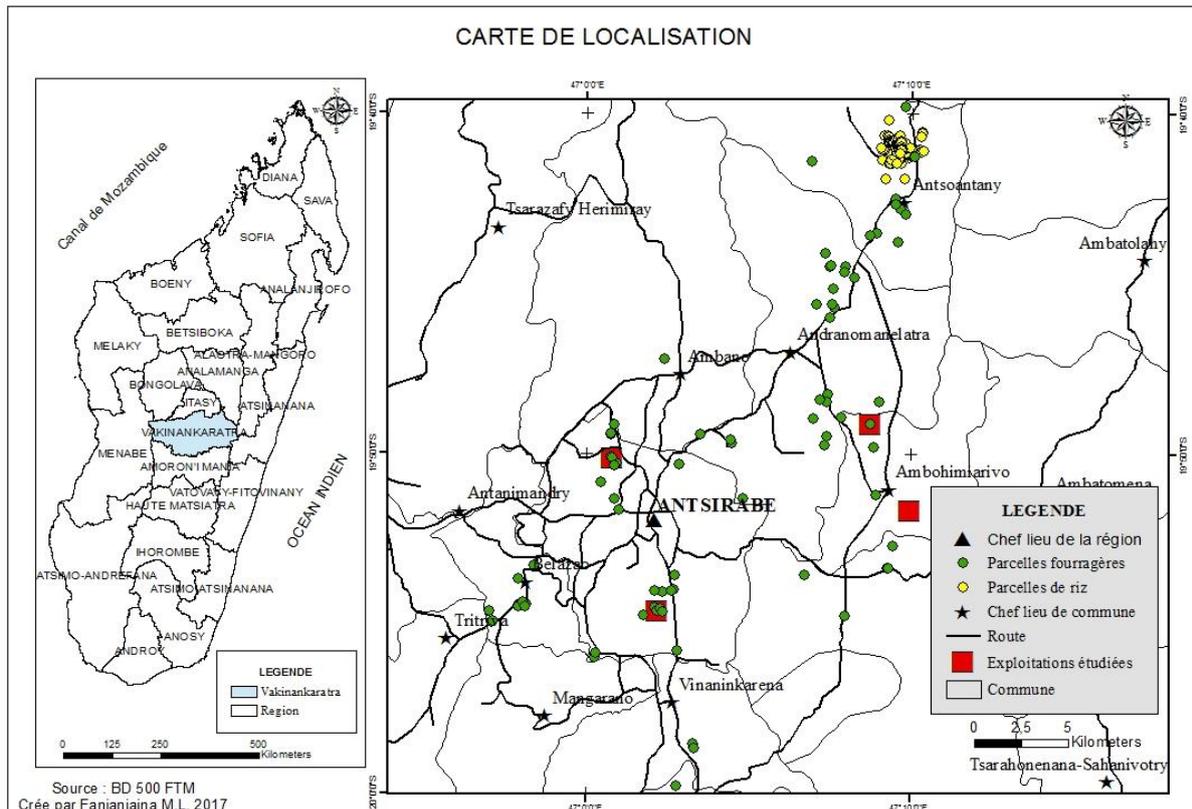
La SPIR a également rarement été utilisée en zone tropicale pour la caractérisation des biomasses agricoles, en particulier à Madagascar. En effet, pour Madagascar, les études initiées sur l'utilisation de la SPIR se rapportent principalement sur la caractérisation des teneurs organiques et des propriétés physico-chimiques des sols (Rabenarivo, 2011 ; Rabenarivo, 2013 ; Ramaroson, 2017 ; Rakotovao, 2017). Par contre, les travaux sur des biomasses sont limités, hormis les travaux de Rabetokotany (2013) sur diverses matières organiques exogènes issues de l'élevage et de la ville. Ces derniers travaux intègrent quelques détermination de teneurs en macronutriments (P, K, Ca, Mg) et micronutriments (Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Cd). Aucune étude n'a été trouvée pour la caractérisation des éléments minéraux N, P, K, Ca et Mg de biomasses agricoles (riz, fourrages). Il y a, donc, un fort intérêt à tester ces méthodologies sur le contenu minéral des principales cultures et fumiers de Madagascar. Cette étude des biomasses agricoles grâce à la SPIR étant un enjeu majeur des partenaires du projet BIOVA (FIFAMANOR, CIRAD). Dans un tel contexte, l'objectif principal de ce travail est d'évaluer le potentiel de la SPIR pour estimer les concentrations de matières organiques (C, N), de nutriments (P, K, Ca, Mg, S et Cl) ainsi que de l'alcalinité (ANC) des biomasses végétales et animales dans le but d'une bonne gestion des ressources minérales à l'échelle des exploitation agricoles malgaches.

## **4.2. Matériels et méthodes**

### **4.2.1. Zone d'étude et échantillonnage**

Les échantillons ont été collectés auprès de fermes mixtes d'agricultures-élevage de la région Vakinankaratra (Figure 4-1). Ces échantillons sont constitués des parcelles de riz, de fourrages, et des fumiers qui ont servis à l'étude sur les transferts de fertilité et l'acidification (Cf. Chapitre 2). Ensuite, les échantillons collectés au niveau des quatre exploitations étudiées dans la partie flux de biomasses et de nutriments (cf. Chapitre 3) y ont été ajoutés. Il s'agit de divers produits agricoles, de concentrés utilisés dans les exploitations pour l'alimentation animale, d'échantillons de fumiers et de fourrages.

Au total quatre cent quatre-vingt-sept (n = 487) échantillons ont été utilisés pour cette partie, qui sont repartis comme suit : grains et pailles de riz (91 chacun), fourrages (166), fumiers (124) et concentrés (15). Les échantillons ont été séchés au four à 60°C et broyés à 5 mm avant les analyses.



**Figure 4-1 :** Localisation des parcelles de prélèvements.

#### 4.2.2. Analyses chimiques en laboratoire

Pour pouvoir construire des modèles pour chaque constituant, des analyses conventionnelles en laboratoire ont été effectués. Les analyses portent sur la totalité des échantillons collectés, pour lesquels les teneurs totales de C, N, P, K, Ca, Mg, S et Cl ont été déterminées à partir des analyses chimiques de routines détaillées dans les Chapitres 2 et 3. L'ANC a été également calculé.

### **4.2.3. Modélisation avec la SPIR**

#### **4.2.3.1. Analyses spectrales**

Les spectres dans le proche infrarouge ont été mesurés avec un spectromètre SPIR LabSpec®4 (Analytical Spectral Devices Inc.) sur les échantillons en poudre, présentés dans des coupelles, en mode réflectance. Les longueurs d'ondes vont de 350 à 2 500 nm. Les échantillons ont été scannés quatre fois. Les données chimiques déterminées par les méthodes de référence ont été ajoutées aux fichiers spectraux SPIR correspondants. Pour chaque type d'échantillons à prédire, les échantillons analysés en laboratoire ont été divisés aléatoirement en deux lots : un lot de calibration qui représente 70 % - 75 % de l'effectif total et un lot de validation pour les 25 – 30 % restants.

#### **4.2.3.2. Prétraitement des données spectrales**

Des prétraitements mathématiques ont été appliqués aux spectres bruts afin d'éliminer les effets des facteurs externes (taille des particules, etc.) durant les traitements de données spectrales ainsi que les bruits causés par la vibration des molécules d'eau. Les prétraitements des données spectrales choisis sont spécifiques à chaque élément à prédire. Dans certains cas, des modèles plus pertinents ont été obtenus avec des spectres bruts non traités. D'une manière générale, les prétraitements utilisés sont la SNV (*Standard Normal Variate*), le DT (*Detrend*), et/ou la combinaison des deux SNVD. La SNV est une transformation habituellement appliquée aux données spectroscopiques. Elle vise à corriger les effets d'interférences multiplicatives de la dispersion et de la taille des particules. Elle est appliquée aux spectres, individuellement, en enlevant la moyenne et en divisant par l'écart type du même spectre (Rinnan et al., 2009 ; Razafimahatratra, 2011). Le *Detrend* (DT) est une transformation qui cherche à éliminer les tendances non-linéaires dans les données spectroscopiques. Il est parfois utilisé en combinaison avec la SNV pour réduire le décalage de la ligne de base et la courbure des données spectrales.

Dans notre étude, seule la partie spectrale 1 100 - 2 500 nm a été utilisée pour la modélisation car les résultats sont généralement meilleurs avec cette plage spectrale. L'analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée pour vérifier l'homogénéité spectrale de la base de données.

#### 4.2.3.3. Elaboration des modèles de prédiction

La régression linéaire du moindre carré partiel ou *Partial Least Squares* (PLS) a été utilisée pour les traitements statistiques des données. La régression selon les moindres carrés partiels (PLS) est actuellement une méthode parmi les plus employées dans le domaine de la spectroscopie infrarouge. Pour chaque constituant (C, N, P, K, Ca, Mg, S, Cl), un modèle avec la totalité des échantillons (mélange de tous les types d'échantillons, nommé « *mixdata* »,  $n = 487$ ) a été élaboré dont 325 échantillons ont constitué le lot de calibration et 162 échantillons le lot de validation. Deux types de calibrations ont été testés et comparés en utilisant l'ensemble des échantillons. Il s'agit de la calibration en GLOBAL et de la calibration en LOCAL.

La calibration en GLOBAL est la méthode d'étalonnage la plus classique qui consiste à établir une relation entre la variable à prédire ( $y$ ) et les variables explicatives ( $x_1$  à  $x_p$ ) correspondant aux différentes longueurs d'onde en faisant appel aux méthodes de régression linéaire multiple.

Pour la calibration en LOCAL, il n'y a pas d'équation ou de modèle à la fin de l'étape d'étalonnage, seule une base de données spectrales et les paramètres utiles à la régression PLS sont nécessaires pour prédire de nouveaux échantillons en routine, chaque spectre étant associé à une valeur du paramètre  $y$  (Genot, 2014). En prédiction, lorsqu'un nouveau spectre est saisi, il est comparé à la base spectrale et les spectres dont il est le plus proche servent à la réalisation d'une régression PLS. Cette méthode permet de prendre en compte la non-linéarité de la relation entre le paramètre étudié et la réponse spectrale (Genot et al., 2014 ; Rabenarivo, 2013).

La calibration en GLOBAL avec les lots de calibration et de validation a été réalisée avec le logiciel Unscrambler 10.3 (CAMO Software SA) et WinISI, tandis que la calibration en LOCAL a été réalisée avec WinISI uniquement parce que Unscrambler ne permet pas la réalisation de calibrations en LOCAL.

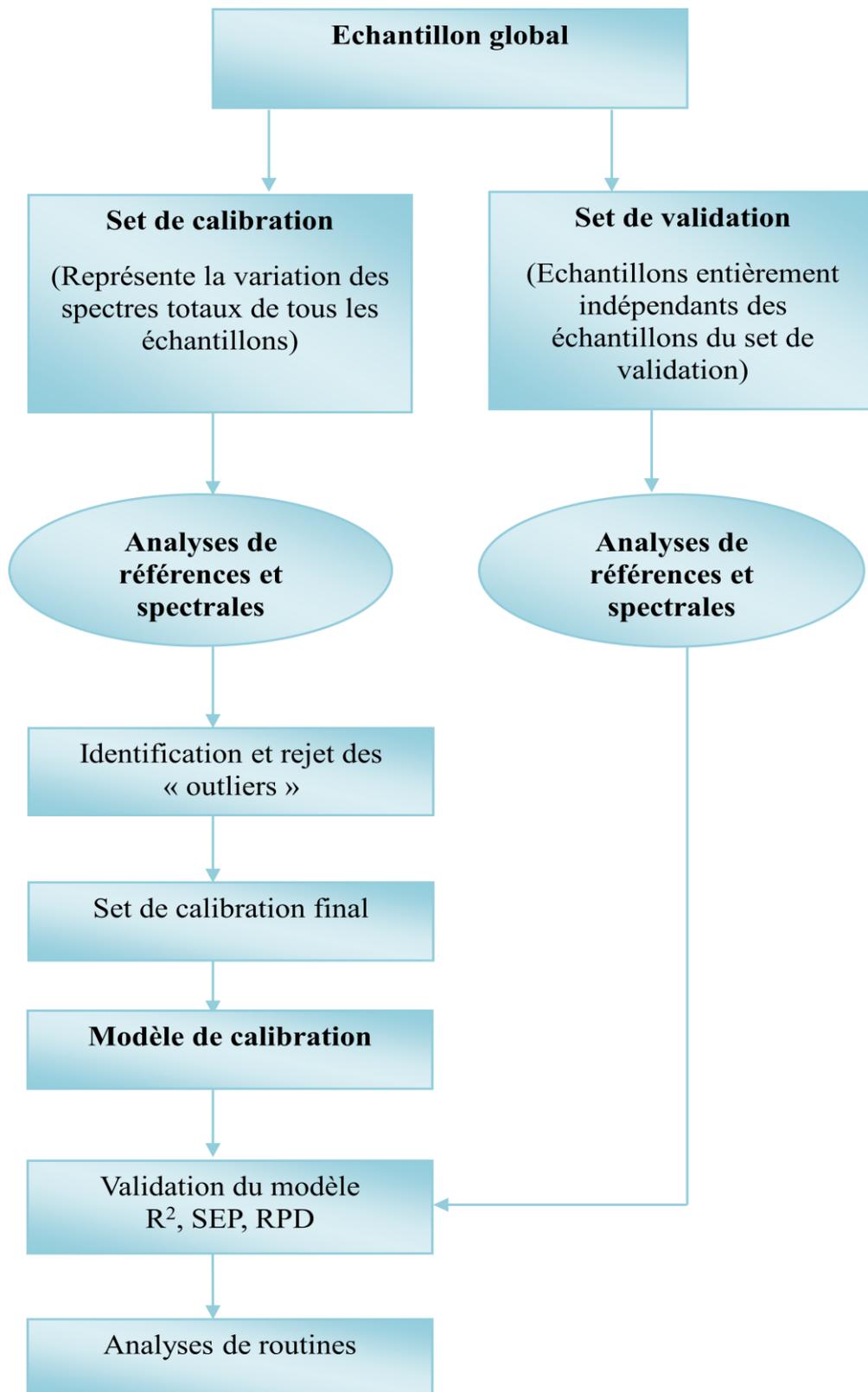
Des modélisations de chaque constituant pour chaque type d'échantillons (fourrage, fumier, grains, pailles) ont été également effectuées. Les critères d'évaluation des modèles proposés diffèrent légèrement selon les auteurs (Tableau 4-1). Pour ce qui nous concerne, la qualité des modèles est appréciée à partir des résultats obtenus sur le set de validation, où nous considérons, de façon résumée, que le modèle est excellent  $0,8 \leq R_v^2 \leq 1,0$  et  $RPD_v > 2$ ; satisfaisant pour  $0,5 \leq R_v^2 < 0,8$  et  $1,4 < RPD_v < 2$  et, insatisfaisant pour  $R_v^2 < 0,5$  et un RPD

< 1,4. Les différentes étapes de l'application de la SPIR sont synthétisées dans la Figure 4-2 ci-dessous.

**Tableau 4-1** : Critères proposés par différents auteurs pour l'évaluation de la précision de la SPIR (d'après Nduwamungu et al., 2009).

<b>Précision</b>	<b>Critères d'évaluation</b>	<b>Références</b>
Excellente	$0,8 \leq R^2 \leq 1,0$ ; $RPD > 2$	Chang et al. (2001), Coûteaux et al. (2003)
Satisfaisante	$0,5 \leq R^2 \leq 0,8$ ; $1,4 \leq RPD \leq 2,0$	
Non acceptable	$R^2 < 0,5$ ; $RPD < 1,4$	
Excellente	$R^2 > 0,98$ ; $RPD > 8,1$ ; $RER > 41$	Martin et al.(2002)
Excellente	$RPD > 2$	Dunn et al.(2002), van
Acceptable	$1,6 \leq RPD \leq 2,0$	Vuuren et al.(2006)
Non acceptable	$RPD < 1,6$	
Excellente	$R^2 > 0,8$ ; $SEC/SD < 0,2$	Coûteaux et al.(2003)
Prédiction quantitative	$R^2 > 0,8$	
Estimation	$0,5 \leq R^2 \leq 0,8$	
approximative		
Non acceptable	$SEC/SD > 0,85$	
Acceptable	$RER > 6$	Islam et al. (2003)
Non acceptable	$R^2 < 0,5$	
Excellente	$R^2 > 0,95$ ; $RPD > 4$ ; $RER > 20$	Malley et al.(2004)
Réussie	$0,90 \leq R^2 \leq 0,95$ ; $3 \leq RPD \leq 4$ ; $15 \leq RER \leq 20$	
Modérément réussie	$0,80 \leq R^2 \leq 0,90$ ; $2,25 \leq RPD \leq 3$ ; $10 \leq RER \leq 15$	
Modérément utile	$0,70 \leq R^2 \leq 0,80$ ; $1,75 \leq RPD \leq 2,25$ ; $8 \leq RER \leq 10$	
Bonne	$R^2 > 0,81$ ; $0,70 \leq b \leq 1,1$ ; $RPD > 2$	Terhoeven-Urselmans et
Satisfaisante	$R^2 > 0,64$ ; $0,8 \leq b \leq 1,2$ ; $1,4 \leq RPD \leq 2,0$	al 2006)

$r^2$  : coefficient de détermination ; RPD : ratio de performance de déviation ; RER : ratio erreur de la série ; SEC : erreur standard de calibration ; SD : écart-type ;  $b$  : coefficient de régression.



**Figure 4-2** : Schéma de l'application de la SPIR.

### **4.3. Résultats**

#### **4.3.1. Statistiques descriptives des résultats d'analyses au laboratoire**

Les moyennes, écart-types et la fourchette de variation des résultats d'analyses de chaque constituant (C, N, P, K, Ca, Mg, S, Cl), ainsi que l'ANC, pour chaque groupe, sont présentés dans le tableau 4-2. Pour chaque constituant et quelques soit le groupe d'échantillons, une large variabilité des résultats est observée. Cette forte variabilité est due à plusieurs facteurs : les caractéristiques de chaque parcelle paysanne et le mode de gestion de chaque exploitation, les types de sols, la gestion de la fertilisation, les variétés et/ou espèces, le type d'échantillons.

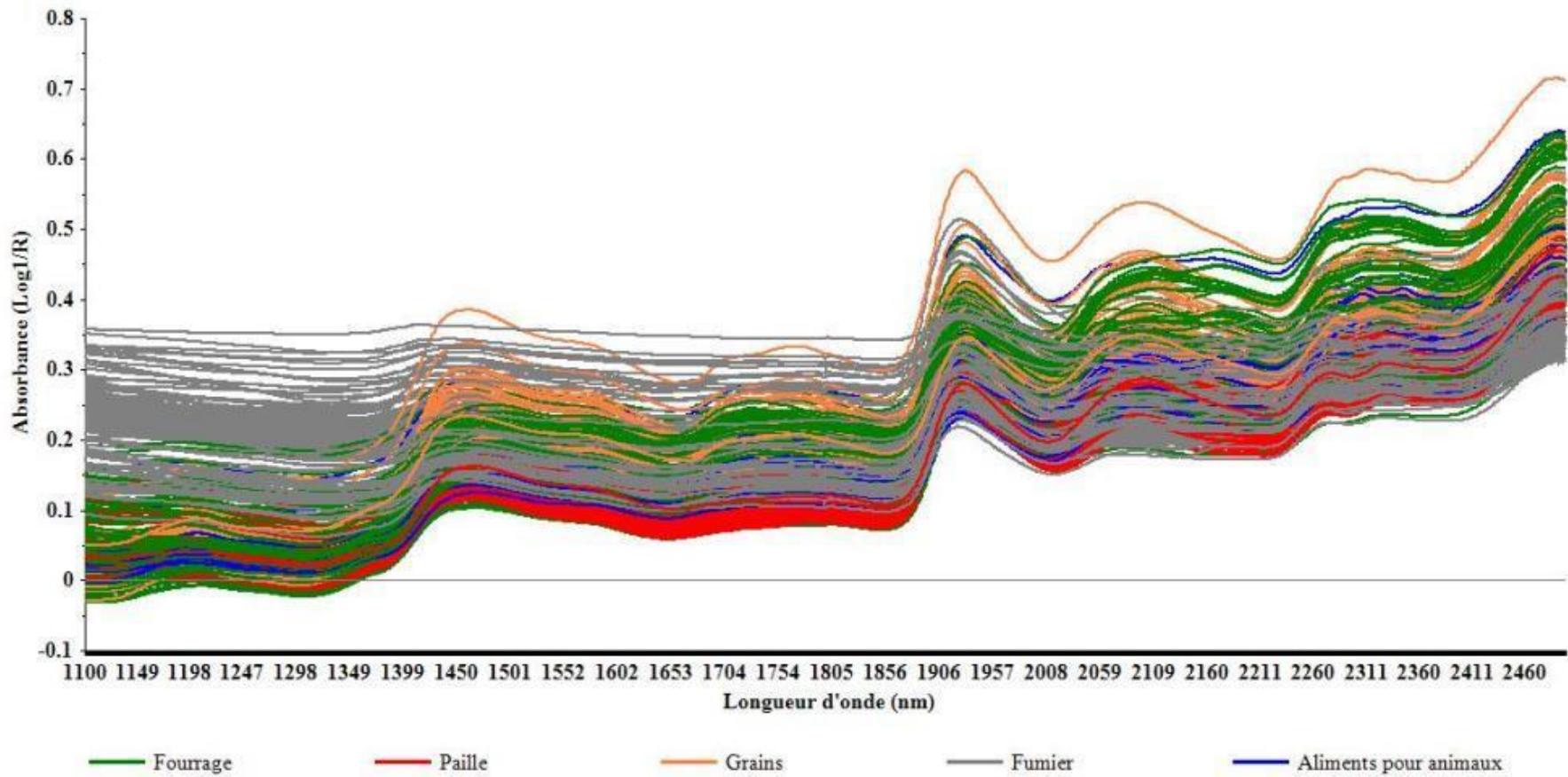
#### **4.3.2. Caractérisation spectrale des échantillons**

La Figure 4-3 montre les spectres de la totalité des échantillons séchés et broyés. Les bandes spectrales des différents composés biochimiques se recouvrent largement. Il n'y a pas de pics de référence spécifiques pour un élément donné. De ce recouvrement important des bandes découle la stratégie d'exploitation des données spectrales qui repose sur des méthodes chimiométriques.

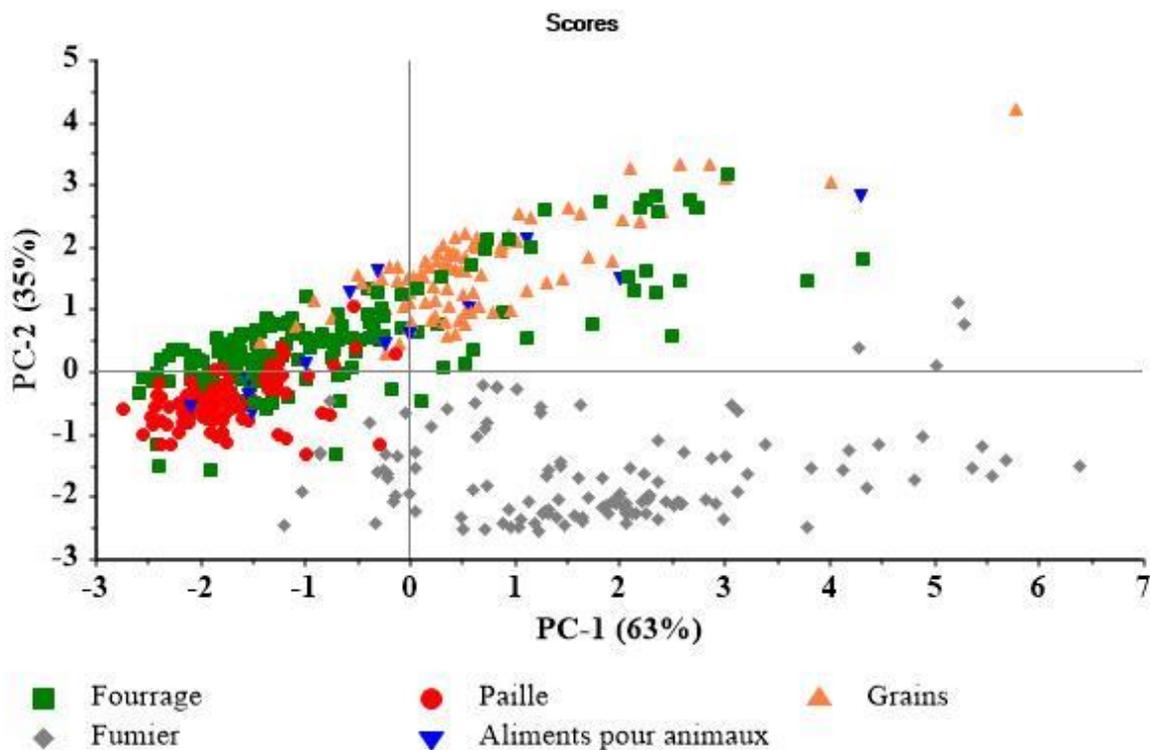
D'une manière générale, les spectres ont les mêmes allures et aucune différence évidente n'a été observée entre les groupes d'échantillons notamment pour les fourrages, grains et pailles. Le résultat de l'analyse en composante principale (Figure 4-4) permet d'expliquer 98 % de la variabilité des spectres, les axes PC-1 et PC-2 représentant 63 % et 35 % de cette variabilité, respectivement. Elle permet de distinguer différents types d'échantillons. Les spectres de la plupart des pailles, des fourrages et des aliments pour animaux sont relativement proches, avec des scores négatifs par rapport à l'axe PC-1. Ils se distinguent des grains, ainsi que de quelques fourrages et quelques aliments pour animaux, qui sont caractérisés par des scores positifs pour les axes PC-1 et PC-2. Enfin, les fumiers constituent un groupe de spectre tout à fait différent et éloigné des autres, avec des scores négatifs à la fois par rapport à PC-1 et PC-2.

**Tableau 4-2 : Résultats des analyses de références.**

		<b>C</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>K</b>	<b>S</b>	<b>Cl</b>	<b>ANC</b>
		g kg <sup>-1</sup> MS	cmol kg <sup>-1</sup>							
<b>MixData</b> <i>n=487</i>	<b>Moyenne</b>	364,68	13,93	2,02	3,71	2,14	12,37	1,06	2,72	40,61
	<b>Min</b>	81,83	2,33	0,03	0,20	0,30	0,20	0,04	0,11	-28,31
	<b>Max</b>	484,06	50,77	10,90	21,40	12,70	69,50	4,14	15,77	205,57
	<b>Ecart-type</b>	91,94	7,75	1,79	3,43	1,73	11,28	0,77	2,71	36,19
<b>Fourrages</b> <i>n=166</i>	<b>Moyenne</b>	404,86	17,13	2,50	4,27	3,11	21,88	1,58	4,55	64,27
	<b>Min</b>	277,57	3,00	0,40	0,70	0,40	1,80	0,18	0,18	-28,31
	<b>Max</b>	452,31	50,77	10,18	21,40	10,14	69,50	4,14	15,77	205,57
	<b>Ecart-type</b>	24,17	9,18	1,37	3,13	1,74	12,86	0,80	3,28	38,27
<b>Grains</b> <i>n=91</i>	<b>Moyenne</b>	413,93	12,53	1,72	0,93	1,03	2,75	0,29	0,57	5,66
	<b>Min</b>	383,50	4,97	0,40	0,20	0,30	0,90	0,10	0,11	-5,43
	<b>Max</b>	433,28	16,74	3,93	3,60	5,20	11,80	0,85	2,70	53,77
	<b>Ecart-type</b>	10,09	2,45	0,66	0,48	0,63	1,14	0,13	0,45	8,28
<b>Pailles</b> <i>n=91</i>	<b>Moyenne</b>	404,65	9,46	0,54	2,70	1,10	11,03	1,05	3,83	30,01
	<b>Min</b>	19,70	2,33	0,10	0,80	0,30	1,40	0,26	0,15	-1,87
	<b>Max</b>	469,70	32,56	2,60	6,40	2,30	23,10	2,00	6,70	76,99
	<b>Ecart-type</b>	47,73	6,03	0,50	0,99	0,46	4,92	0,43	1,62	15,66
<b>Concentrés</b> <i>n=15</i>	<b>Moyenne</b>	403,00	19,12	4,62	5,59	2,27	5,27	0,40	2,21	21,82
	<b>Min</b>	248,11	6,80	1,00	1,00	0,90	0,20	0,14	0,47	-19,30
	<b>Max</b>	484,06	47,36	9,30	16,10	3,80	11,30	0,71	5,69	68,73
	<b>Ecart-type</b>	59,84	13,92	2,09	4,56	0,93	3,61	0,21	1,41	22,05
<b>Fumier</b> <i>n=124</i>	<b>Moyenne</b>	257,86	14,58	3,03	6,67	2,88	9,57	1,20	1,08	51,60
	<b>Min</b>	95,54	5,65	0,13	1,22	0,49	1,77	0,04	0,13	2,44
	<b>Max</b>	429,46	35,65	10,90	20,20	12,70	36,80	2,85	4,06	181,15
	<b>Ecart-type</b>	102,18	6,37	2,60	4,61	2,16	7,28	0,69	0,83	35,74



**Figure 4-3 :** Spectres des différents types d'échantillons.



**Figure 4-4 :** Analyses en composantes principales des spectres.

### 4.3.3. Calibration et validation

#### 4.3.3.1 Modèle GLOBAL

##### 4.3.3.1.1. *Modèle GLOBAL sur l'ensemble des données*

Les résultats d'étalonnages présentés sont ceux correspondant aux meilleurs prétraitements, suite aux comparaisons réalisées pour divers prétraitements (spectre brut sans prétraitement, SNV, DT ou SNVD). Les Tableaux 4-3 et 4-4 montrent les statistiques de calibration et de validation pour la prédiction des matières organiques (C et N), des nutriments et de l'ANC des biomasses végétales (riz, fourrage, etc.) et animales (fumier) en utilisant les spectres de tous les échantillons collectés ( $n=487$ ). Le tableau 4-3 montre les résultats de la calibration en GLOBAL avec le logiciel WinISI tandis que le tableau 4-4 présente ceux obtenus avec le logiciel Unscrambler. D'une manière générale, les données sont peu différentes pour les deux logiciels, avec des résultats parfois meilleurs avec WinISI (C, N, K, S, Cl) et parfois meilleurs avec Unscrambler (Ca, Mg, ANC) en termes de validation tandis que pour P, les deux logiciels ont donné des résultats plus ou moins identiques.

En calibration, C et N présentent d'excellentes valeurs de  $R^2_c > 0,8$  et  $RPD_c > 2$  avec les deux logiciels comparés aux autres éléments ( $R^2_c = 0,89 - 0,91$  pour C et  $R^2_c 0,84 - 0,86$  pour N). De bonnes valeurs de  $RPD_c$  sont également observées pour ces deux éléments, avec, respectivement, 3,61 pour C et 2,88 pour N avec l'ensemble des données (Tableau 4-3). La validation externe montre aussi de très bonnes prédictions pour C ( $R^2_v = 0,90$  ;  $RPD_v = 2,93$ ), alors qu'elle est légèrement moins bonne pour N ( $R^2_v = 0,77$  ;  $RPD_v = 2,07$ ). Le modèle obtenu pour le C est donc satisfaisant ( $R^2_v > 0,8$  et  $RPD_v > 2$ ), alors qu'il est légèrement en dessous de cette limite pour N.

Des valeurs acceptables ont été obtenues pour P, Ca, Mg et K (P :  $R^2_c = 0,68$ ,  $RPD_c = 2$  ; Ca :  $R^2_c = 0,72$ ,  $RPD_c = 2,10$  ; K :  $R^2_c = 0,71$ ,  $RPD_c = 1,86$  ; S :  $R^2_c = 0,57$ ,  $RPD_c = 1,64$  (Tableau 4-3) ; Mg :  $R^2_c = 0,72$ ,  $RPD_c = 1,89$  (Tableau 4-4). Le Cl a cependant donné un  $R^2_c$  plus faible ( $R^2_c < 0,5$ ). En validation, P, K, S, Cl, Mg ont montré une performance satisfaisante avec un  $R^2_v$  variant de 0,59 à 0,72 et  $1,4 < RPD_v < 2$ . Ca est, cependant, mal prédit avec les deux logiciels ( $R^2_v = 0,38$ ). Les modèles obtenus pour les teneurs en P, K, S, Cl, Mg sont donc acceptables.

La prédiction de l'ANC des biomasses, à partir des spectres bruts, ont aussi permis d'obtenir des modèles acceptables avec un  $R^2_c = 0,66$ , un  $RPD_c = 1,85$ ,  $R^2_v = 0,63$ ,  $RPD_v = 1,43$  (Tableau 4-4).

**Tableau 4-3** : Résultats de la calibration globale avec WinISI.

Elément	Unité	Traitement	N	Set de calibration						Set de validation							
				n <sub>1</sub>	moyenne	SEC	R <sup>2</sup> <sub>c</sub>	SD	RPD <sub>c</sub>	N <sub>2</sub>	n <sub>2</sub>	moyenne	SEP <sub>c</sub>	R <sup>2</sup> <sub>v</sub>	SD	RPD <sub>v</sub>	Bias
C	g kg <sup>-1</sup>	D 1441	325	299	381,29	20,35	0,91	73,52	3,61	162	158	357,12	35,08	0,90	102,83	2,93	7,09
N	g kg <sup>-1</sup>	SNV 1441	325	310	14,12	2,62	0,86	7,53	2,88	162	157	12,21	3,19	0,77	6,61	2,07	0,48
P	g kg <sup>-1</sup>	SNV 1441	325	310	2,11	0,79	0,68	1,60	2,03	162	150	1,50	0,89	0,62	1,41	1,58	-0,17
Ca	g kg <sup>-1</sup>	SNV 1441	325	307	3,97	1,46	0,72	3,06	2,10	162	152	2,35	1,53	0,38	1,93	1,27	0,10
Mg	g kg <sup>-1</sup>	D 1441	325	313	2,42	0,84	0,65	1,59	1,89	162	160	1,31	1,04	0,31	1,22	1,18	-0,10
K	g kg <sup>-1</sup>	SNV 1441	325	317	12,71	5,40	0,67	10,76	1,99	162	157	9,83	4,50	0,72	8,45	1,88	-0,52
S	g kg <sup>-1</sup>	D 1441	325	312	1,10	0,44	0,57	0,72	1,64	162	155	0,80	0,37	0,61	0,59	1,59	0,02
Cl	g kg <sup>-1</sup>	SNV 1441	325	314	2,42	1,85	0,33	2,32	1,25	162	153	2,62	1,56	0,62	2,38	1,53	-0,05
ANC	cmol kg <sup>-1</sup>	SNV 1441	325	308	44,53	18,34	0,62	34,00	1,85	162	148	27,01	20,21	0,53	28,85	1,43	-3,57

SNV : standard normal variate, D : Detrend, SNVD : SNV+D ,N<sub>c</sub> : nombre d'échantillons en set de calibration, SEC : erreur standard de calibration, R<sup>2</sup><sub>c</sub> : coefficient de détermination en set de calibration, RPD<sub>c</sub> : rapport entre l'écart-type de la valeur mesurée et du SEC, N<sub>v</sub> : nombre d'échantillons en set de validation, SEP : erreur standard de prédiction, R<sup>2</sup><sub>v</sub> : coefficient de détermination en set de validation, RPD<sub>v</sub> : rapport entre l'écart-type de la valeur mesurée et du SEP.

**Tableau 4-4** : Résultats de la calibration globale avec Unscrambler.

	Set de calibration									Set de validation							
	Unité	Traitement	N <sub>1</sub>	n <sub>1</sub>	moyenne	SEC	R <sup>2</sup> <sub>c</sub>	SD	RPD <sub>c</sub>	N <sub>2</sub>	n <sub>2</sub>	moyenne	SEP <sub>v</sub>	R <sup>2</sup> <sub>v</sub>	SD	RPD <sub>v</sub>	Biais
<b>C</b>	g,kg <sup>-1</sup>	SNVD	325	318	359,31	31,43	0,89	95,96	3,05	162	156	384,47	26,98	0,87	74,75	2,77	-2,00
<b>N</b>	g,kg <sup>-1</sup>	SG 129	325	320	14,58	3,00	0,87	8,17	2,72	162	159	12,26	3,05	0,75	6,29	2,06	0,79
<b>P</b>	g,kg <sup>-1</sup>	SNVD	325	316	1,97	0,87	0,68	1,54	1,77	162	156	1,65	0,89	0,62	1,45	1,63	-0,01
<b>Ca</b>	g,kg <sup>-1</sup>	SG 129	325	316	3,83	1,65	0,78	3,54	2,15	162	158	3,01	1,47	0,51	2,11	1,44	0,06
<b>Mg</b>	g,kg <sup>-1</sup>	SG 129	325	316	2,03	0,75	0,71	1,38	1,84	162	161	2,10	1,04	0,68	1,85	1,78	-0,12
<b>K</b>	g,kg <sup>-1</sup>	D	325	317	11,88	5,63	0,71	10,48	1,86	162	158	11,61	5,98	0,58	9,44	1,58	1,24
<b>S</b>	g,kg <sup>-1</sup>	SNVD	325	320	1,04	0,43	0,63	0,71	1,65	162	159	1,01	0,50	0,52	0,73	1,45	0,03
<b>Cl</b>	g,kg <sup>-1</sup>	D	325	320	2,36	1,63	0,55	2,42	1,49	162	159	3,22	1,88	0,49	2,63	1,40	-0,12
<b>ANC</b>	cmol,kg <sup>-1</sup>	aucun	325	321	41,90	21,53	0,67	37,20	1,73	162	159	36,02	16,29	0,64	27,77	1,71	3,53

SNV : standard normal variate, D : Detrend,SNVD : SNV+D ; N<sub>c</sub> : nombre d'échantillons en set de calibration, SEC : erreur standard de calibration, R<sup>2</sup><sub>c</sub> : coefficient de détermination en set de calibration, RPD<sub>c</sub> : rapport entre l'écart-type de la valeur mesurée et du SEC, N<sub>v</sub> : nombre d'échantillons en set de validation, SEP : erreur standard de prédiction, R<sup>2</sup><sub>v</sub> : coefficient de détermination en set de validation, RPD<sub>v</sub> : rapport entre l'écart-type de la valeur mesurée et du SEP.

#### 4.3.3.1.2. *Modèle GLOBAL sur divers groupes de biomasses*

Les résultats présentés ne portent que sur les fourrages (Tableau 4-5), où le nombre de données est jugé suffisant pour avoir des modèles satisfaisants ou acceptables. Les modèles pour les autres biomasses (grains, pailles, etc.) ont été assez mauvais, en particulier au niveau de la validation, et ne sont pas présentés.

Pour les fourrages, les prédictions sont excellentes pour C, N et Mg ( $R^2_v = 0,81$  et  $RPD_v = 2,09$  pour C ;  $R^2_v = 0,93$  et  $RPD_v = 2,70$  pour N ;  $R^2_v = 0,83$  et  $RPD_v = 2,13$  pour Mg). Les prédictions sont également acceptables pour K ( $R^2_v = 0,74$  ;  $RPD_v = 1,91$ ) mais assez mauvaises pour les autres constituants.

Dans le cas des autres groupes de biomasses (pailles, grains), le nombre d'échantillons est relativement faible, notamment pour ce qui concerne le set de validation, ce qui peut être un facteur limitant. Par ailleurs, la diversité des échantillons de pailles et grains de riz est, probablement, insuffisante car la majorité des parcelles du riz proviennent du même village et/ou commune (Figure 4-1), avec, généralement, la culture de la même variété de riz par les paysans, d'où des spectres relativement identiques.

Les résultats sont également de mauvaise qualité pour les fumiers (résultats non présentés). Une validation croisée a cependant été testée pour le fumier (Tableau 4-6) au regard du relativement faible nombre d'échantillons ( $n = 124$ ). L'hétérogénéité de la qualité des fumiers d'une exploitation à une autre pourrait expliquer les résultats acceptables des modèles d'étalonnages des fumiers par rapport aux échantillons de riz (Tableau 4-6). Les modèles issus de la cross-validation ont montré des valeurs médiocres en calibration et en validation pour la plupart des constituants ( $R^2_{cv}$  de 0,6 à 0,7), excepté pour le P ( $R^2_{cv} = 0,85$ ,  $RPD_{cv} = 2,34$ ), le Ca ( $R^2_{cv} = 0,8$  ;  $RPD_{cv} = 2$ ). Le K présente, par contre, un  $R^2_{cv}$  très faible (0,35).

**Tableau 4-5 :** Performance des modèles de prédiction pour C, ANC et éléments minéraux des fourrages en calibration et validation.

	Unité	Traitement	Set de calibration				Set de validation			
			N <sub>c</sub>	SEC	R <sup>2</sup> <sub>c</sub>	RPD <sub>c</sub>	N <sub>v</sub>	R <sup>2</sup> <sub>v</sub>	SEP <sub>v</sub>	RPD <sub>v</sub>
C	g kg <sup>-1</sup>	SNV	124	10,15	0,84	2,57	41	<b>0,81</b>	8,46	2,09
N	g kg <sup>-1</sup>	Brut	124	2,61	0,92	3,65	42	<b>0,93</b>	3,53	2,70
P	g kg <sup>-1</sup>	SNV	124	0,80	0,54	1,49	43	0,28	1,05	1,61
Ca	g kg <sup>-1</sup>	SNV	124	1,78	0,73	1,97	41	0,30	1,37	1,19
Mg	g kg <sup>-1</sup>	SNV	124	0,85	0,77	1,95	43	<b>0,83</b>	0,77	2,13
K	g kg <sup>-1</sup>	SNV	124	7,32	0,71	1,83	43	0,74	5,97	1,91
S	g kg <sup>-1</sup>	SNV	124	0,61	0,42	1,35	41	0,38	0,58	1,27
Cl	g kg <sup>-1</sup>	Brut	124	2,30	0,47	1,38	41	0,42	2,76	1,30
ANC	cmol kg <sup>-1</sup>	aucun	124	23,51	0,45	1,36	42	0,20	29,53	1,13

SNV : standard normal variate, D : Detrend, SNVD : SNV+D ; N<sub>c</sub> : nombre d'échantillons en set de calibration, SEC : erreur standard de calibration, R<sup>2</sup><sub>c</sub> : coefficient de détermination en set de calibration, RPD<sub>c</sub> : rapport entre l'écart-type de la valeur mesurée et du SEC, N<sub>v</sub> : nombre d'échantillons en set de validation, SEP : erreur standard de prédiction, R<sup>2</sup><sub>v</sub> : coefficient de détermination en set de validation, RPD<sub>v</sub> : rapport entre l'écart-type de la valeur mesurée et du SEP.

**Tableau 4-6 :** Performance des modèles de prédiction du C, ANC, et éléments minéraux du fumier en cross-validation.

	Unité	Traitement	N	SEC	R <sup>2</sup> <sub>c</sub>	RPD <sub>c</sub>	SECV	R <sup>2</sup> <sub>cv</sub>	RPD <sub>cv</sub>
<b>C</b>	g kg <sup>-1</sup>	Brut	124	54,45	0,69	1,83	61,79	0,61	1,61
<b>N</b>	g kg <sup>-1</sup>	SNVD	124	2,86	0,78	2,14	3,27	0,71	1,87
<b>P</b>	g kg <sup>-1</sup>	Brut	124	0,95	0,85	2,63	1,07	0,81	2,34
<b>Ca</b>	g kg <sup>-1</sup>	SNVD	124	1,93	0,80	2,28	2,31	0,72	2,0
<b>Mg</b>	g kg <sup>-1</sup>	Brut	124	1,01	0,77	2,14	1,27	0,61	1,60
<b>K</b>	g kg <sup>-1</sup>	SNV	124	5,56	0,35	1,24	6,35	0,17	1,09
<b>S</b>	g kg <sup>-1</sup>	SNVD	124	0,35	0,73	1,99	0,40	0,66	1,05
<b>ANC</b>	cmol kg <sup>-1</sup>	Brut	124	20,35	0,62	1,65	23,55	0,50	1,42

SNV : standard normal variate, D : Detrend, SNVD : SNV+D ; N<sub>c</sub> : nombre d'échantillons en set de calibration, SEC : erreur standard de calibration, R<sup>2</sup><sub>c</sub> : coefficient de détermination en set de calibration, RPD<sub>c</sub> : rapport entre l'écart-type de la valeur mesurée et du SEC, N<sub>v</sub> : nombre d'échantillons en set de validation, SEP : erreur standard de prédiction, R<sup>2</sup><sub>v</sub> : coefficient de détermination en set de validation, RPD<sub>v</sub> : rapport entre l'écart-type de la valeur mesurée et du SEP.

#### 4.3.3.2 Comparaison modèles GLOBAL et LOCAL

La figure 4-5 présente les relations entre les valeurs obtenues par les méthodes analytiques de référence avec les valeurs prédites pour C et N avec la méthode de calibration en GLOBAL et en LOCAL. Pour le C, une légère amélioration de la prédiction est obtenue avec le modèle LOCAL en terme de  $R_v^2$  et  $RPD_v$  ( $R_v^2 = 0,91$ ,  $RPD_v = 3,39$ ) par rapport au modèle GLOBAL ( $R_v^2 = 0,90$ ,  $RPD_v = 2,93$ ), qui était déjà d'excellente qualité. Pour l'N, une augmentation des  $R_v^2$  et  $RPD_v$  est, également, constatée avec la calibration en LOCAL ( $R_v^2 = 0,81$ ,  $RPD_v = 2,23$ ) comparée à la calibration en GLOBAL ( $R_v^2 = 0,77$ ,  $RPD_v = 2,07$ ).

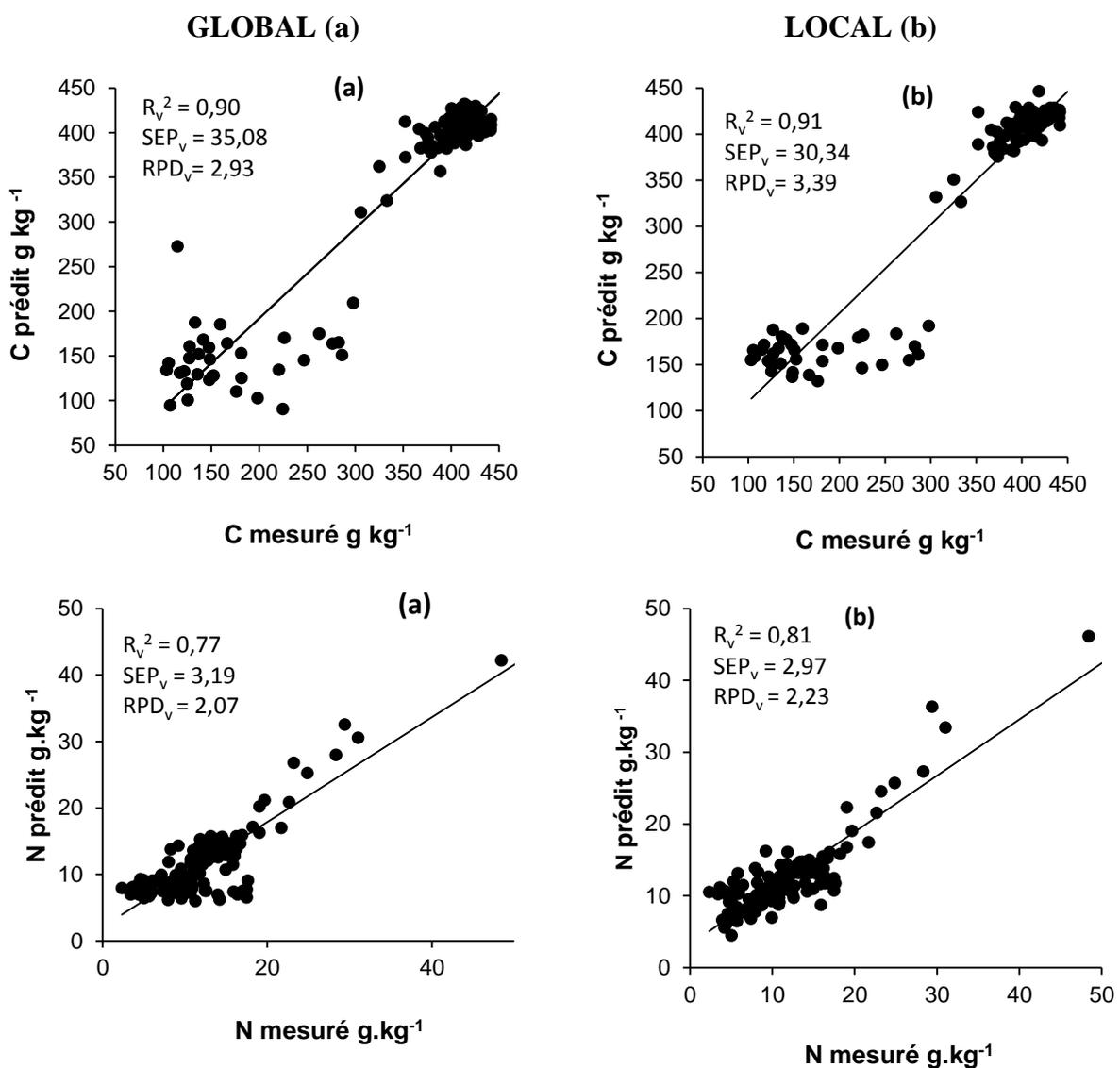
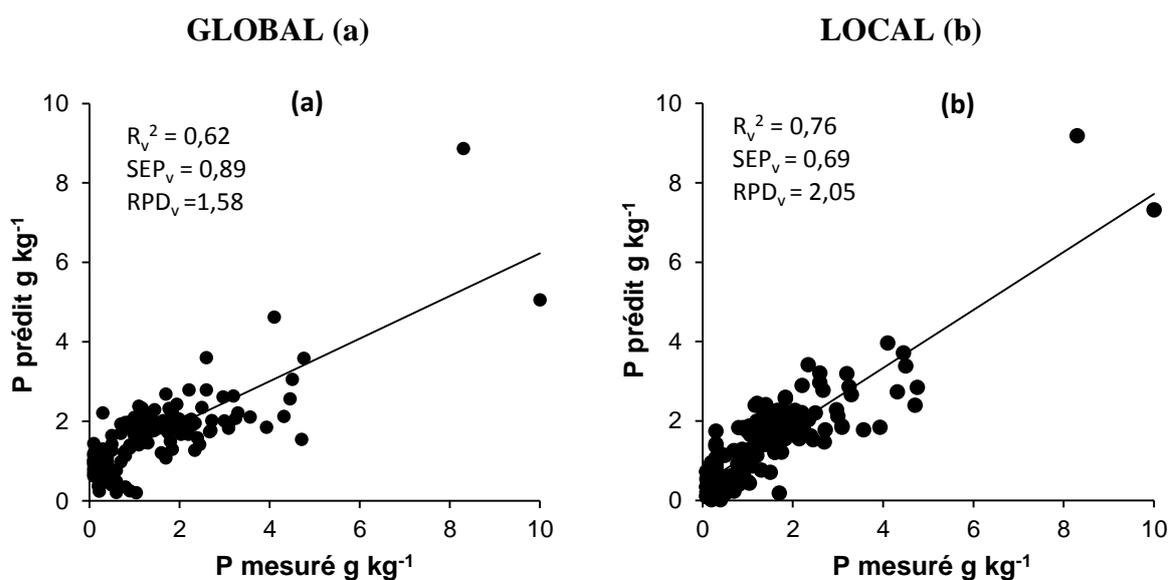
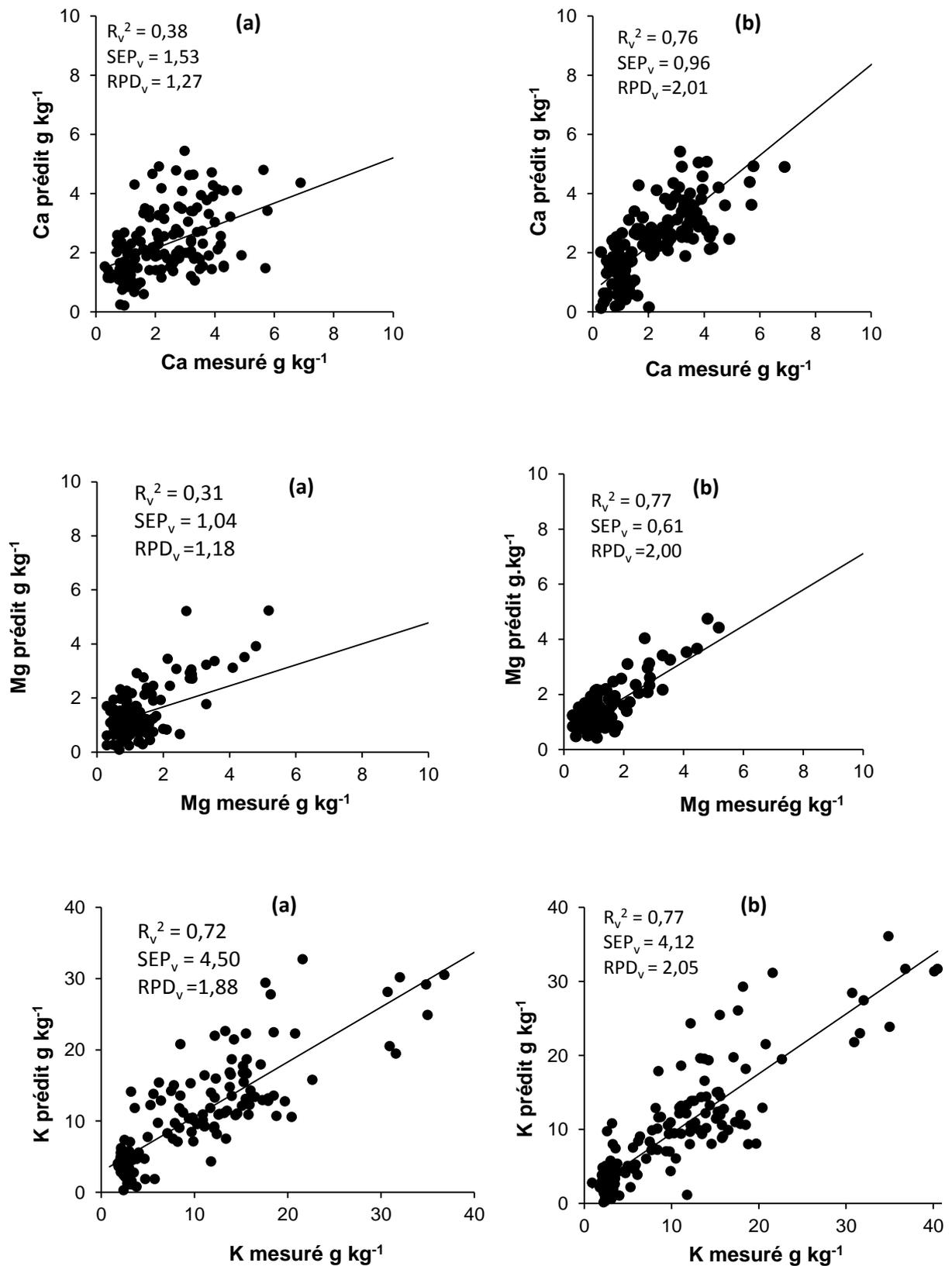


Figure 4-5 : Relation entre valeurs mesurées et prédites en GLOBAL et en LOCAL pour C et N.

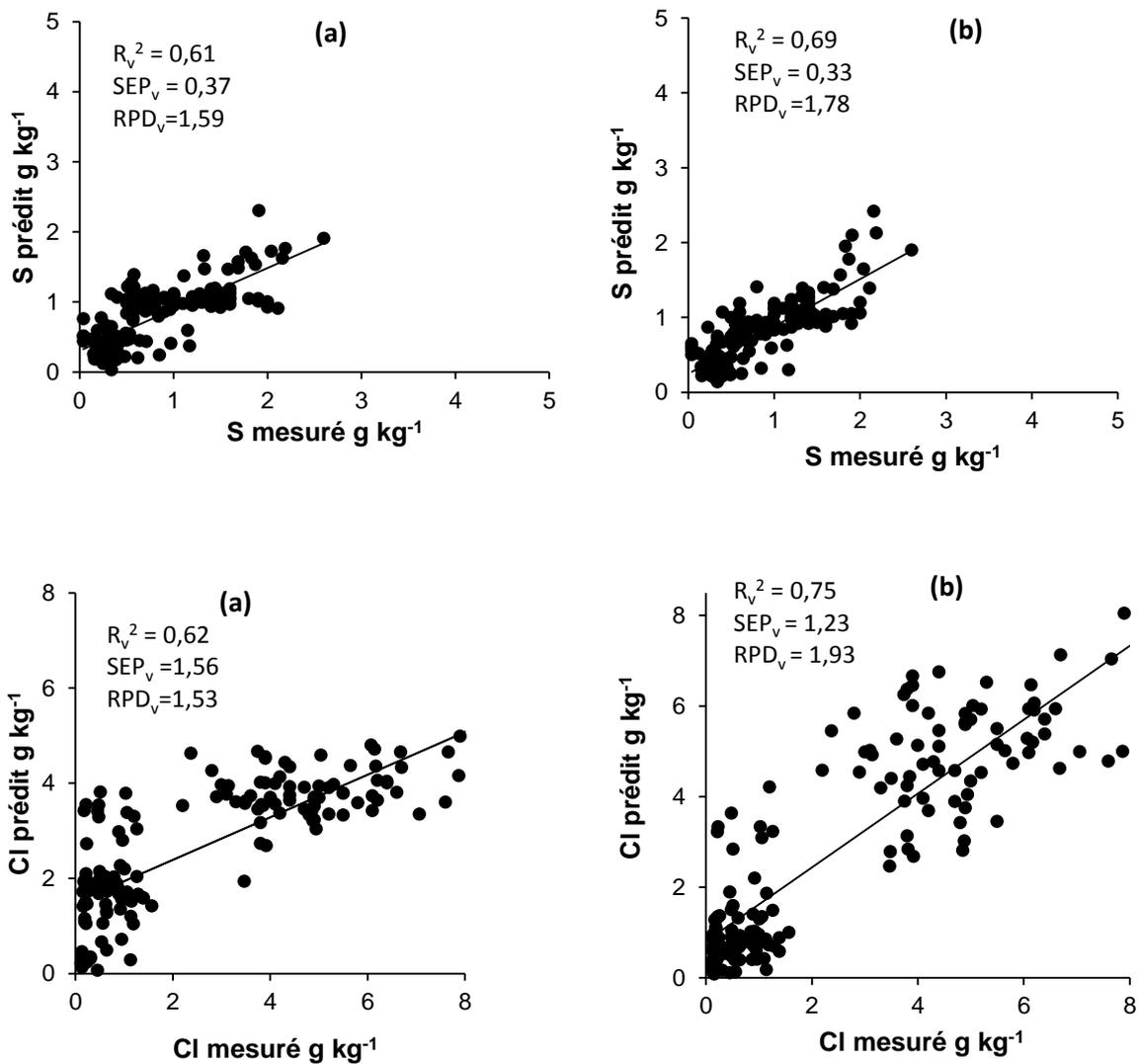
Des améliorations des valeurs de prédictions sont aussi obtenues pour tous les nutriments (P, Ca, Mg, K, S, Cl) (Figures 4-5, 4-6, 4-7 et 4-8). Pour P, K, S et Cl, ces améliorations sont relativement limitées ( $R^2_v = 0,76$  et  $RPD_v = 2,05$  en calibration LOCAL vs  $R^2_v = 0,62$  et  $RPD_v = 1,58$  en calibration GLOBAL pour P ;  $R^2_v = 0,77$  et  $RPD_v = 2,05$  en calibration LOCAL vs  $R^2_v = 0,72$  ;  $RPD_v = 1,88$  en calibration GLOBAL pour K ;  $R^2_v = 0,69$  ;  $RPD_v = 1,78$  en calibration LOCAL vs  $R^2_v = 0,61$  ;  $RPD_v = 1,59$  en calibration GLOBAL pour S et,  $R^2_v = 0,75$  ;  $RPD_v = 1,93$  en calibration LOCAL vs  $R^2_v = 0,62$  ;  $RPD_v = 1,53$  en calibration GLOBAL pour Cl). La différence entre les deux types de calibration sont beaucoup plus remarquables avec Ca et Mg car le  $R^2_v$  a augmenté d'une manière importante, allant de  $R^2_v = 0,38$  pour Ca et  $R^2_v = 0,31$  pour Mg avec la calibration en GLOBAL jusqu'à un  $R^2_v = 0,76$  et  $R^2_v = 0,77$  avec la calibration en LOCAL pour Ca et Mg, respectivement. Les  $RPD_v$  ont augmenté de 1,27 (GLOBAL) à 1,93 (LOCAL) pour Ca et de 1,18 (GLOBAL) à 2,0 (LOCAL) pour Mg.



**Figure 4-6 :** Relation entre valeurs mesurées et valeurs prédites en calibration GLOBAL (a) et LOCAL (b) pour P.

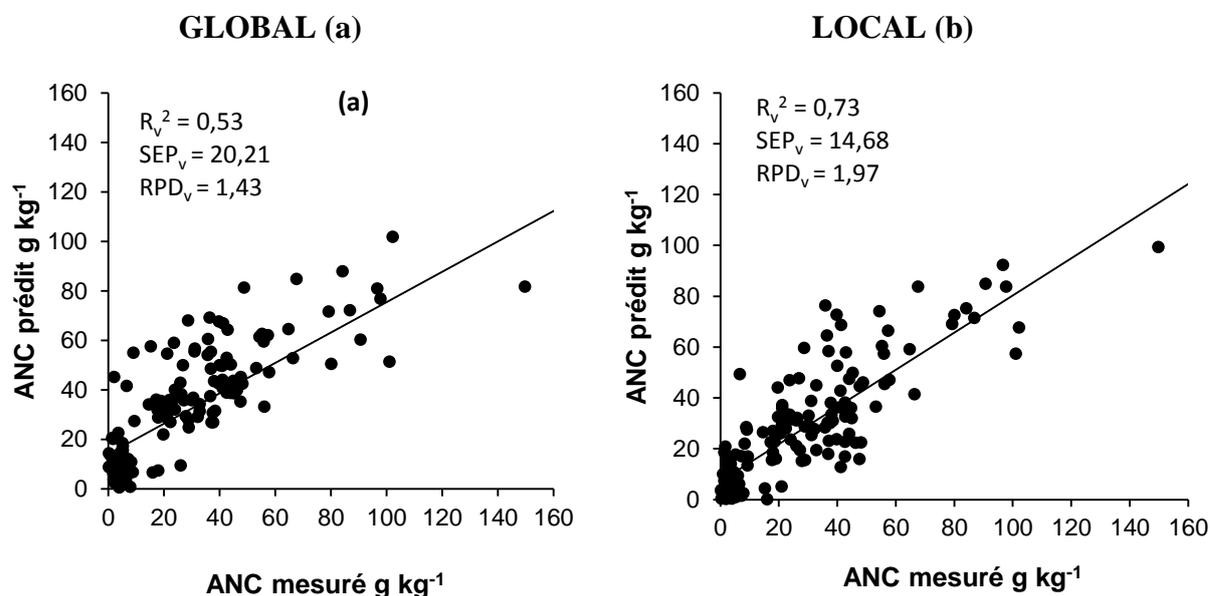


**Figure 4-7 :** Relation entre valeurs mesurées et valeurs prédites en calibration GLOBAL (a) et LOCAL (b) pour Ca, Mg et K.



**Figure 4-8 :** Relation entre valeurs mesurées et valeurs prédites en calibration GLOBAL (a) et LOCAL (b) pour S et Cl.

Pour l'ANC, la précision du modèle a également été améliorée en calibration LOCAL ( $R_v^2 = 0,53$ ,  $RPD_v = 1,43$  en calibration GLOBAL vs  $R_v^2 = 0,73$ ,  $RPD_v = 1,93$  en calibration LOCAL) (Figure 4-7).



**Figure 4-9 :** Relation entre ANC mesurée et prédite en calibration GLOBAL (a) et LOCAL (b).

#### 4.4. Discussion

##### 4.4.1. Données disponibles

D'une manière générale, les meilleurs résultats en termes de calibration et prédiction sont obtenus avec le C et N. Les modèles établis pour les autres éléments (P, Ca, Mg, K) et l'ANC sont, cependant, acceptables. Le S et Cl présentent des valeurs en  $R^2$  et RPD généralement plus faibles. Toutefois, des améliorations de ces modèles peuvent être attendues.

Une première raison de certains résultats médiocres pourraient être dû, en partie, à la qualité des analyses de références, en particulier pour S et Cl, pour lesquels les méthodes de références utilisées, la turbidimétrie pour S et l'argentimétrie pour Cl, ne sont peut-être pas excellentes. La détermination de ces deux éléments n'était pas encore pratiquée dans les laboratoires malgaches, ce qui nous a conduits à développer ces méthodologies au Laboratoire des RadioIsotopes et à faire des mises au point poussées pour obtenir des résultats

satisfaisants. Pour le dosage du sulfate, par exemple, des méthodes telles que la chromatographie ionique ou la spectrométrie d'émission atomique à plasma (ICP-AES) sont des méthodes plus performantes (Reisman et al., 2007). Néanmoins, la chromatographie ionique (pour S et Cl), l'ICP-AES (pour S) ou un analyseur élémentaire CHNS, qui pourraient analyser ces analyses, ne sont pas disponibles, à Madagascar, pour ces dosages.

Les modèles obtenus avec le regroupement de l'ensemble des biomasses ( $n = 487$ ) sont généralement les seuls à présenter des résultats satisfaisants. Les modèles obtenus sur des lots plus restreints et plus homogènes, comme les grains et pailles de riz (avec  $n = 91$  chacun), sont généralement (assez) mauvais du fait du faible nombre et de la faible diversité d'échantillons. Par contre, les modèles obtenus avec les données des fourrages ( $n = 124$ ) sont meilleurs qu'avec les pailles et grains de riz. En effet, les parcelles de fourrages ont des caractéristiques plus diversifiées et ont été collectés dans des communes différentes (Figure 4-2). Les échantillons de fourrages diffèrent, également, par les variétés (*Pennisetum*, *Bracharia*, *Setaria*, avoine, etc.), les stades phénologiques et les coupes, la gestion de la fertilisation (fumé ou non, avec ou sans engrais minéral, etc.). Le faible nombre et la faible diversité des échantillons sont donc susceptibles d'avoir des répercussions sur la modélisation, car les spectres utilisés pour la calibration sont plus ou moins similaires. En effet, une étude effectuée par Huang et al. (2009) sur des échantillons de pailles sur un lot plus important ( $n = 222$ ), beaucoup plus diversifié (24 provinces de Chine), et hétérogène, a permis d'obtenir des résultats satisfaisants pour K, Ca et Mg avec des  $R^2_c > 0,8$  et des  $RPD_c > 2$  et des prédictions satisfaisantes avec des  $R^2_v$  allant de 0,69 et 0,79 et des  $1,4 < RPD_v < 2$  pour Ca et K et  $RPD_v = 2,11$  pour Mg. Leur échantillonnage différait aussi par les types de sols, les modes de gestion de l'exploitation, les méthodes de récolte, les variétés. Leur base spectrale était, ainsi, plus robuste que celle de notre étude. Genot et al. (2014) confirment que la constitution, au sein de la population ou du territoire étudié, d'une collection d'échantillons représentative de la diversité de cette population ou de ce territoire est une étape clé de la réussite de la phase d'étalonnage des données. Un modèle prédictif basé sur un lot d'échantillons non représentatifs ne permettra pas de prédire de nouveaux échantillons parce qu'ils seront trop éloignés de la collection ayant servi à l'étalonnage.

Le manque de représentativité de l'ensemble de la diversité des échantillons est également mise en évidence par les graphes présentant les relations entre les valeurs mesurées et prédites (Figures 4-5, 4-6, 4-7, 4-8, 4-9). Il y a, parfois, une mauvaise distribution des données et/ou la présence de quelques points assez éloignés du groupe principal. Pour le C

(Figure 4-5), par exemple, on constate la présence de deux sous-groupes de données alors que des valeurs intermédiaires aux deux groupes, qui pourraient permettre d'améliorer davantage la courbe de corrélation, sont manquants. Dans le cas de N, P, Ca ou Mg, on observe des points assez éloignés, particulièrement riches en ces éléments (ces points n'étant pas des *outliers* spectraux). En effet, la modélisation est beaucoup plus facile si les spectres du groupe d'échantillons ont les mêmes caractéristiques mais qu'ils sont représentatifs en incluant et présentent une large gamme de valeurs de références (Gillon et al., 1999). A partir de ce constat, il est important d'établir des bibliothèques spectrales associant les valeurs de références pour différents constituants de biomasses et les spectres proches infrarouges d'une large gamme d'échantillons présentant une variabilité suffisante. Ces bases de données spectrales pourraient être ensuite utilisées par toutes les structures de recherche et les laboratoires de routine travaillant sur un même territoire (Shepherd et al., 2002 ; Genot et al., 2014).

#### 4.4.2. Comparaison des modèles GLOBAL et LOCAL

Les résultats, tant en terme de  $R^2_v$  que de  $RPD_v$ , ont montré que la qualité de la prédiction est meilleure avec la calibration en LOCAL, quel que soit le type de constituant. En effet, l'approche avec la calibration en LOCAL a amélioré les  $R^2_v$  et  $RPD_v$  pour la majorité des constituants (N, P, K, S, Cl) ainsi que pour l'ANC, avec des gains de 5 à 27 % pour les  $R^2_v$ . Le Ca et Mg ont été prédits avec succès en LOCAL avec une amélioration en  $R^2_v$  de 50 et 60 %, respectivement. Le C, qui était déjà très bien prédit par la méthode globale ne présente qu'un très léger accroissement du  $R^2_v$ .

Plusieurs auteurs ont rapporté l'exactitude<sup>9</sup> et la robustesse<sup>10</sup> des prédictions en LOCAL par rapport aux prédictions en GLOBAL sur des biomasses (Sinnaeve et al., 1994 ; Tran et al., 2010 ; Godin et al., 2015) ou des sols ( Rabenarivo et al., 2013). Sinnaeve et al. (1994) et Godin et al. (2015) ont aussi pu avoir un gain de 5-11 % en SEP avec la calibration en LOCAL. Tran et al. (2010) ont amélioré le  $R^2_v$  de 0 à 15 %. L'amélioration de l'étalonnage peut s'expliquer par le fait que cette approche peut mieux exploiter, à la fois, la non-linéarité des données en sélectionnant les échantillons qui présentent une gamme plus restreinte pour le paramètre analysé et la non-homogénéité des échantillons en utilisant l'information spectrale qui est similaire aux échantillons inconnus à analyser (Sinnaeve et al., 1994 ; Tran et al.,

---

<sup>9</sup> Exactitude : caractère d'un modèle juste, rigoureux, précis.

<sup>10</sup> Robustesse : caractère d'un modèle solidement construit.

2010). Elle permet également d'optimiser le nombre de facteur PLS par rapport à la GLOBAL (Tran et al., 2010).

La calibration en LOCAL constitue, ainsi, une méthode intéressante pour avoir plus de précision en matière de prédiction. Elle est probablement particulièrement bien adaptée lorsque les échantillons présentent une certaine hétérogénéité dans la distribution de leurs caractéristiques. Les limites pour son application peuvent être le fait que (i) seul le logiciel WinISI peut faire ce type de modélisation, alors qu'Unscrambler présente l'avantage d'être plus facile à utiliser et moins cher, (ii) il faut avoir beaucoup de données pour faire le modèle en LOCAL.

#### 4.4.2. Comparaison des données avec les études internationales

Dans ce paragraphe, les résultats obtenus sont comparés avec les études déjà effectuées sur la caractérisation des nutriments avec la SPIR. L'utilisation de la SPIR pour caractériser les minéralomasses sont, malheureusement, très fragmentaires (Schmitt et al., 2014) par rapport aux études portant sur les constituants organiques des biomasses (Peltre et al., 2011 ; Godin et al., 2015) ou sur l'application de la SPIR pour l'étude des sols (Soriano-Disla et al., 2014). De plus, outre ce manque de ressources bibliographiques, la plupart des anciennes études ont, le plus souvent, présenté uniquement les critères de calibration pour évaluer les modèles alors que cette approche reste limitée en terme de décision, en l'absence de critères de validation. En effet, normalement, un modèle devrait être également jugé sur sa capacité à prédire de nouveaux échantillons (set de validation indépendant ou *cross-validation* : si on a une bonne calibration et que l'on a une mauvaise validation, cela signifie que le modèle est insuffisant pour prédire un échantillon quelconque. Dans ce cas, le modèle ne présente que peu d'intérêt. Il est donc important de considérer les performances de prédiction ( $R^2_v$  et  $RPD_v$ ) et que le set de validation respecte, si possible, les critères  $R^2_v > 0,8$  et  $RPD_v > 2$ .

Pour C et N, les résultats obtenus dans cette étude ont montré des valeurs  $R^2_v > 0,8$  et  $RPD_v > 2$ , permettant de considérer les modèles spectraux comme une des alternatives rapide pour quantifier les flux de biomasses à l'échelle des exploitations agricoles comparés aux analyses conventionnelles. Ces résultats sont assez similaires à ceux généralement rencontrés dans la littérature pour ces constituants, avec en général des valeurs  $0,8 < R^2_v < 0,9$  (Peltre et al., 2011). Certains auteurs ont aussi présenté des résultats de calibration excellent, avec un

$R^2_c > 0,9$  pour C ou N (Joffre et al., 1992 ; Thuriès et al., 2005). Cependant, dans ces cas, les résultats de validation ne sont pas présentés (Joffre et al., 1992) ou sont très inférieurs aux résultats de calibration (Thuriès et al., 2005).

Pour les éléments minéraux, nous avons obtenu des modèles de prédiction acceptables pour P, Ca, Mg et K, avec des  $R^2_v$  entre 0,5 et 0,8 (souvent entre 0,7 et 0,8) ; et RPD entre 1,4 et 2, permettant leur utilisation pour calculer les flux de ces nutriments dans les exploitations agricoles malgaches. Seuls les modèles pour S et Cl sont encore mauvais et inutilisables. De nombreux résultats de la bibliographie sont souvent assez comparables aux nôtres voir plus faibles (Schmitt et al., 2014 ; van Maarschalkerweerd et Husted, 2015). Rabetokotany (2013), pour diverses matières organiques de Madagascar et de La Réunion présente des résultats inférieurs aux nôtres ( $R^2_v = 0,53$  pour P ; 0,39 pour Ca ; 0,60 pour Mg), hormis pour K ( $R^2_v = 0,89$ ). Ces résultats de prédiction des nutriments, rarement excellent, sont largement dus au fait que les éléments minéraux n'ont pas de bande d'absorption spécifique dans la région NIRS. En effet, la spectrométrie de réflectance NIRS est due aux liaisons C-H, N-H et O-H des composés organiques. Les modèles de prédiction des éléments minéraux dépendent donc surtout de la façon dont ces éléments minéraux sont corrélées avec les matières organiques des échantillons de biomasses (Reeves et al., 2002).

Pour l'ANC, nous n'avons trouvé aucune tentative de prédiction de ce paramètre dans la bibliographie. Cependant, ce paramètre étant largement lié à la teneur totale en éléments minéraux des biomasses, nous avons comparé nos résultats avec ceux de la littérature portant sur les teneurs en cendres. Le modèle obtenu dans cette étude, avec un  $R^2_v = 0,73$ , est meilleur que celui de Cozzolino et al. (2001) sur la détermination des teneurs en cendres des maïs fourrage ( $R^2_v = 0,64$ ) et similaire au  $RPD_v$  trouvé par Plans et al. (2012) cité par Schmitt et al. (2014) sur des grains d'haricots. Joffre et al. (1992) ont trouvé des valeurs élevées de  $R^2_c$  (0,95 - 0,98) pour la détermination des teneurs en cendres de différents échantillons de litières, mais sans présenter de résultats de validation. De même, Thuriès et al. (2005) ont obtenus d'excellentes calibrations ( $R^2_c = 0,88$ ), mais avec des résultats peu satisfaisants sur les échantillons de validation externe.

#### **4.5. Conclusion**

Le C et le N présentent une excellente précision quel que soit le jeu de données utilisé qu'il soit mélangé ou séparé par type de biomasse. Les modèles obtenus pour certains éléments minéraux ont été meilleurs avec le mélange de l'ensemble des divers types d'échantillons. Néanmoins, l'approche par type d'échantillons a pu améliorer la précision pour certains constituants (N, Mg), notamment dans le cas des fourrages où la diversité et le nombre d'échantillons ( $n = 166$ ) étaient suffisamment importants. Les études menées ont, cependant, donné des résultats acceptables ( $R^2_v$  de 0,69 à 0,77) et encourageants pour prédire les nutriments des biomasses animales et végétales. Par conséquent, la technique SPIR pourrait être utilisable en complément ou en remplacement des méthodes analytiques existantes et pourrait contribuer à mieux gérer les ressources minérales à l'échelle d'une exploitation. Cette étude a, également, permis d'avoir un aperçu sur la potentialité de la SPIR à prédire l'ANC des biomasses, une propriété qui est encore peu étudiée dans la littérature. Le modèle obtenu peut donc servir de *proxy* pour estimer le potentiel d'acidification/alcalinisation associé aux transferts des biomasses. Une seule acquisition spectrale peut donc suffire pour caractériser plusieurs constituants des biomasses.

Il a été constaté aussi que la calibration en LOCAL augmente très nettement le  $R^2_v$ , donc elle constitue une méthode intéressante à préconiser. Néanmoins, les échantillons utilisés dans le cadre de cette étude devraient être enrichis pour améliorer la qualité des résultats car des échantillons nombreux et diversifiés permettent de développer des modèles d'étalonnage robustes applicables à des échantillons prélevés sur de grandes zones géographiques (comme les Hautes Terres de Madagascar). Dans un premier temps, la synthèse de l'ensemble des données disponibles, dans la région d'étude, est vivement recommandée. Ensuite, d'autres acquisitions spectrales, avec des teneurs intermédiaires pour chaque constituant, afin d'avoir des données beaucoup plus représentatives de la diversité des biomasses, seraient également préconisées. Il est également nécessaire de disposer des données/résultats de laboratoire précis afin d'avoir des modèles de qualité. L'étape de calibration représente, ainsi, un travail analytique important, qui devrait être poursuivi si l'on souhaite disposer de modèles de prédiction robustes et adaptés à l'ensemble des conditions que l'on peut rencontrer sur le terrain dans la zone des Hautes Terres.

## **Conclusion générale, Perspectives, Limites**

---

## **Rappel du contexte de l'étude**

L'intégration de l'élevage dans les systèmes de culture est largement développée notamment sur les Hautes Terres malgaches. Face à la diminution de la fertilité des sols, gérer les ressources végétales pour trouver un compromis entre alimentation humaine, alimentation animale et retours aux sols de composés organiques et minéraux devient une nécessité pour gérer la fertilité des sols et évaluer la durabilité des systèmes de production. Dans des systèmes à faibles apports d'intrants, une connaissance précise des bilans minéraux, donc des transferts de fertilité, a été jugé indispensable pour une bonne gestion des ressources minérales à l'échelle de l'exploitation agricole. Des recherches portant sur la caractérisation des flux de nutriments et l'efficacité d'utilisation des nutriments ont été menées dans le cadre du projet BIOVA (Recyclage des BIOMasses Végétales et Animales dans les systèmes d'agriculture élevage). Pour cela, notre étude a été introduite afin d'apporter des informations sur la gestion des ressources organiques et minérales des exploitations paysannes d'agriculture-élevage et sur les transferts de fertilité (carbone, éléments minéraux) induits par l'affouragement à la ferme et les restitutions sous forme de fumier ou d'autres effluents d'élevage. Dans cette optique, l'utilisation de la SPIR pourrait être une des alternatives pour la caractérisation des biomasses, rapidement et à moindre coût, en raison des coûts élevés des analyses en laboratoire.

L'objectif général de cette thèse a été de caractériser les flux de biomasses et de nutriments à l'échelle d'exploitations mixtes d'agriculture-élevage du Vakinankaratra, afin de proposer des recommandations sur la gestion des matières organiques et sur la fertilité des sols. Elle consistait à évaluer, au niveau de la parcelle et de l'exploitation, les stocks et les flux de C, d'N, de P et de cations (calcium (Ca), magnésium (Mg), potassium (K)) au sein de la ferme.

## **Principales conclusions de l'étude**

Cette étude a permis de mieux comprendre le flux de biomasses et les flux de nutriments à l'échelle des exploitations mixtes d'agriculture-élevage. Les études bibliographiques menées ont permis de synthétiser les connaissances sur les caractéristiques des Hautes Terres malgaches, la place de l'intégration agriculture-élevage au sein des systèmes agricoles, la notion de transfert de fertilité. Cette première étape constituait aussi une occasion de présenter

les principales études sur l'utilisation de la spectrométrie infrarouge pour analyser les teneurs minérales des biomasses.

### ***Transfert de fertilité à l'échelle de la parcelle agricole***

La connaissance des transferts de fertilité, depuis la parcelle (sortie de nutriments *via* les récoltes) ou vers la parcelle (apports de nutriments *via* le fumier), est indispensable pour estimer la durabilité des systèmes et afin de mieux gérer les ressources minérales à l'échelle de l'exploitation agricole. Des échantillons de riz et de fourrage ont été recueillis sur soixante-dix parcelles de riz et quatre-vingt-onze parcelles de fourrages cultivés. Soixante-dix échantillons de fumier ont également été recueillis au niveau de diverses fermes. Les transferts d'éléments nutritifs induits par les récoltes (riz et fourrage) ont entraîné des exportations importantes de nutriments hors de la parcelle. Elles sont de 57 kg N ha<sup>-1</sup>, 6 kg P ha<sup>-1</sup> et 33 kg K ha<sup>-1</sup> lors de l'exportation des pailles et des grains de riz pour une production d'une année. Elles peuvent atteindre 115-160 kg N ha<sup>-1</sup>, 20-40 kg P ha<sup>-1</sup> et 110-230 kg K ha<sup>-1</sup> pour des fourrages produisant 10 t ha<sup>-1</sup> de matière sèche. Les parties végétatives des plantes, plus riches en N et K que les parties reproductrices (grain), contribuent pour une grande partie aux exportations de N et K, ce qui explique le rôle majeur des fourrages dans le transfert de ces éléments. L'alcalinité des cendres des échantillons, calculée comme la différence entre les teneurs en cations et en anions, était de 49-100 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> pour les cultures fourragères, 31 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> pour la paille de riz et seulement 4 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> pour les grains de riz. Les transferts de biomasses entraînent donc des pertes de nutriments importantes et, en raison de l'alcalinité des biomasses, une augmentation de l'acidité du sol. En raison de la faible efficacité de rétention des nutriments lors de la manipulation et du stockage du fumier, l'apport traditionnel de fumier à 5 tonnes MF ha<sup>-1</sup> est insuffisant pour équilibrer les pertes de nutriments dans les systèmes mixtes agriculture-élevage malgaches. En effet, 5 tonnes ha<sup>-1</sup> de fumier (à 50 % de matière sèche) n'apporte à la parcelle que 23 kg N ha<sup>-1</sup>, 1 kg P ha<sup>-1</sup> et 18 kg K ha<sup>-1</sup>. Ces apports par les fumiers ne permettent donc pas de compenser les exportations liées aux récoltes. Ces constats ont permis de valider la première hypothèse qui atteste que « Les transferts de biomasses et de nutriments entre les différents compartiments des systèmes de production agricole conditionne la fertilité des sols et l'acidification de diverses parcelles des exploitations agricoles ».

### ***Flux de biomasses et nutriments à l'échelle des exploitations agricoles***

L'étude sur les transferts de fertilité a été ramenée, à une échelle plus large, c'est-à-dire à l'échelle de l'exploitation agricole. Il a porté sur le calcul des bilans des éléments minéraux exportés ou importés à l'échelle de l'exploitation, ainsi que sur les flux de nutriments entre les diverses composantes du système de production (agriculture, élevage, ménage). L'étude menée sur quatre exploitations de la région du Vakinankaratra a permis de connaître les caractéristiques et fonctionnements globaux des exploitations mixtes d'agriculture-élevage de la région Vakinankaratra. Les premiers résultats sur la structure de chaque exploitation, les pratiques de fertilisation et d'alimentation ainsi que l'affectation des biomasses entre les différents sous-systèmes de la ferme (ménage, agriculture, élevage) ont permis d'élaborer la carte des flux de ressources auprès de chaque exploitation et d'analyser, par la suite, les flux de matières organiques (C et N) et nutriments (P, K, Ca, Mg). En résumé, ce chapitre a mis en évidence l'existence d'une grande diversité des pratiques des exploitations d'agriculture-élevage du Vakinankaratra. Les flux et les bilans en N, P, K, Ca, Mg varient en fonction de chaque exploitation, notamment selon la taille et les moyens. Globalement, la plus grande exploitation affiche des valeurs toujours élevées par rapport aux trois autres exploitations. Cette approche bilan a permis, également, de détecter un déséquilibre du système agricole du fait des transferts de biomasses et nutriments entre les systèmes d'agriculture et élevage mais qui ne sont pas compensés par l'apport du fumier (pour la majorité des exploitations). Les exportations par les récoltes (riz, fourrages) nécessitent un bon recyclage des biomasses (retour en nutriments) pour que le système reste durable. En effet, dans le cas de N et K, seulement 32 à 75 %, selon les exploitations, de ces éléments sont recyclés avec le fumier, le reste étant perdu. Ceci pourrait épuiser, petit à petit, les stocks en nutriments biodisponibles du sol. Il a été montré que les capacités de production (structure de l'exploitation, gestion de biomasses, pratiques des agriculteurs, fèces des animaux, engrais minéraux) influent énormément sur les transferts de biomasses entre les exploitations et sur les bilans minéraux. Ce qui amène à analyser l'équilibre du système et de l'exploitation dans son ensemble et de trancher sur sa durabilité. Par conséquent, la deuxième hypothèse disant que « Dans les exploitations intégrant agriculture-élevage, le suivi des flux de biomasses et de nutriments permet d'évaluer l'efficacité des transferts de fertilité au sein de l'exploitation agricole » a été validée.

## ***La spectrométrie infrarouge comme outil de caractérisation des plantes et matières organiques***

L'objectif de cette partie a été d'évaluer le potentiel de la SPIR pour estimer les concentrations de matières organiques (C, N), de nutriments (P, K, Ca, Mg, S et Cl) ainsi que de l'alcalinité (ANC) des biomasses végétales et animales dans le but d'une bonne gestion des ressources minérales à l'échelle des exploitation agricoles malgaches. Globalement, les modèles de prédiction des teneurs en C et N présentent une excellente précision, quel que soit les jeux de données utilisées, soit le mélange des données de l'ensemble des échantillons (pailles et grains de riz, fourrages de diverses espèces, fumiers, aliments concentrés pour le bétail), soit certains échantillons séparés par type de biomasse (fourrages seuls). Des résultats acceptables ( $R^2_v$  de 0,69 à 0,77) et encourageants ont été obtenus pour prédire les nutriments (P, K, Ca, Mg) des biomasses animales et végétales. Néanmoins, ces modèles de prédiction encourageants ont été obtenus grâce à la méthode de calibration en LOCAL obtenue par le logiciel WinISI, sur le mélange de l'ensemble des données étudiées. La méthode chimiométrique utilisée classiquement, la PLS (*Partial Least Square*) a par contre donné des résultats médiocres ou à la limite de l'acceptable pour les éléments minéraux ( $R^2_v$  de 0,47 à 0,62). Ces résultats mettent en évidence l'aptitude de la SPIR pour être utilisée en complément ou en remplacement des méthodes analytiques existantes, pour permettre de contribuer à mieux gérer les ressources minérales à l'échelle d'une exploitation. Cette étude a aussi permis de tester la possibilité de prédire l'ANC des biomasses, une propriété encore peu étudiée dans la littérature, qui peut servir de *proxy* pour estimer le potentiel d'acidification/alcalinisation associé aux transferts des biomasses. La troisième hypothèse a donc été validée pour une large part, même si des progrès sont encore à rechercher pour améliorer les modèles de prédiction proposés pour les éléments minéraux.

## **Limites et perspectives**

### ***Limites***

Face à la lourdeur des études de flux de matière organique et de nutriment, ainsi qu'aux coûts analytiques importants de ce type d'étude, l'acquisition de données de ce type à l'échelle de parcelles ou d'exploitations agricoles est limitée. Par exemple, en ce qui concerne le chapitre sur les flux de biomasses et de nutriments, les principales limites méthodologiques se résument comme suit : (i) des estimations des données sur les quantités de biomasses, parfois fondées à partir d'informations collectées auprès des agriculteurs, risquent d'être biaisées (sous-estimées ou sous-estimées) ; (ii) certains flux n'ont pas été pris en compte dans cette étude (pertes par érosion, lixiviation, déposition, pertes d'effluents d'élevage, etc.) ; (iii) le nombre limité d'exploitations étudiées (quatre) ne permet pas de refléter suffisamment la forte hétérogénéité des exploitations agricoles du Vakinankaratra. Néanmoins, dans un contexte peu documenté, cette étude fournit une approche intéressante pour évaluer/simuler des options d'amélioration de la durabilité des exploitations d'agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar. Ces calculs des bilans d'éléments nutritifs sont aussi des résultats utiles pour l'analyse de la gestion des ressources et de la fertilité des sols des exploitations d'agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar.

Une des spécificités de cette étude est l'utilisation de la SPIR pour caractériser les biomasses, qui correspond à un des objectifs majeurs du projet BIOVA, en vue de caractériser à moindre coût les ressources utilisables au sein des exploitations agricoles. Si un certain nombre d'études se sont intéressées aux biomasses végétales, elles sont peu nombreuses en Afrique et particulièrement à Madagascar. De plus, l'étude visant à déterminer les teneurs en nutriments est une étude à caractère exploratoire originale, car peu d'études ont travaillé sur les minéralomasses et encore moins dans le cas de Madagascar. Par conséquent, une première limite a été le manque de références bibliographiques sur la caractérisation des teneurs minérales des biomasses par la SPIR, notamment dans les pays tropicaux. Comme il a été mentionné dans les parties résultats, les modèles obtenus pour les pailles et grains de riz ont été assez mauvais, du fait notamment du manque de variabilité de l'échantillonnage.

### ***Perspectives***

Par rapport aux enjeux du développement durable, pour rendre plus productifs les systèmes de culture des agriculteurs, il est nécessaire aujourd'hui de mieux gérer et recycler

les biomasses produites sur les différentes parcelles. Cela passe par un changement de pratiques individuelles et collectives et une mobilisation des techniques permettant d'optimiser l'utilisation des biomasses. L'accompagnement des producteurs pourrait porter sur le développement des processus d'appropriation des techniques de recyclage de ces biomasses qui soient mieux adaptées aux capacités des agriculteurs.

Pour atteindre ces objectifs, il est indispensable d'avoir un nombre de référence suffisant sur le fonctionnement des exploitations (en agriculture-élevage ou autres) pour la région Vakinankaratra. Il serait en effet important de réaliser d'autres études qui prennent en compte plusieurs types d'exploitations avec des situations contrastées, avec des niveaux d'intensification différente. De plus, outre des exploitations en agriculture-élevage, il serait intéressant de pouvoir suivre des exploitations orientées plus exclusivement vers l'agriculture. Compte tenu de la quantité de travail et des coûts analytiques pour caractériser les biomasses et les minéralomasses, il est difficilement envisageable d'étudier un large échantillon d'exploitations avec des méthodes classiques.

Par contre, la SPIR pourrait répondre à ces difficultés, du fait de la rapidité et du coût limité des analyses. Des études similaires pourraient alors être envisagées en augmentant le nombre d'échantillons analysés et en élargissant le nombre de sites d'études. Néanmoins, pour utiliser la SPIR, il est indispensable de disposer de modèles chimométriques suffisamment fiables. Nos premiers résultats ont permis d'avoir des modèles de prédiction satisfaisant pour C et N ( $R^2_v > 0,8$ ). De même, des modèles acceptables ( $0,7 > R^2_v > 0,8$ ) pour divers éléments minéraux. Mais ces modèles peuvent peut-être encore être améliorés. Il est important d'avoir des échantillons plus représentatifs en intégrant plusieurs facteurs : mode de gestion, fertilisation, site d'étude, etc. car une certaine hétérogénéité dans le lot d'échantillon peut permettre d'obtenir de meilleurs modèles. Les divers partenaires scientifiques du projet BIOVA disposent d'échantillons partiellement analysés au niveau chimique, biochimique et/ou spectral. La synthèse des données disponibles et des compléments d'analyses, orientés vers des échantillons ayant des teneurs en C, N ou minéraux peu représentées dans nos modèles, devrait permettre d'améliorer les modèles proposés.

L'utilisation des modèles SPIR pour quantifier les teneurs de C, N et éléments minéraux pourrait alors permettre de quantifier les flux au niveau des exploitations agricoles à moindre coût et de disposer de références au niveau d'un nombre plus important d'exploitation présentant des caractéristiques typologiques variées. Le développement d'outils de

modélisations des flux, comme, par exemple, la *Network analysis*, pourrait alors permettre de mieux comprendre le fonctionnement des exploitations agricoles.

Enfin, notre étude a déjà montré que les systèmes de production actuels se traduisent en général par la perte de nutriments au niveau du compartiment agriculture. Un point clé pour expliquer la faible efficacité de recyclage des nutriments et, par conséquent, les risques de durabilité limitée de ces systèmes de production, est la qualité médiocre des fumiers. En particulier, ils sont particulièrement déficients en azote et potassium, les éléments les plus facilement lixiviables, alors que pour P, Ca et Mg, les bilans sont plus proches de l'équilibre. Une attention particulière à la fertilisation avec ces deux éléments est donc à prendre en compte. De plus, le développement de techniques pour améliorer la qualité des fumiers doivent être poursuivies et largement vulgarisées. Il n'en demeure pas moins, à l'échelle de l'exploitation, que certaines zones éloignées de la ferme risquent de s'appauvrir plus fortement au bénéfice des zones plus proches de l'exploitation. Dans ce cas, des risques d'acidification des sols à moyen terme ne sont pas à exclure. Ils se traduisent notamment par des risques de toxicité aluminique et une baisse de la disponibilité du phosphate pour les plantes. Une réflexion sur l'apport modéré d'amendements (matières organiques, cendres, dolomie, etc.) pour maintenir (voire augmenter le pH légèrement au-dessus de 5,5, si nécessaire) serait à engager.

## **Références bibliographiques**

---

- Ahmim-Richard A., Bodoy A., Penot, E., 2009. Caractérisation des exploitations agricoles et mise en place d'un réseau de fermes de référence dans le Vakinankaratra et l'Amoron'i Mania, Madagascar. Document de travail BV lac n°25, collection AFD. 49 p.
- Albrecht, R., Joffre, R., Gros, R., Le Petit, J., Terrom, G., Perissol, C., 2008. Efficiency of near-infrared reflectance spectroscopy to assess and predict the stage of transformation of organic matter in the composting process. *Bioresource Technology* 99, 448-455.
- Altieri, M.A., Nicholls, C.I., 2005. Agroecology and the search for a truly sustainable agriculture. United Nations Environmental Programme, Environmental Training Network for Latin America and the Caribbean, Mexico D.F., Mexico. 291 p.
- Alvarez, S., 2012. 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. Thèse de Doctorat. Université de Montpellier. 141 p.
- Andriarimalala, H.J., 2014. Etude floristique de *Brachiaria sp.*, *Chloris gayana*, *Pennisetum purpureum* et élaboration d'un modèle d'estimation de leur productivité par télédétection. Mémoire de DEA. Université d'Antananarivo. 89 p.
- Asekova, S., Han, S., Choi, H.J., Park, S.J., Shin, D.H., Kwo, C.H., Shannon, J.G., Lee, J.D., 2016. Determination of forage quality by near-infrared reflectance spectroscopy in soybean. *Agriculture and Forestry* 40, 45-52.
- Aufrere, J., Pelletier, P., Brandon, G., Hardy, A., Andueza, D., Dulphy J.P., Baumont, R., 2006. Prédiction de la digestibilité in vivo de la matière organique de foin de mélanges prairiaux par différentes méthodes de laboratoire. In: *Rencontres Recherches Ruminants* 13, p 105.
- Batten, G., 1991. Rapid determination of shoot nitrogen status in rice using near infrared reflectance spectroscopy. *Science Food Agriculture* 54, 191-197.
- Batten, G., Blakeney, A., Glennie-Holmes, M., Henry, R., McCaffery, A., Bacon, P., Heenana, D., 1998. An appreciation of the contribution of NIR to agriculture. *Near Infrared Spectroscopy* 6, 105-114.
- Bell, L.W., Moore, A.D., 2012. Integrated crop-livestock systems in Australian agriculture: trends, drivers and implications. *Agricultural Systems* 111, 1-12.
- Bénagabou, O.I., Kanwe, B.A., Vall, E., Vigne, M., Blanchard, M., 2013. Intégration agriculture-élevage et efficacité énergétique des exploitations mixtes au Burkina Faso. In : 20<sup>èmes</sup> Rencontres autour des recherches sur les ruminants, Paris, France, 4-5 décembre 2013. INRA, Institut de l'élevage. Paris : sn, 298.
- Bernal, M.P., Albuquerque, J.A., Moral R., 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology* 100, 5444-5453.

- Blanchard, M., Coulibaly, D., Ba, A., Sissoko, F., Pocard-Chappuis, R., 2011. Contribution de l'intégration agriculture-élevage à l'intensification écologique des systèmes agrosylvopastoraux : le cas du Mali-Sud. In : Partenariat, modélisation, expérimentations: quelles leçons pour la conception de l'innovation et l'intensification écologique? Actes du séminaire, Novembre 2011, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 12 p.
- Bockel, 2003. Filière riz et pauvreté rurale à Madagascar : déterminants d'une stratégie de réduction de la pauvreté rurale et politiques publiques de développement. Thèse de doctorat. Université de Metz. 423 p.
- Bolan, N.S., Hedley, M.J., White, R.E., 1991. Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume based pastures. *Plant and Soil* 134, 53-63.
- Bonaudo, T., Bendahan, A.B., Sabatier, R., Ryschawy, J., Bellon, S., Leger, F., Magda, D., Tichit, M., 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop-livestock systems. *Agronomy* 57, 43-51.
- Boudot, J.P., Becquer, T., Merlet, D., Rouiller, J., 1994. Aluminium toxicity in declining forests: a general overview with a seasonal assessment in a silver fir forest in the Vosges mountains (France). *Annales Science Forestières* 51, 27-51.
- Braun, A.R., Smaling, E.M.M., Muchugu, E.I., Shepherd, K.D., 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 n° 6. African Highlands Initiative AHI, Coordinating Office, ICRAF, Nairobi, Kenya, 149 p.
- Buerkert, A., Hiernaux, P., 1998. Nutrients in the West African Sudano-Sahelian zone: losses, transfers and role of external inputs. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde. Plant Nutrition and Soil Science* 161, 365-383.
- Cattan P., Letourmy P., Zagré B., Minougou A., Compaoré E., 2001. Rendement de l'arachide et du sorgho en rotation sous différents itinéraires techniques au Burkina Faso. *Cahiers Agriculture* 10, 159-172.
- Cécillon L., Barthès, B.G., Gomez, C., Ertlen, D., Genot, V., Hedde, M., Stevens, A., Brun, J.J., 2009. Assessment and monitoring of soil quality using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *Soil Science* 60, 770-784.
- Chang, C.W., Laird, D.A., Mausbach, M.J., Hurburgh, C.R., 2001. Near-infrared reflectance spectroscopy - Principal component regression analyses of soil properties. *Soil Science Society of America Journal* 65, 480-490.
- Chaumet, J. M., Delpeuch, F., Dorin, B., Gherzi, G., Hubert, B., Le Cotty, T., ... et Treyer, S., 2009. Agrimonde. Agricultures et alimentations du monde en 2050: scénarios et défis pour un développement durable. Rapport du groupe de travail Agrimonde. 205 p.

- Chianu, J.N., Chianu, J.N., Mairura, F., 2012. Mineral fertilizers in the farming systems of sub-Saharan Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 545-566.
- Clark, D.H., Cary, E.E., Mayland, H.F., 1989. Analysis of trace elements in forages by near infrared reflectance spectroscopy. *Agronomy* 81, 91-95.
- Clark, D.H., Mayland, H.F., Lamb, R.C., 1987. Mineral analysis of forages with near infrared reflectance spectroscopy. *Agronomy* 79, 485-490.
- Cobo, J.G., Dercon, G., Cadisch, G., 2010. Nutrient balances in African land use systems across different spatial scales: A review of approaches, challenges and progress. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 136, 1-15.
- Cochet, H., et Devienne, S., 2006. Fonctionnement et performances économiques des systèmes de production agricole: une démarche à l'échelle régionale. *Cahiers agricoles* 15, 578-583.
- Cordell, D., Drangert, J. O., White, S., 2009. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global environmental change* 19, 292-305.
- Corson, D., Waghorn, G.C., Ulyatt, M.J., Lee, J., 1999. NIRS: forage analysis and livestock feeding. In: *Proceedings of the New Zealand Grassland Association* 61, 127-132.
- Courtin, F., et Guengant, J.P., 2011. A Century of Settlement in West Africa. *Natures Sciences Sociétés* 19(3), 256-265.
- Couteaux, M.M., Berg, B., Rovira, P., 2003. Near infrared reflectance spectroscopy for determination of organic matter fractions including microbial biomass in coniferous forest soils. *Soil Biology and Biochemistry* 35(12), 1587-1600.
- Cozzolino, D. et Moron, A., 2002. Determination of macro elements in alfalfa and white clover by near-infrared reflectance spectroscopy. *Agricultural Science* 139, 413-423.
- Cozzolino, D., Fassio, A., Gimerez, A., 2001. The use of near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to predict the composition of whole maize plants. *Science of Food and Agriculture* 81, 142-146.
- Cozzolino, D., Moron, A., 2004. Exploring the use of near infrared reflectance spectroscopy to predict trace minerals in legumes. *Animal Feed Science and Technology* 111, 161-173.
- CPCS, 1967. Classification des sols, Commission de Pédologie et de Cartographie des sols. ENSA, Grignon, 96 p.
- Crozier C.R., Walls B., Hardy D.H., Barnes J.S., 2004. Response of cotton to P and K soil fertility gradients in North Carolina. *Cotton Science* 8, 130-141.
- Curtin, D., Wen, G., 2004. Plant cation-anion balance as affected by the ionic composition of the growing medium. *Plant and Soil* 267, 109-115.

- Deaville, E.R., Flinn, P.C., 2000. Near infrared (NIR) spectroscopy: an alternative approach for the estimation of forage quality and voluntary intake. In Givens, D.I., Owen, E., Axford, R.F.E., Omedi, H.M. (Eds.). Forage evaluation in ruminant nutrition. CABI Publishing, Wallingford, UK. pp. 301-320.
- Devendra et Thomas, 2002. Crop–animal interactions in mixed farming systems in Asia. *Agricultural Systems* 71, 27–40.
- Diarisso, T., Corbeels, M., Andrieu, N., Djamen, P., Tittonell, P., 2015. Biomass transfers and nutrient budgets of the agro-pastoral systems in a village territory in south-western Burkina Faso. *Nutrient Cycling Agroecosystem* 101, 295–315
- Dobermann, A., White, P.F., 1999. Strategies for nutrient management in irrigated and rainfed lowland rice systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 53, 1-18.
- Dryden, G.McL., 2003. Near infrared reflectance spectroscopy: Applications in deer nutrition. Rural Industries Research and Development Corporation. 46 p.
- Dugué P., Vayssières J., Chia E., Ouedraogo S., Havard M., Coulibaly D., Nacro H.B., Sissoko F., Sangare M., 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. Proceedings of the international symposium "Partenariat, Modélisation, Expérimentation: quelles leçons pour la conception de l'innovation & l'intensification écologique ?", Bobo-Dioulasso, Burkina-Faso, 15-17 Novembre, 18 p.
- Dugué, P., 1998. Les transferts de fertilité dus à l'élevage en zone de savane. *Agriculture et Développement* 18, 99-108.
- Dugué, P., Vall, E., Lecomte, P., Klein, H. D., Rollin, D., 2004. Evolution des relations entre l'agriculture et l'élevage dans les savanes d'Afrique de l'Ouest et du Centre-Un nouveau cadre d'analyse pour améliorer les modes d'intervention et favoriser les processus d'innovation. *Oléagineux, corps gras, lipides* 11(4-5), 268-276.
- Esilaba, A.O., Nyende, P., Nalukenge, G., Byalebeka, J.B., 2005. Resource flows and nutrient balances for crop and animal production in smallholder farming systems in Eastern Uganda. *Agriculture Ecosystems and Environment* 109, 192-201.
- FAO, 2001. *The Economics of Conservation Agriculture*. Roma, p. 66
- FAO, 2003. *Assessment of soil nutrient balance: approaches and methodologies*. FAO fertilizer plant nutrition bulletin 14, 15 p.
- FAO, 2012. FAOSTAT. <http://faostat.fao.org/default.aspx>.
- FAO, 2014. *FAO Statistical Yearbook 2014: Africa Food and Agriculture*. FAO, Regional Office for Africa, Accra.

- FAO/PAM, UNICEF Bénin, 2009. Analyse Globale de la Vulnérabilité, de la Sécurité Alimentaire et de la Nutrition (AGVSAN).
- FIFAMANOR, TAFA, GSDM, CIRAD, URP, SICALAIT, 2008. Conduite des systèmes de culture sur couverts végétaux et affouragement des vaches laitières. Guide pour les Hautes Terres de Madagascar. IMPRIM VERT Saint Denis. 92 p.
- Fronning, B.E., Thelen, K.D., Min, D.H., 2008. Use of manure, compost, and cover crops to supplant crop residue carbon in corn stover removed cropping systems. *Agronomy* 100, 1703-1710.
- Galloway, J.N., Townsend, A.R., Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J.R., Martinelli, L.A., Seitzinger, S.P., Sutton, M.A., 2008. Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science* 320, 889-892.
- Galvez-Sola, L., Morales, J., Mayoral, A.M., Marhuenda-Egea, F.C., Martinez-Sabater, E., Perez-Murcia, M.D., Bustamante, M.A., Paredes, C., Moral, R., 2010. Estimation of phosphorus content and dynamics during composting: Use of near infrared spectroscopy. *Chemosphere* 78, 13–21.
- Genot, V., Bock, L., Dardenne, P., Colinet, G., 2014. L'intérêt de la spectrométrie proche infrarouge en analyse de terre (Synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 18, 247-261.
- Giller, K.E., Rowe, E.C., de Ridder, N., van Keulen, H., 2006. Resource use dynamics and interactions in the tropics: Scaling up in space and time. *Agricultural Systems* 88, 8–27.
- Gillon, D., Houssard, C., Joffre, R., 1999. Using near-infrared reflectance spectroscopy to predict carbon, nitrogen and phosphorus content in heterogeneous plant material. *Oecologia* 118, 173-182.
- Girma K., Teal R.K., Freeman K.W., Boman R.K, Raun W.R., 2007. Cotton lint yield and quality as affected by applications of N, P, and K fertilizers. *The Journal of Cotton Science* 11, 12-19.
- Givens, D. I. et Deaville, E. R., 1999. The current and future role of near infrared reflectance spectroscopy in animal nutrition: a review. *Australian Journal of Agricultural Research*, 50, 1131-1145.
- Godin, B., Agneessens, A., Delcarte, J., Dardenne, P., 2015. Prediction of chemical characteristics of fibrous plant biomasses from their near infrared spectrum : comparing local versus partial least square models and cross-validation versus independent validations. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 23, 1-14.
- Gonzalez-Garcia, E., Gourdine, J.L., Alexandre, G., Archimede, H., Vaarst, M., 2012. The complex nature of mixed farming systems requires multidimensional actions supported by integrative research and development efforts. *Animal* 6, 763-777.

- Gourlez de la Motte, L., Jérôme, E., Mamadou, O., Beckers, Y., Bodson, B., Heinesch, B., Aubinet, M., 2016. Carbon balance of an intensively grazed permanent grassland in southern Belgium. *Agricultural and Forest Meteorology* 228, 370-383.
- Harris, F. M. A., 1998. Farm-level assessment of the nutrient balance in northern Nigeria. *Agriculture, ecosystems & environment* 71, 201-214.
- Hartemink, A.E., 2006. Assessing soil fertility decline in the tropics using soil chemical data. *Advances in Agronomy* 89, 179-225.
- 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., Sere, C., Rosegrant, M., 2010. Smart investments in sustainable food production: revisiting mixed crop-livestock systems. *Science* 327, 822–825.
- Hinsinger, P., Ndour, N.Y.B., Becquer, T., Chapuis-Lardy, L., Masse, D., 2017. Les enjeux liés au phosphore dans les sols tropicaux. In: Roose E. (Ed.). *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agroécologie*. IRD, Marseille. 712 p.
- Huang, C., Han, L., Yang, Z., Liu, X., 2009. Exploring the use of near infrared reflectance spectroscopy to predict minerals in straw. *Fuel* 88, 163-168.
- Huang, G., Han, H., Yang, Z., Wang, X., 2008. Bioresource technology evaluation of the nutrient metal content in Chinese animal manure compost using near infrared spectroscopy (NIRS). *Bioresource Technology* 99, 8164-8169
- INSTAT, 2011. Enquête Périodique auprès des Ménages 2010. EPM-2010, Rapport Principal. INSTAT. Antananarivo, Août 2011. 374 p.
- IUSS Working Group WRB, 2014. World reference base for soil resources. International soil classification system. In: *World Soil Resources Reports* 106. 203 p.
- Jahnke, H. E., & Jahnke, H. E., 1982. *Livestock production systems and livestock development in tropical Africa* 35. Kiel: Kieler Wissenschaftsverlag Vauk. 230 p.
- Joffre, R., Gillon, D., Dardenne, P., Agneessens, R., Biston, R., 1992. The use of near-infrared reflectance spectroscopy in litter decomposition studies. *Annales des Sciences Forestières* 49, 481-488.
- Kasprzyk, M., Penot, E., Dugué, P., 2008. Diversité des systèmes d'alimentation des troupeaux bovins laitiers à Betafo, Région du Vakinankaratra, Madagascar. Document de travail BV lac n°3 - Collection AFD, SEHMPO 10, 48 p.
- Kintche, 2011. Analyse et modélisation de l'évolution des indicateurs de la fertilité des sols cultivés en zone cotonnière du Togo. Thèse de Doctorat. Université de Bourgogne – rance université de Lomé- Togo Ecole doctorale E2S (UB) Laboratoire de Biologie végétale appliquée. 141 p.

- Kobayashi, R., Yamada, A., Hirooka, H., Tabata, Y., Zhang, J., Nonaka, K., Kamo, M., Hayasaka, K., Aoki, Y., • H..., Ogawa, M., Miyaji, M., 2010. Changes in the cycling of nitrogen, phosphorus, and potassium in a dairy farming system. *Nutrient Cycling Agroecosystem* 87, 295–306.
- Lal R., 2009. Soils and food sufficiency. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 113-133.
- Lawrence, P.R., Pearson, R.A., 2002. Use of draught animal power on small mixed farms in Asia. *Agricultural Systems* 71, 99–110.
- Lekasi, J.K., Tanner, J.C., Kimani, S.K., 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 and Environment* 94, 289-298.
- Lemaire, G., Franzluebbers, A., de Faccio Carvalho, P.C., Dedieu, B., 2014. Integrated crop–livestock systems: strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 190, 4-8
- Lhoste, P., Havard, M., Vall, E., 2010. La traction animale. Collection *Agricultures tropicales en poche*, CTA, Quae, Presses Agronomiques de Gembloux. 201 p.
- Lhoste, P., Richard, D., 1993. Contribution de l'élevage à la gestion de la fertilité à l'échelle du terroir. 10ème Journées du réseau érosion, Montpellier, 15-18/09/1993. p 463-489.
- Liao, H., Wu, J., Chen W., Guo, W., Shi, C., 2012. Rapid diagnosis of nutrient elements in fingered citron leaf using near infrared reflectance spectroscopy. *Plant Nutrition* 35, 1725-1734.
- Lila, M. et Furstoss, V., 2000. L'utilisation de la spectrométrie dans le proche infrarouge pour l'évaluation de la qualité des fourrages. *Fourrages* 161, 69-81.
- Machinet, G.E., 2009. Utilisation de la variabilité génétique du maïs pour évaluer le rôle de la qualité chimique des racines sur le processus de décomposition dans les sols. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, France. 207 p.
- Mandimbiniana, R., 2009. Risques climatiques et activités agricoles dans deux fokotany Amberobe et Antsampanimahazo dans la région du Vakinankaratra. Diplôme d'Etudes Approfondies en géographie. Université d'Antananarivo, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Département de Géographie. 45 p.
- Manlay, R., Ickowicz, A., 2000. Rôle de l'élevage dans la dynamique de la matière organique à l'échelle d'un terroir agro-pastoral de Haute-Casamance. La jachère en Afrique tropicale : Rôles, Aménagement, Alternatives, Floret, C. Pontanier, R. (Eds.). Actes du Séminaire international, Dakar, 13-16 avril 1999. p. 534-545.

- Manlay, R.J., Ickowicz, A., Masse, D., Floreta, C., Richard, D., Feller, C., 2004. Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget of a village in the West African savanna. I. Element pools and structure of a mixed-farming system. *Agriculture Systems* 79, 55-81.
- Mapfumo, P., Giller, K. E., 2001. Soil fertility management strategies and practices by smallholder farmers in semi-arid areas of Zimbabwe. ICRISAT/FAO, 2001.
- Mbow, M.A., Ngom, S., Diouf, M., Akpo, L.E., 2013. Prédiction de la qualité fourragère des feuilles de *Sterculia setigera* Del. par la méthode de la spectroscopie proche infrarouge (SPIR). *Journal of Applied Biosciences* 62, 4628–4636.
- McDermott, J.J., Staal, S.J., Freeman, H.A., Herrero, M., Van de Steeg, J.A., 2010. Sustaining intensification of smallholder livestock systems in the tropics. *Livestock Science* 130, 95-109.
- Minten B., Randrianarisoa, J.C., Randrianarison, L., 2003. Agriculture et pauvreté. In: *Agricultures, pauvreté rurale et politiques économiques à Madagascar*. INSTAT/FOFIFA. Antananarivo. 174 p.
- Murray, I., Cowe, A., 1992. Making light work: Advances in near infrared Spectroscopy. 4<sup>th</sup> International Conference on Near Infrared Spectroscopy, Aberdeen, Scotland, August 19-23, 1991. VCH, Weinheim. 652 p.
- Nandwa, S.M., Bekunda, M.A., 1998. Research on nutrient flows and balances in East and Southern Africa: state-of-the-art. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 71, 5-18.
- Naudin, K., Le Gal, P.Y., Ranaivoson, L., Scopel, E., 2015. Accompagner l'innovation en agriculture de conservation : quels apports des agronomes du système de culture ? *Agronomie, Environnement, Sociétés* 5, 39-46.
- Nduwamungu, C., Ziadi, N., Parent, L.E., Tremblay, G.F., Thuriès, L., 2009. Avantages et limites de l'application de la spectroscopie dans le proche infrarouge à l'analyse des sols : Un survol. *Canadian Journal of Soil Science* 89, 531-541.
- Noble, A.D., Randall, P.J., 1999. Alkalinity effects of different tree litters incubated in an acid soil of N.S.W., Australia. *Agroforestry Systems* 46, 147-160.
- Noble, A.D., Zenneck, I., Randall, P.J., 1996. Leaf litter ash alkalinity and neutralisation of soil acidity. *Plant and Soil* 179, 293-302.
- Norris, K. H., Hruschka, W. R., Bean, M. M., Slaughter, D. C., 1989. A definition of wheat hardness using near infrared reflectance spectroscopy. *Cereal foods world (USA)*.
- Norris, K.H., Barnes, R.F., Moore, J.E., Shenk, J.S., 1976. Predicting forage quality by infrared reflectance spectroscopy. *Animal Science* 43, 889-897.
- Peltre, C., Thuriès, L., Barthès, B., Brunet, D., Morvan, T., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Houot, S., 2011. Near infrared reflectance spectroscopy: A tool to characterize the

- composition of different types of exogenous organic matter and their behaviour in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 43, 197-205.
- Penot E. et Gaëlle D., 2011. Impact de la crise de 2009 sur les élevages laitiers dans le Vakinankaratra, Madagascar. Atelier thématique « Agronomie et Ecosystème » Programmes Corus, Aires-Sud et Aire Développement, Mars 2011, Madagascar. 16p.
- Petersen, S.O., Sommer, S.G., Béline, F., Burton, C., Dach, J., Dourmad, J.Y., Leip A., Misselbrook T., Nicholson F., Poulsen H.D., Provolo G., Sørensen P., Vinnerås B., Weiske A., Bernal M.P., Böhm R., Juhász C., Mihelic R., 2007. Recycling of livestock manure in a whole-farm perspective. *Livestock Science* 112, 180-191.
- Petisco, C., García-Criado, B., Vázquez de Aldana B.R., Zabalgoageazcoa, I., Mediavilla, S., García-Ciudad, A., 2005. Use of near-infrared reflectance spectroscopy in predicting nitrogen, phosphorus and calcium contents in heterogeneous woody plant species. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 382,458–465.
- Petisco, C., García-Criado, B., Vázquez de Aldana, B.R., García-Ciudad, A., Mediavilla, S., 2008. Ash and mineral contents in leaves of woody species: analysis by Near-Infrared Reflectance spectroscopy. *Communications in soil science and plant analysis* 39, 905-925.
- Pierre, W.H., Banwart, W.L., 1973. Excess-base and excess-base/nitrogen ratio of various crop species and parts of plants. *Agronomy* 65, 91-96.
- Powell, J.M., Pearson, R.A., Hiernaux, P.H., 2004. Crop-livestock interactions in the West African drylands. *Agronomy* 96, 469-483.
- Rabeharisoa, L., 2004. Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des hautes terres de Madagascar. Thèse de Doctorat de l'Université d'Antananarivo, spécialité: Science du Sol. 202 p.
- Rabenarivo, M., 2011. Potentialités d'émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) des sols de systèmes de culture en semis direct sous couverture végétale permanente (SCV) à Madagascar. Thèse de Doctorat. Université d'Antananarivo. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques. 192 p.
- Rabenarivo, M., Chapuis-Lardy, L., Brunet, D., Chotte, J.L., Rabeharisoa, L., Barthès, B.G., 2013. Comparing near and mid-infrared reflectance spectroscopy for determining properties of Malagasy soils, using global or local calibration. *Near Infrared Spectroscopy*. 21, 495–509.
- Rabetokotany, N., 2013. Matières organiques exogènes issues de l'élevage et de la ville en milieu tropical : apport de la spectrométrie proche infrarouge pour leur orientation d'usage agronomique et/ou énergétique. Thèse de Doctorat en Sciences. Université de la Réunion. 205 p.

- Rakotofiringa, A., Tokarski, Y., Penot, E., 2007. Caractérisation des exploitations agricoles dans la commune rurale d'Andranomanelatra. Région Vakinankaratra, Madagascar. Document de travail AFD/BVPI/SCRIF/FOFIFA/TAFA n°3. 42 p.
- Rakotovo, N., 2017. Impacts environnementaux de l'adoption des pratiques agroécologiques : empreinte carbone d'exploitation agricole et stocks de carbone. Région Itasy, Madagascar. Thèse de doctorat. Université d'Antananarivo. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques. 169 p.
- Ramaroson, H.V., 2017. La spectrométrie infrarouge comme outil de caractérisation des constituants et des propriétés physico-chimiques des sols ferrallitiques des Hautes Terres. Thèse de Doctorat. Université d'Antananarivo - Ecole Doctorale Sciences de la Terre et de l'Evolution : Georessources et Environnement Montpellier SupAgro – Ecole Doctorale GAIA : Ecosystèmes et Sciences. 156 p.
- Randrantoarimbola, L., 2015. Caractérisation des systèmes de productions agricoles au niveau des exploitations mixtes : Structure – fonctionnement, cas des Hautes Terres de la région Vakinankaratra. Mémoire d'ingénieur. Université d'Antananarivo. 70 p.
- Randrianasolo, J., Lecomte, P., Lepelley, D., Penot, E., Tillard, E., 2008. Caractérisation technico-économique de l'exploitation agricole familiale associant élevage laitier et culture sur plante de couverture dans la région d'Antsirabe (Madagascar). Document de travail BVPI/SCRiD/FOFIFA/TAFA n°4. 37 p.
- Rapport ProIntensAfrica, 2016. Intensification agricole à Madagascar: politiques publiques et trajectoires d'exploitations agricoles du Vakinankaratra. Initiative ProIntensAfrica : pour une intensification durable de l'agriculture africaine. Rapport de synthèse. 135 p.
- Rarivoarimanana, H.B., Penot, E., Rabearimisa, R., 2010. Diversité des systèmes d'alimentation des troupeaux laitiers à Vinanikarena et à Antsapanimahazo, région du Vakinankaratra, Madagascar. Document de travail AFD. 43 p.
- Rasoamampionona, B., Rabeharisoa, L., Andrianjaka, A., 2008. Evaluation du potentiel infectieux mycorhizogène du sol en semis direct du dispositif d'Andranomanelatra de l'ONG TAFA Antsirabe. Terre malgache 26, 69-71.
- Razafimahatratra, H., 2011. Sols malgaches et spectroscopie dans le moyen Infrarouge : classification, caractérisation et sensibilité au climat. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques. 242 p.
- Razafimbelo, T., 2005. Stockage et protection du carbone dans un sol sous système en semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres Malgaches. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. 162 p.

- Razafindramanana N.C., 2011. Contrôle des pertes en terre, en carbone et en nutriments par érosion sous systèmes en semis direct sur couverture végétale permanente des hautes-terres centrales malgaches. Thèse de doctorat. Université d'Antananarivo, 174p.
- Reeves III, J.B., 2001. Near-infrared diffuse reflectance spectroscopy for the analysis of poultry manures. *Agricultural Food Chemistry* 49, 2193–2197.
- Reeves III, J.B. et van Kessel, J.S., 2002. Spectroscopic analysis of dried manures. Near-versus mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for the analysis of dried dairy manures . *Near Infrared Spectroscopy*. 10, 93-101.
- Reisman, D.J., Sundaram, V., Al-Abed, S.R., Allen, D., 2007. Statistical validation of sulfate quantification methods used for analysis of acid mine drainage. *Talanta*, 71, 303-311.
- Reuter D.J. et Robinson J.B., 1997. *Plant analysis: an interpretation manual*. CSIRO Publishing, Collingwood. 570 p.
- Rhodes, E.R., 1995. Nutrient depletion by food crops in Ghana and soil organic nitrogen management. *Agriculture Systems* 48, 101-118.
- Rinnan, A., van den Berg, F., Engelsen, S.B., 2009. Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. *Trends in Analytical Chemistry* 28, 1201-1222.
- Rotz, C.A., Taube, F., Russelle, M.P., Oenema, J., Sanderson, M.A., Wachendorf, M., 2005. Whole-farm perspectives of nutrient flows in grassland agriculture. *Crop Science* 45, 2139-2159.
- Roy R.N., Misra R.V., Lesschen J.P., Smaling E.M., 2005. Evaluation du bilan en éléments nutritifs du sol. *Approches et méthodologies*. Bulletin FAO engrais et nutrition végétale 14. FAO, Rome, 81 p.
- Rufino, M.C., Rowe, E.C., Delve, R.J., Giller, K.E., 2006. Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop–livestock systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 112, 261-282.
- Rufino, M.C., Tittonell, P., van Wijk, M.T., Castellanos-Navarrete, A., Delve, R.J., de Ridder, N., 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.
- Salgado, P., Tillard, E., Nabeneza, S., Bigot, C.E., Barbet-Massin, V., Dutreuil, F., Bonnefois, M., Dardenne, P., Lecomte, P., 2012. Mise au point d'outils portables de spectrométrie dans le proche infrarouge (SPIR) pour évaluer la qualité des fourrages à la ferme. II Convención Internacional “Agrodesarrollo 2012” . Varadero, Cuba, 12-20 mai 2012. 4 p.

- Salgado, P., Tillard, E., Rarivoarimanana, B., Decruyenaere, V., Lecomte, P. 2014. Management practices to conserve the fertilizer N value of dairy manure in Vakinankaratra region, Madagascar. International Conference, Agroecology for Africa, 03-07 November 2014, Antananarivo, Madagascar.
- Sanchez, P. A., Shepherd, K. D., Soule, M. J., Place, F. M., Buresh, R. J., Izac, A. M. N., ... et Woome, P. L. , 1997. Soil fertility replenishment in Africa: an investment in natural resource capital. Replenishing soil fertility in Africa, 1-46.
- Sanchez, P.A., 2002. Soil fertility and hunger in Africa. *Science* 295, 2019-2020.
- Schmitt, S, Garrigues, S, Miguel de la Guardia, 2014. Determination of the Mineral Composition of Foods by Infrared Spectroscopy: A Review of a Green Alternative, *Critical Reviews in Analytical Chemistry* 44:2, 186-197
- Schreinemachers P., Berger T., Aune J.B., 2007. Simulating soil fertility and poverty dynamics in Uganda: a bio-economic multi-agent systems approach. *Ecological Economics* 64, 387-401.
- Scopel, E., Triomphe, B., Affholder, F., da Silva, F.A.M., Corbeels, M., Xavier, J.H.V., Lahmar, R., Recous, S., Bernoux, M., Blanchart, E., Mendes, I.C., de Tourdonnet, S., 2013. Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 33, 113-130.
- Seré, C., Steinfeld, H., 1996. World livestock production systems-Current status. Issues and Trends. In: Consultation on Global Agenda for Livestock Research, Nairobi (Kenya), 18-20 Jan 1995. ILRI.
- Shenk, J.S., Westerhaus, M.O., 1996. Calibration the ISI way. In: Davies, A.M.C., Williams, P., (Eds.). *Near infrared spectroscopy: The future waves*. Chichester, UK: NIR Publications. pp. 198–202.
- Shepherd, K.D., Walsh, M.G., 2002. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. *Soil Science Society of America* 66, 988-998.
- Simon, J. C., Grignani, C., Jacquet, A., Le Corre, L., Pagès, J., 2000. Typologie des bilans d'azote de divers types d'exploitation agricole: recherche d'indicateurs de fonctionnement. *Agronomie*, EDP Sciences, 20, 175-195.
- Sinnaeve, G., Dardenne, P., Agneessens, R., 1994. Global or local? A choice for NIR calibrations in analyses of forage quality. *Near Infrared Spectroscopy* 2, 163–175.
- Smith, J.W., Naazie, A., Larbi, A., Agyemang, K. , Tarawali, S., 1997. Integrated crop-livestock systems in sub-Saharan Africa: an option or an imperative? *Outlook on Agriculture* 26, 237-246.

- Smith, G.S., Middleton, K.R., Edmonds, A.S., 1980. Sodium nutrition of pasture plants. I. Translocation of sodium and potassium in relation to transpiration rates. *New Phytologist* 84, 603-612.
- Smith, T.N., Pesti, G.M., Bakalli, R.I., Kilburn, J., Edwards, H.M., 2001. The use of near-infrared reflectance spectroscopy to predict the moisture, nitrogen, calcium, total phosphorus, gross energy, and phytate phosphorus contents of broiler excreta. *Poultry Science* 80, 314–319.
- Soriano-Disla, J. M., Janik, L. J., Viscarra Rossel, R. A., MacDonald, L. M., McLaughlin, M. J., 2014. The Performance of Visible, Near and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for prediction of soil physical, chemical, and biological properties, *Applied Spectroscopy Reviews* 49:2, 139-186.
- Sourisseau, A.J., Rasolofo, P., Belieres, J., Guengant, J., Guengant, J.P., Ramanitriniony, H.K., Bourgeois, R., Razafimiarantsoa, T.T., Andrianantoandro, V.H., Ramarijaono, M., Burnod, P., Rabeandriamaro, H., Bougnoux, N., 2016. Diagnostic territorial de la région du Vakinankaratra à Madagascar. Rapport pays - AFD. Institut International des Sciences Sociales. 157 p.
- Stark, F. 2016. Evaluation agroécologique des pratiques d'intégration agriculture-élevage : Application de l'analyse de réseau écologique à des exploitations agricoles en milieu tropical humide. Thèse de Doctorat, AgroParisTech et Université de Montpellier SupAgro. 243 p.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., De Haan, C., 2006. *Livestock's long shadow*. FAO Rome.
- Stoorvogel, J. J., & Smaling, E. M. A., 1990. Assessment of soil nutrient depletion in Sub-Saharan Africa: 1983-2000. Vol. 2: Nutrient balances per crop and per land use systems (No. 28). ISRIC.
- Stoorvogel, J.J., Smaling, E.M.A. Windmeijer, P.N., 1993. Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. I. Supra-national scale. *Fertilizer Research* 35, 227-235.
- Tan, Z.X., Lal, R., Wiebe, K.D., 2005. Global soil nutrient depletion and yield reduction. *Sustainable Agriculture* 26, 123-146.
- Tang, C., Rengel, Z., 2003. Role of plant cation/anion uptake ratio in soil acidification. In: Rengel Z. (Ed.), *Handbook of soil acidity*. Marcel Dekker, New York. pp. 57-81.
- Thuriès, L., Bastianelli, D., Davrieux, F., Bonnal, L., Olivier, R., Pansu, M., 2005. Prediction by NIRS of the composition of plant raw materials from the organic fertiliser industry and crop residues from tropical agrosystems. *Near Infrared Spectroscopy* 13, 187-199.
- Tittonell, P., van Wijk, M.T., Rufino, M.C., Vrugt, J.A., Giller, K.E., 2007. Analysing trade-offs in resource and labour allocation by smallholder farmers using inverse modelling

- techniques: A case-study from Kakamega district, western Kenya. *Agricultural Systems* 95, 76–95
- Tittonell, P., Rufino, M.C., Janssen, B.H., Giller, K.E., 2010. Carbon and nutrient losses during manure storage under traditional and improved practices in smallholder crop-livestock systems - evidence from Kenya. *Plant and Soil* 328, 253-269.
- Tran, H., Salgado, P., Tillard, E., Dardenne, P., Nguyen, X.T., Lecomte, P., 2010. Global and local predictions of dairy diet nutritional quality using near infrared reflectance spectroscopy. *Dairy Science* 93, 4961-4975.
- van Breemen, N., Mulder, J., Driscoll, C.T., 1983. Acidification and alkalinization of soils. *Plant and Soil* 75, 283-308.
- van Ittersum, M., Konning, N., 2010. Will the world have enough to eat? In: Wery, J. (Ed.), *AGRO 2010, the XIth ESA Congress, Montpellier, France*, pp. 33-34.
- van Keulen, H., Aarts, H.F.M., Habekotté, B., van der Meer, H.G., Spiertz, J.H.J., 2000. Soil–plant–animal relations in nutrient cycling: the case of dairy farming system “De Marke.” *Agronomy* 13, 245-261.
- van Maarschalkerweerd, M. et Husted, S., 2015. Recent developments in fast spectroscopy for plant mineral analysis. *Frontiers Plant Science*. 6:169.
- Vautier, 2006. Les valeurs nutritionnelles de la viande de porc : analyses sur 9 pièces UVC. 11èmes JSMTV - Clermont Fd 2006 - p81.
- 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, 59-75.
- Williams, P.C., 2001. Implementation of near-infrared technology. In: Williams, P.C., Norris, K.H. (Eds.) *American Association of Cereal Chemist, St. Paul, Minnesota, USA*. p. 145-169.
- Xu, F., Yu, J., Tesso, T., Dowell, F., Wang, D., 2013. Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques : a mini-review. *Applied Energy* 104, 801-809.
- Yyengar, G.V., 1982. Elemental composition of human and animal milk: a technical document issued by the international atomic energy agency, Vienna. 197 p.
- Zebrowski, C., Ratsimbazafy, C., 1979. Carte pédologique de Madagascar. Feuille Antsirabe, notice explicative N°83, ORSTOM. 83 p.
- Zingore, S., Delve, R.J., Nyamangara, J., Giller, K.E., 2008. Multiple benefits of manure: the key to maintenance of soil fertility and restoration of depleted sandy soils on African smallholder farms. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 80, 267-282.

## **Webographie**

<https://ndb.nal.usda.gov/ndb/search/list?qlookup=05301>

<https://www.instat.mg/madagascar-en-chiffre/>

<https://www.yazio.com/fr/aliments/viande-doriginal-crue.html>

Wikipédia.com

## **Annexes**

---

## Annexe 1 : Listes des publications de l'auteur

- 1a Fanjaniaina M. L., Salgado P., Tillard E., Delarivière J., Ramahandry F., Razafimanantsoa M.P. Razafimahatratra H., Andriamaniraka H., Rabeharisoa L., Becquer T. First attempt using Near Infrared Reflectance Spectroscopy to evaluate the element content of flag leaf rice in Malagasy farm fields. Conference Agoecology For Africa (Afa ). Agroecology and Sustainability of Tropical Rainfed Cropping Systems. November 3<sup>rd</sup> - 7<sup>th</sup>, 2014, Antananarivo, Madagascar. *Poster*.
- 1b Fanjaniaina M.L., Ramahandry F, Larvy delariviere J., Razafimanantsoa M.P., Salgado p., Tillard E., Rabeharisoa L., Becquer T., 2015. Transfert de fertilité et durabilité des systèmes de production : application à la culture du riz. Conférence à l'Académie Nationale des Lettres, des Arts et des Sciences (ACNALS). Journée du Laboratoire des Radil isotopes à l'académie malgache, Antananarivo Madagascar. Bulletin de l'Académie Nationale malgache: sécurité alimentaire et durabilité des systèmes de production. *Communication orale*.
- 1c Fanjaniaina M. L., Ramahandry F., Larvy Delariviere J., Razafimanantsoa M. P., Salgado P., Tillard E., Rabeharisoa L., Becquer T. Transfert de fertilité et durabilité des systèmes de production: application à la culture du riz. Bulletin de l'Académie Nationale Malgache tome XCV/1, 2015, pp.163–168.

Fanjaniaina M. L., Ramahandry Andriandrahona F., Delariviere J.L, Salgado P., Tillard E., Rabeharisoa L., Becquer T., 2017. Nutrient depletion and acidification potential related to biomass transfers in Malagasy mixed crop-livestock farming systems. Soumis dans Soil Biology and Fertility.

**1a. Communication Poster lors de la conférence internationale Agroecology for Africa 2014 (AfA), Antananarivo, Madagascar.**



**First attempt using Near Infrared Reflectance Spectroscopy to evaluate the element content of flag leaf rice in Malagasy farm fields.**

**Fanjaniaina M. L.**<sup>1</sup>, Salgado P.<sup>2,3</sup>, Tillard E., Larvy Delarivière J.<sup>4</sup>, Ramahandry F.<sup>3</sup>, Razafimanantsoa M.P.<sup>1</sup>, Razafimahatratra H.<sup>1,5</sup>, Andriamaniraka H.<sup>5</sup>  
Rabeharisoa L.<sup>1</sup>, Becquer T.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des RadioIsotopes (LRI), Université d' Antananarivo- BP 3383, route d' Andraisoro, Antananarivo, Madagascar; <sup>2</sup>CIRAD, UMR SELMET, F-97410 Saint-Pierre, Reunion Island, France; <sup>3</sup>DP SCRID SRR Fofifa - B.P. 230 Antsirabe, Madagascar; <sup>4</sup>Institut de Recherche pour le Développement (IRD), UMR Eco&Sols, Montpellier Cedex, France; <sup>5</sup>Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Agriculture, Université d' Antananarivo, BP 174- 101 Antananarivo, Madagascar .

The study of crop/livestock integration systems still largely dominant in the tropics, appear as a possible way of improving the resilience of production systems in terms of biomass and nutrient management. It can serve as a basis for developing the production in the future. The calculation of biomass and nutrient flows at the farm level to quantify the transfer efficiency of fertility is important to assess the sustainability of production systems. The use of inexpensive analytical techniques such as Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) are expected to increase the number of analyses to characterize biomass components. Spectroscopy is rapid, timely, non-destructive, straightforward and sometimes more accurate than conventional analysis. The purpose of the present study was to develop tools or models of calibration and validation to quantify element content in rice, the main Malagasy field crops. In order to provide references for leaf nutrition diagnosis of rice, the NIRS was introduced to analyse nitrogen (N), phosphorus (P), calcium (Ca), magnesium (Mg), potassium (K), chlorine (Cl) in the dry-flag leaf samples of rice. References chemical analyzes and spectral analyzes by NIRS using a portable spectrophotometer LabSpec ® 4 (Analytical Spectral Devices Inc.) were performed on 177 samples of flag leaf rice to develop the model for each elements (N, P, Ca, Mg, K, Cl). Preliminary treatments have helped to show the references values for each element: P  $1.32 \pm 0.53 \text{ g.kg}^{-1}$ ; N  $28.3 \pm 4.16 \text{ g.kg}^{-1}$ ; Ca  $0.15 \pm 0.07 \text{ g.kg}^{-1}$ ; Mg  $1.15 \pm 1.09 \text{ g.kg}^{-1}$ ; K  $9.24 \pm 3.5 \text{ g.kg}^{-1}$ ; Cl  $0.08 \pm 0.04 \text{ g.kg}^{-1}$ . The results showed that C and N can be well predicted by NIRS. This technique also afforded acceptable accuracy in the prediction of P content. The prediction potential for cations Ca, Mg, K elements was moderate. These studies give an initial overview of the possibility of using NIRS to estimate the element contents in flag leaf rice. Predictions by NIRS would be a new alternative solution for agronomic management of mineral resources across the farm.

**1b. Communication orale lors de la conférence à l'Académie Nationale des Lettres, des Arts et des Sciences (ACNALS). Transfert de fertilité et durabilité des systèmes de production : application à la culture du riz.**

Fanjaniaina M. Lucia<sup>1</sup>, Larvy Delarivière J.<sup>2</sup>, Razafimanantsoa Marie-Paule<sup>1</sup>, Salgado Paulo<sup>3</sup>, Tillard Emmanuel<sup>3, 4</sup>, Rabeharisoa Lilia<sup>1</sup>, Becquer Thierry<sup>2</sup>.

Laboratoire des RadioIsotopes (LRI), Université d'Antananarivo- BP 3383, route d'Andraisoro, Antananarivo, Madagascar;

<sup>2</sup>Institut de Recherche pour le Développement (IRD), UMR Eco&Sols, Montpellier Cedex, France;

<sup>3</sup>CIRAD, UMR SELMET, F-97410 Saint-Pierre, Reunion Island, France;

<sup>3</sup>DP SCRID SRR Fofifa - B.P. 230 Antsirabe, Madagascar;

[fanjalucia@yahoo.fr](mailto:fanjalucia@yahoo.fr)

La fertilité des sols en zone tropicale diminue du fait de l'exportation d'éléments nutritifs dans les récoltes. Le calcul des flux de nutriments transférés à partir des biomasses, soit sortant (grains, pailles...), soit entrant (fumiers...), est indispensable pour quantifier les transferts de fertilité à l'échelle des exploitations et évaluer la durabilité des systèmes de production. Les analyses chimiques de la minéralomasse du riz ont montré que les exportations sont, en moyenne, de 13,7 kg d'azote (N), 1,9 kg de phosphore (P), 2,7 kg de potassium (K), 2,1kg de calcium et magnésium par tonnes de grains et 11,5 kg d'N, 0,6 kg de P, 12 kg de K, 3,8kg de calcium et magnésium par tonnes de pailles exportées. Ces exportations minérales contribuent à l'acidification des sols. Le recyclage des biomasses (fumier), qui restitue 40 à 95 % des nutriments, constitue une voie intéressante pour maintenir la fertilité du sol.

**1c. Transfert de fertilité et durabilité des systèmes de production : application à la culture du riz**

Bulletin de l'Académie Malgache, XCV/1, 2015

---

**TRANSFERT DE FERTILITE  
ET DURABILITE DES SYSTEMES DE PRODUCTION:  
APPLICATION À LA CULTURE DU RIZ \***

par

**FANJANIAINA Marie Lucia<sup>o</sup>, RAMAHANDRY Fidy<sup>oo</sup>, LARVY DELARIVIERE Jean<sup>ooo</sup>, RA-  
ZAFIMANANTSOA Marie-Paule<sup>o</sup>, SALGADO Paulo<sup>oooo</sup>, TILLARD Emmanuel<sup>oooo</sup>,  
RABEHARISOA Lilia<sup>ooooo</sup>, BECQUER Thierry<sup>ooo</sup>**

# TRANSFERT DE FERTILITE ET DURABILITE DES SYSTEMES DE PRODUCTION: APPLICATION À LA CULTURE DU RIZ ★

par

FANJANIAINA Marie Lucia°, RAMAHANDRY Fidy°, LARVY DELARIVIERE Jean°, RA-  
ZAFIMANANTSOA Marie-Paule°, SALGADO Paulo°, TILLARD Emmanuel°,  
RABEHARISOA Lilia°, BECQUER Thierry°

## Fintina

Mihena ny fahalonanan'ny tany eto amin'ny fehivorintany mafana nohon'ny fikaohan'ny riaka ny tany sy fanondranana singa amin'ny alalan'ny vokatra. Zava-dehibe ny mandrefy ny fiovaovan'ny tahan'ny tsiron'ny tany eo amin'ny saha, na ny mivoaka (voa sy mololo), na ny miditra (zezika), mba hahafantarana ny fifindran'ny zinan'ny toeram-pambolena iray sy ny faharetan'ny rafim-pamokarana. Ny vokatin'ny fitiliana ireo singa minéraly tao anatin'ny vary dia mampiseho fa: ny voa iray taonina miala dia misy 13,7 kilao ny azota (N), 1,9 kilao ny faosfaoro (P), 2,7 kilao ny potasioma (K), 1,1 kilao ny

kalsioma ary ny mololo iray taonina dia 11,5 kilao ny N, 0,6 kilao ny P, 12,0 kilao ny K, 2,8 kilao ny kalsioma. Ireo tsiron'ny tany miala ireo dia anisan'ny mahatonga ny tany ho asidra. Ny fitondrana zezika eo amin'ny saha, izay afaka mamerina 40 - 95% ny tsiron'ny tany dia vahaolana iray hitazomanana ny fahalonanan'ny tany.

**Teny Fototra:** voly vary, zezika, jery todika ny tsiron'ny tany, fitsingerenan'ny tsiron'ny tany, fahasanan'ny tany ho asidra.

## Abstract

Soil fertility in the tropics decreases due to the erosion and export of nutrients in crops. The calculation of the flow of nutrients transferred from biomass, either as field output (grains, straw) or input (manure etc), is essential to quantify fertility transfers in the farm and assess the sustainability of production systems. Chemical analysis of the nutrient content of the rice showed that exports are, on average, 13.7 kg of nitrogen (N), 1.9 kg of phosphorus (P), 2.7 kg of potassium

(K), 1.1kg of calcium(Ca) per ton of grain and 11.5 kg of N, 0.6 kg of P, 12.0 kg of K, 2.8 kg of calcium per ton of straw exported. These mineral exports contribute to the acidification of soils. The recycling of manure, which returns 40 to 95% of nutrients, is an interesting way to maintain soil fertility.

**Keywords:** rice, manure, nutrient budget, nutrient cycling efficiency, acidification.

## Résumé

La fertilité des sols en zone tropicale diminue due à l'érosion et à l'exportation d'éléments nutritifs dans les récoltes. Le calcul des flux de nutriments transférés à partir des biomasses, soit sortant (grains, pailles), soit entrant (fumiers, etc.), est indispensable pour quantifier les transferts de fertilité à l'échelle des exploitations et évaluer la durabilité des systèmes de production. Les analyses chimiques de la minéralomasse du riz ont montré que les exportations sont, en moyenne, de 13,7 kg d'azote (N), 1,9 kg de phosphore (P), 2,7kg de potassium (K), 1,1 kg de

calcium (Ca) par tonne de grains et 11,5 kg d'N, 0,6 kg de P, 12,0 kg de K, 2,8 kg de Ca de pailles exportées. Ces exportations minérales contribuent à l'acidification des sols. Le recyclage du fumier, qui restitue 40 à 95 % des nutriments, constitue une voie intéressante pour maintenir la fertilité du sol.

**Mot-clés:** riz, fumier, bilan de nutriments, efficacité de recyclage des nutriments, acidification

★ Communication présentée lors de la séance de la Section des Sciences Fondamentales et de la Section des Sciences Appliquées, Commémorant la célébration du Ciquantième Anniversaire du Laboratoire des Radiosotopes (LRI), du Jeudi 19 Mars 2015.

⊛ Laboratoire des Radio-Isotopes, Université d'Antananarivo, Route d'Andraisoro, BP 3383, 101 Antananarivo.

⊛⊛ FOFIFA / DP SPAD

⊛⊛⊛ Institut de Recherche pour le Développement, UMR Eco&Sols, Montpellier, France.

⊛⊛⊛⊛ CIRAD, UMR SELMET.

⊛⊛⊛⊛⊛ Membre Titulaire, Section des Sciences Fondamentales.

## Introduction

La réduction de la pauvreté rurale et la sécurité alimentaire de Madagascar restent, indissociablement liées à l'amélioration de la productivité du secteur rizicole [1] étant donné que le riz est l'aliment de base de la population malgache. Il est donc nécessaire de proposer une agriculture à la fois plus productive et plus durable. Actuellement, la durabilité de la production représente un défi majeur de l'activité agricole [2]. Cette durabilité des systèmes de cultures repose sur la gestion rationnelle de la fertilité des sols nécessitant une bonne gestion des nutriments et des biomasses [3, 4].

La fertilité des sols en zone tropicale, notamment en Afrique, diminue du fait de l'exportation d'éléments nutritifs dans les récoltes et des pertes par lixiviation et érosion, non compensées par l'apport d'intrants fertilisants [5] entraînant ainsi un appauvrissement rapide des sols en nutriments et une baisse de la productivité des cultures [6,7]. Tan et al. (2005) estiment que, globalement, les pertes d'éléments fertilisants au niveau des sols agricoles sont de 18,7 kg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> pour l'N, 5,1 kg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> pour le P et 38,8 kg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> pour le K. Ceci correspond à l'échelle du globe à des pertes annuelles de 5,5 Tg de N, 2,3 Tg de P et 12,2 Tg de K, induisant une perte de production totale de grains de 1136 millions de tonnes [8].

Un système de production durable devra valoriser efficacement les ressources locales et mobiliser de façon efficiente les intrants agricoles [9]. Ainsi, une connaissance précise des bilans minéraux et des transferts de fertilité depuis la parcelle (sortie de nutriments) ou vers la parcelle (apports de nutriments), est indispensable pour estimer la durabilité des systèmes afin de mieux gérer les ressources minérales à l'échelle de l'exploitation agricole. En dressant le bilan des éléments minéraux exportés ou importés sur la parcelle, à la fois sous forme organique et minérale, il sera possible de détecter un éventuel déséquilibre au niveau des bilans minéraux, qui remettrait en cause la durabilité de la fertilité de ce sol. Le principe de la durabilité vise, ainsi, à minimiser les pertes et à équilibrer les transferts entrants ou sortants au niveau de la parcelle.

Dans les exploitations mixtes en agriculture-élevage, qui correspondent à une large part des exploitations sur les hautes terres centrales de Madagascar, l'animal représente un levier essentiel pour améliorer la fertilité des sols par sa capacité à intégrer, transformer, valoriser et recycler les nutriments. Les stocks et les flux de biomasse et de nutriments doivent être quantifiés à chacune des étapes du cycle de transfert, depuis la production des biomasses organiques (fourrages et couverts végétaux, résidus de culture, effluents d'élevage), en passant par la collecte et la gestion de ces biomasses, puis par leur minéralisation dans le sol

en éléments minéraux, puis l'absorption et la transformation de ces nutriments par la plante [10]. En effet, toute production agricole implique un transfert d'éléments nutritifs du champ vers les récoltes, puis vers les consommateurs de ces récoltes (animaux, hommes).

L'objectif général de cette étude est d'analyser le transfert de fertilité au niveau de diverses parcelles cultivées en riz, pour estimer l'importance des transferts de fertilité induits. Les objectifs spécifiques consistent à (i) faire un bilan d'exportation en éléments nutritifs à partir des récoltes (grains et pailles); (ii) mettre en évidence l'importance de la restitution de biomasses sous forme de fumier et enfin, (iii) évaluer le potentiel d'acidification induit par l'exportation des grains et pailles de riz.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Site d'étude

L'étude a été effectuée dans la région Vakinankaratra, dans la commune Antsapanimahazo se situant entre la longitude Est 47° 09' 29" et entre la latitude 19° 38' 24" Sud, à une altitude moyenne de 1 760 m. Le terroir d'Antsapanimahazo présente deux catégories de sol selon la toposéquence: sur les collines ou *tanety*, à pente relativement faible, des sols ferrallitiques rajeunis, fortement désaturés et compactés en profondeur; sur les bas-fonds, des sols ferrallitiques kaoliniques, riches en minéraux argileux et pauvres en minéraux altérables, présentant des traces d'hydromorphie [11]. Le système mixte associant agriculture et élevage reste le système dominant de la région d'étude [12].

### 2.2. Prélèvements d'échantillons de biomasses

Soixante-dix (70) parcelles agricoles d'exploitations mixtes d'agriculteurs-éleveurs de la commune ont été étudiées. Le choix des parcelles s'est basé sur la typologie des exploitations agricoles et sur leur position dans la toposéquence et la déclinaison des parcelles [13]. Une placette de 1m<sup>2</sup> a été sélectionnée aléatoirement dans chacune des parcelles. L'échantillonnage porte sur les grains et les pailles de riz. Les fumiers apportés par les paysans sur chaque parcelle (70) ont également été collectés.

### 2.3. Détermination des éléments nutritifs des biomasses

La minéralomasse ou les teneurs minérales des grains, des pailles de riz et des fumiers a été analysée afin de déterminer les teneurs en macronutriments: azote (N), phosphore (P), calcium (Ca<sup>2+</sup>), magnésium (Mg<sup>2+</sup>), potassium (K<sup>+</sup>), soufre (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) et Chlorure (Cl<sup>-</sup>). Le N total a été déterminé en utilisant un analyseur CHN (Leco, CHN-100 O). Le chlorure a été déterminé par dosage argentimétrique (précipitation AgCl) automatisé à l'aide du

titrateur Crison après avoir bouilli la poudre végétale avec de l'eau distillée. Les autres éléments ont été dosés après la calcination des échantillons suivie d'une minéralisation des cendres à l'aide de l'acide chlorhydrique (HCl). Le P a été dosé par colorimétrie, suite à la formation d'un complexe phosphomolybdique de couleur bleue en présence de molybdate d'ammonium. Les concentrations de K, Ca et Mg ont été mesurées par absorption atomique. Les sulfates sont dosés par turbidimétrie après précipitation sous forme de sulfate de baryum en milieu acide.

### 2.3. Acidification du sol par les plantes

Les plantes prélèvent des éléments minéraux dans le sol soit sous forme de cations ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ), soit sous forme d'anions ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ). Lors de l'absorption de ces ions, chargés électriquement, les racines des plantes excrètent des protons ( $\text{H}^+$ ) ou des ions hydroxyl ( $\text{OH}^-$ ) au niveau de la rhizosphère afin de maintenir leur électroneutralité. Les plantes prélèvent généralement un excès de cations par rapport aux anions, ce qui induit une excrétion nette de protons et donc une acidification du sol. Lors de l'exportation des récoltes, cette acidification se maintient au niveau du sol.

Le potentiel d'acidification (cations en excès), qui correspond à l'alcalinité des plantes ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )

Tableau 1: Composition en éléments majeurs des grains et pailles de riz, en  $\text{mg g}^{-1}$  (moyennes  $\pm$  écart-type)

	Ca	Mg	K	S	Cl	P	N
<b>Pailles</b>	2,6 $\pm$ 0,7	1,0 $\pm$ 0,4	12,0 $\pm$ 3,8	1,1 $\pm$ 0,4	4,5 $\pm$ 1,2	0,6 $\pm$ 0,8	11,5 $\pm$ 0,7
<b>Grains</b>	1,1 $\pm$ 0,3	1,0 $\pm$ 0,3	2,8 $\pm$ 0,6	0,3 $\pm$ 0,2	0,6 $\pm$ 0,4	1,9 $\pm$ 0,7	13,7 $\pm$ 1,7
<b>Fumier</b>	2,3 $\pm$ 0,6	1,1 $\pm$ 0,4	7,2 $\pm$ 6,5	0,5 $\pm$ 0,4	1,2 $\pm$ 1,0	1,0 $\pm$ 0,3	9,1 $\pm$ 3,0

Unité =  $\text{mg g}^{-1}$

Afin de mieux appréhender l'analyse des transferts de fertilité au niveau des parcelles et/ou éventuellement au sein d'une exploitation, le bilan en exportation a été rapporté en termes d'exportation par les productions (via les récoltes).

Les résultats obtenus à partir d'une analyse des composantes du rendement ont donné un rendement moyen en riz de 2,25  $\pm$  1,05 t  $\text{ha}^{-1}$  de grains produits pour la variété *Chhomm Rong Dhan* communément appelée «*Tsipolitra*», qui est la variété la plus utilisée par les paysans [13]. Pour les pailles, il existe une relation étroite entre la quantité de paille produite (P) et le rendement en grain (G), mais la fraction de paille récoltable au dessus d'un chaume de 10 à 20 cm représente environ 45 % à 60 % du rendement en grain. Cette valeur est influencée surtout par la hauteur de la paille [17]. Dans notre étude, afin de faire une

est calculé par la différence de charge des cations et des anions minéraux de la biomasse selon la formule [14, 15, 16]:

$$\text{Alcalinité des cendres} = (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+) - (\text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$$

Un bilan positif (ce qui est pratiquement toujours le cas) se traduit par une acidification du sol lors de l'exportation des plantes récoltées et une alcalinisation du sol lors d'apports organiques (fumiers).

## 3. Résultats

### 3.1. Composition minérale des biomasses végétales et des fumiers

Les analyses chimiques de la minéralomasse du riz ont montré que les teneurs sont, en moyenne, de 13,7  $\text{mg N g}^{-1}$ , 2  $\text{mg P g}^{-1}$ , 3  $\text{mg K g}^{-1}$  pour les grains de riz et 11,5  $\text{mg N g}^{-1}$ , 0,6  $\text{mg P g}^{-1}$  et 12,0  $\text{mg K g}^{-1}$  pour les pailles (Tableau 1). Les teneurs moyennes des cations sont, 1,1  $\text{mg Ca g}^{-1}$ , 1,0  $\text{mg Mg g}^{-1}$  pour les grains et, 2,6  $\text{mg Ca g}^{-1}$ , 1,0  $\text{mg Mg g}^{-1}$  pour les pailles. Les teneurs moyennes des anions sont de l'ordre de 0,3  $\text{mg S g}^{-1}$ , 0,6  $\text{mg Cl g}^{-1}$  pour les grains et 1,1  $\text{mg S g}^{-1}$ , 4,5  $\text{mg Cl g}^{-1}$  pour les pailles.

première investigation des exportations par les productions, nous avons utilisé un rapport G/P = 1. De ce fait, le tonnage moyen de paille récoltable est évalué à 2,25 t  $\text{ha}^{-1}$  de pailles exportées.

Tableau 2: Bilan en nutriments majeurs exportés par les récoltes de grains et de pailles de riz ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

	Pailles	Grains	Pailles
Productions	2,25 t $\text{ha}^{-1}$	2,25 t $\text{ha}^{-1}$	4,50 t $\text{ha}^{-1}$
Nutriments	kg exporté $\text{ha}^{-1}$		
N	25,0 $\pm$ 1,6	31,0 $\pm$ 3,8	55,5
P	1,3 $\pm$ 1,7	4,3 $\pm$ 1,6	5,7
K	29,0 $\pm$ 8,1	7,5 $\pm$ 1,3	36,7

Le Tableau 2 nous montre que les pertes en éléments majeurs induits par l'exportation de 2,25 t ha<sup>-1</sup> grains sont de l'ordre de 31 kg ha<sup>-1</sup>, 4,3 kg ha<sup>-1</sup>, 7,5 kg ha<sup>-1</sup> pour N, P et K, respectivement. Par contre, une exportation de la totalité des biomasses végétales (2,25 t ha<sup>-1</sup> pailles et 2,25 t ha<sup>-1</sup> grains) s'élève à 55,5 kg N ha<sup>-1</sup>, 5,7 kg P ha<sup>-1</sup>, 36,7 kg K ha<sup>-1</sup>.

### 3.2. Potentiel d'acidification

Le Tableau 3 ci-dessous présente l'alcalinité des cendres des biomasses calculées à partir des teneurs en cations et en anions présentées dans le Tableau 1.

Tableau 3: Alcalinité des cendres d'échantillons de grains, pailles et fumiers (cmolc kg<sup>-1</sup> de produit)

	$\Sigma$ Cations	$\Sigma$ Anions	Alcalinité des cendres
<b>Grains</b>	22	8	14
<b>Pailles</b>	54	23	31
<b>Plante entière</b>	38	15	23
<b>Fumier</b>	39	13	26

L'alcalinité des grains et des pailles sont respectivement de 14 cmolc kg<sup>-1</sup> et 31 cmolc kg<sup>-1</sup>, tandis que l'alcalinité d'un kilo de plante entière (500 g de grains et 500 g pailles, avec un rapport G/P = 1) est de 23 cmolc kg<sup>-1</sup>. Cette valeur correspond, en d'autres termes, au nombre équivalent de protons H<sup>+</sup> libérés dans le sol, qui contribue à diminuer le pH du sol, lorsque les biomasses sont exportées. Le fumier, qui a aussi un pouvoir alcalinisant de 26 cmolc kg<sup>-1</sup> contribuera au contraire à diminuer l'acidité du sol lorsqu'il sera apporté.

## 4. Discussions

### 4.1. Enfouissement et valorisation des résidus de cultures

Dans beaucoup de systèmes de production agricole africains, le recyclage des résidus de culture et des effluents d'élevage constitue la principale source accessible de restitution de nutriments sur les parcelles agricoles, les effluents d'élevage étant particulièrement riches en N et P [18]. Les pailles, lorsqu'elles ne sont pas exportées, constituent aussi une source de biomasse et de nutriments importante. Les résultats des teneurs en nutriments des grains et des pailles de riz obtenus dans notre étude sont similaires aux références Corpen ainsi qu'aux autres études sur les pailles de céréales [19, 17]. Ces résultats permettent de mieux illustrer l'importance des pertes en nutriments

par les récoltes et notamment par l'exportation des pailles, sachant que les grains sont considérés comme étant une exportation irréversible qu'il faudrait toujours compenser par un apport d'élément fertilisant. A moyen ou long terme, l'exportation des grains et des pailles peut diminuer les quantités d'éléments minéraux biodisponibles et tout particulièrement celles d'azote et de potassium, dont les exportations sont importantes. Quand la paille est exportée, il est nécessaire d'apporter une quantité supplémentaire d'engrais correspondant à l'exportation des pailles dans le calcul des doses de N, P et K à apporter. L'enfouissement des pailles, au contraire, correspond à la restitution d'éléments minéraux N, P et K pour la culture suivante. La décomposition des pailles libère ces éléments dont l'efficacité est équivalente à celle d'un engrais minéral soluble [18]. Une adaptation de la fumure minérale est nécessaire en cas d'exportation fréquente des pailles sans compensation par des apports organiques.

La restitution des résidus de récolte contribue non seulement à favoriser le maintien de la fertilité sur le plan agronomique, mais encore à réduire la quantité d'engrais à apporter aux cultures. Sur le plan financier, elle permet de réduire les dépenses des agriculteurs en intrants. Ce gain peut être considérable, surtout au prix actuel des engrais le plus souvent importés. Tout en réduisant les dépenses occasionnées par les engrais minéraux, la pratique de la restitution peut permettre d'augmenter les rendements et par conséquent les revenus de l'agriculteur.

### 4.2. Acidification du sol lié l'exportation des grains et des pailles de riz

Les excès de cations (bases) prélevés par les plantes, par rapport aux anions, expliquent le pouvoir alcalinisant des grains et des pailles. Leur exportation tend à acidifier le sol. L'alcalinité des grains (14 cmolc kg<sup>-1</sup>) et des pailles de riz (31 cmolc kg<sup>-1</sup>) mets en évidence le pouvoir alcalinisant des biomasses récoltées et permet de conclure que leur exportation contribue à augmenter l'acidification des sols. En effet, les résidus de plantes contiennent généralement plus de cations que d'anions inorganiques, l'équilibre de charge interne étant maintenu par des anions organiques [20]. L'excès de concentration en cations des matières végétales donne une bonne indication de l'excrétion de protons au niveau rhizosphérique. L'exportation des biomasses contribue à augmenter l'acidification des sols. Une exportation de 2,25 t ha<sup>-1</sup> de grains et 2,25 t ha<sup>-1</sup> pailles entraîne une perte équivalente à 21 kg Ca ha<sup>-1</sup> et leur restitution correspond, par conséquent, à apporter une quantité équivalente de chaux (CaO) de 29 kg ha<sup>-1</sup>, soit un équivalent d'apport de 52 kg ha<sup>-1</sup> de calcaire (CaCO<sub>3</sub>) afin de ne pas augmenter l'acidité du sol, particulièrement importante pour les sols de *tanety*.

En bref, une exportation des pailles d'une parcelle donnée vers une autre parcelle, entraîne non seulement un transfert de fertilité (perte et/ou enrichissement) mais également un transfert d'alcalinité (acidification et/ou alcalinisation du sol).

#### 4.3. Le fumier: une alternative intéressante pour maintenir la fertilité des sols

Les principales sources de matières organiques dans les sols agricoles sont les résidus de récolte et les systèmes racinaires, ainsi que le fumier, le lisier ou autres déchets organiques (effluents, composts et boues) [21]. L'analyse de la minéralomasse du fumier a montré qu'un apport d'une tonne de fumier se traduit par un apport d'environ 9 kg de N, 1 kg de P, 7 kg de K. Aussi, un apport de 5 à 6 t ha<sup>-1</sup> de fumier serait donc nécessaire pour compenser les exportations occasionnées par une production de 2,25 tonnes de grains et 2,25 tonnes de pailles par hectare (Tableau 2). Les résultats confirment que les exportations par une culture de riz peuvent être pour partie compensées par des apports de fumier.

Avec une réincorporation des résidus sous forme de fumier, la possibilité de restitution en nutriments peut varier de 40 à 95% [22] en fonction de la gestion du fumier. En effet, la qualité des effluents d'élevage (i.e. teneur en N, P, K, ratio C/N [27]) est très variable et résulte des pratiques de conduite des animaux (dont les conditions de logement et d'alimentation), de stockage des effluents d'élevage, et des pratiques d'épandage [23, 10, 24]. Lors de l'application des effluents d'élevage, les pertes en éléments nutritifs, en particulier de N, peuvent être causées par émissions gazeuses (volatilisation, dénitrification), lixiviation et/ou érosion.

Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'une bonne gestion des ressources organiques dans des systèmes intégrant agriculture et élevage au niveau des exploitations agricoles ou au niveau des paysages afin de compenser les transferts de fertilité liés aux exportations des cultures. Ils montrent aussi le déséquilibre potentiel entre une production de paille de l'ordre de 2 t ha<sup>-1</sup> et des besoins en fumier d'environ 5-6 t ha<sup>-1</sup> pour avoir un bilan équilibré. Néanmoins, le raisonnement d'apport dépend surtout de la qualité du fumier. Si nous travaillons avec un fumier de bonne qualité, avec une teneur en N de l'ordre de 25 mg g<sup>-1</sup>, on aurait besoin seulement de 2 à 3 t ha<sup>-1</sup> avec des apports réguliers (tous les ans).

En ce qui concerne le contrôle de l'acidité, le pouvoir alcalinisant du fumier est expliqué par l'excès de cations de la biomasse par rapport aux anions (Tableau 3). Le fumier constitue donc une source d'alcalinité non négligeable. Un apport de 5 t ha<sup>-1</sup> de fumier correspond à un apport de 26 kg de Ca

soit un équivalent CaO de 34 kg ha<sup>-1</sup> ou un équivalent d'apport de calcaire de 65 kg ha<sup>-1</sup>.

En bref, le recyclage des biomasses végétales et/ou animales sous forme de fumier permet à la fois d'apporter de nutriments et de la matière organique au sol et de corriger l'acidité du sol grâce à son pouvoir alcalinisant important.

#### 4.4. Viabilité et durabilité des systèmes de production: complémentarité agriculture et élevage

L'étude des systèmes associant agriculture et élevage, encore largement dominants en zones tropicales [25], apparaît comme une voie possible d'amélioration de la résilience des systèmes de production en termes de gestion des biomasses et des nutriments et peut servir de base au maintien d'un système de production durable. Dans les systèmes d'agriculture-élevage, l'animal joue un rôle central dans les transferts et le recyclage de biomasses et d'éléments nutritifs. 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 [26]. 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. Les animaux accélèrent le recyclage 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 qui pourraient améliorer, par la suite, la productivité de l'agriculture.

#### 5. Conclusion

La baisse du potentiel productif des terres est une des préoccupations majeures des exploitants agricoles malgaches. Les exportations d'éléments par les récoltes constituent une des sources de pertes en nutriments. La durabilité du système de production exige une restitution de ces nutriments sur les parcelles cultivées. L'enfouissement des résidus de récolte et le recyclage des biomasses sous forme de fumier ont été étudiés comme une des alternatives intéressantes pour compenser les pertes en nutriments et pour corriger l'éventuelle acidification induit par les exportations de grains et de pailles. Afin d'assurer la viabilité et la durabilité des systèmes de production, développer la complémentarité de l'agriculture et de l'élevage est primordiale et intéressante pour maintenir les transferts de fertilité au niveau d'une exploitation. L'utilisation raisonnée des autres ressources organiques, effluents et résidus de l'exploitation, est donc nécessaire, sans que ce soit suffisant.

## 6. Notes et références bibliographiques

- Jenn-Treyer O., Dabat M.H., Grandjean P., 2006. Une deuxième chance pour le système de riziculture intensive à Madagascar? La recherche d'un compromis entre gain de productivité et investissements en facteurs de production. *Colloque international Dynamiques rurales à Madagascar: perspectives sociales, économiques et démographiques Antananarivo*, 23p.
- Machinet G.E., 2009. Utilisation de la variabilité génétique du maïs pour évaluer le rôle de la qualité chimique des racines sur le processus de décomposition dans les sols. *Thèse de doctorat*, Université de Reims Champagne Ardenne, France. 207 p.
- Crozier C.R., Walls B., Hardy D.H., Barnes J.S., 2004. Response of cotton to P and K soil fertility gradients in North Carolina. *Journal of Cotton Science*, **8**, 130-141.
- Girma K., Teal R.K., Freeman K.W., Boman R.K., Raun W.R., 2007. Cotton lint yield and quality as affected by applications of N, P, and K fertilizers. *The Journal of Cotton Science*, **11**, 12-19.
- Stoorvogel J., 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.
- Schreinemachers P., Berger T., Aune J.B., 2007. Simulating soil fertility and poverty dynamics in Uganda: a bio-economic multi-agent systems approach. *Ecological Economics*, **64**(2), 387-401.
- Cattan P., Letourmy P., Zagré B., Minougou A., Compaoré E., 2001. Rendement de l'arachide et du sorgho en rotation sous différents itinéraires techniques au Burkina Faso. *Cahiers Agriculture*, **10**(3), 159-172.
- Tan Z., Lal R., Wiebe K.D., 2005. *Global soil nutrient depletion and yield reduction. Journal of Sustainable Agriculture*, **26**, 123.
- Dugué P., Vayssières J., Chia E., Ouedraogo S., Havard M., Coulibaly D., Nacro H.B., Sissoko F., Sangare M., 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. *Proceedings of the international symposium "Partenariat, Modélisation, Expérimentation: quelles leçons pour la conception de l'innovation & l'intensification écologique ?"*, Bobo-Dioulasso, Burkina-Faso, 15-17 Novembre, 18 p.
- Rufino M.C., Rowe E.C., Delve R.J., Giller K.E., 2006. Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **112**, 261-282.
- Randrianarison N., Penot, E., Poncet, C., 2008. *Suivi et analyse des succès et des abandons des systèmes à base de semis direct sous couverture végétale: cas du Fokontany d'Antsapanimahazo*. VPI/SCRiD/FOFIFA/TAFA, Madagascar, 40 p.
- Randrianasolo J., 2007. *Caractérisation technico économique de l'exploitation agricole familiale associant élevage laitier et cultures en semis direct sous couverture végétale permanente dans la région d'Antsirabe, Madagascar*. ONG TAFA, FIFAMANOR, GSDM, CIRAD, Madagascar. 35 p.
- Ramahandry F., Douzet J.M., Dusserre J., Scopel E., Rabenjanahary H., Ralaiarimalala S., Doré T., 2007. Méthode de diagnostic agronomique régional: application au cas d'Antsapanimahazo. *Document de travail N°30*, UR SCRiD, 51p.
- Noble A.D., Zenneck I., Randall P.J., 1996. Leaf litter ash alkalinity and neutralisation of soil acidity. *Plant and Soil*, **179**, 293-302.
- Noble A.D., Randall P.J., 1999. Alkalinity effects of different tree litters incubated in an acid soil of N.S.W., Australia. *Agroforestry Systems*, **46**, 147-160.
- Tang, C., Sparling, G.P., McLay, C.D.A., Raphael, C., 1999. Effect of short-term legume residue decomposition on soil acidity. *Australian Journal of Soil Research*, **37**, 561-573.
- Agro-transfert, 2008. Exporter des pailles sans risque pour l'état organique des sols: guide de décision à la parcelle. Programme régional CARTOPAILLES. «Sols & Matières Organiques» des Chambres d'Agriculture de Picardie. 11 p.
- Alvarez S., 2012. 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. *Thèse de doctorat en Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosociences. et Environnement*. 70 p.
- COMIFER, 2007. *Tableau des exportations par les productions végétales*- Références CORPEN. [http://www.chambres-agriculturepicardie.fr/fileadmin/documents/Environnement/MAE/ref\\_corpen\\_export\\_culture\\_NPK.pdf](http://www.chambres-agriculturepicardie.fr/fileadmin/documents/Environnement/MAE/ref_corpen_export_culture_NPK.pdf).
- Haynes R.J., Mokolobate M.S., 2001. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **59**, 47-63.
- Bouajila K., Ben Jeddi F., Tamallah H., Jedidi N., Sanaa M., 2013. Effets de la composition chimique et biochimique des résidus de cultures sur leur décomposition dans un sol Limono-Argileux du semi aride, *Journal of Materials and Environment Science* **5**(1), 159-166.
- Madison F., Kelling K., Massie L., Word Good L., 1914. Guidelines for applying manure to cropland and pasture in Wisconsin. *Acts of congress and provides equal opportunities and affirmative action in employment and programs*. 20p.
- Fernandez-Rivera S., Williams T.O., Renard C., 1993. Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of Sub-Saharan Africa, Volume II, Technical Papers. *Proceedings of an International Conference ILCA*, Addis Ababa, Ethiopia, pp. 149-170.
- Salgado P., Tillard E., Rarivoarimanana B., Decruyenaere V., Lecomte Ph., 2014. Management practices to conserve the fertilizer N value of dairy manure in Vakinankaratra region, Madagascar. *International Conference, Agroecology for Africa*, 03-07 November 2014, Antananarivo, Madagascar.
- 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., Sere C., Rosegrant M., 2010. *Smart investments in sustainable food production: revisiting mixed crop-livestock systems*. *Science*, **327**, 822-825.
- Salgado P., Tillard E., 2012. Conservation des ressources fertilisantes dans les systèmes d'élevage des pays du Sud: Des pratiques paysannes en évolution. Cirad, UMR SELMET, *Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux*, 2p.
- Le rapport C/N ou rapport carbone sur azote est un indicateur qui permet de juger du degré d'évolution de la matière organique, c'est-à-dire de son aptitude à se décomposer plus ou moins rapidement dans le sol.

## Annexe 2 : Bilan en nutriments de chaque exploitation

Exploitation 1	C	N	P	Mg	Ca	K	
<b>IN</b>							
ENG		0	17	33	0	0	24
FUM		1730	99	14	12	30	50
ALI		17334,8	753,6	230,7	95,5	284,1	177,1
ANI		20,8	4,7	0,2	0,0	0,0	0,4
AUTR		0	0	0	0		
<b>Total IN (kg)</b>		<b>19086</b>	<b>873</b>	<b>278</b>	<b>108</b>	<b>314</b>	<b>252</b>
<b>OUT</b>							
VEG		0	0	0	0	0	0
LAI		3532	272	49	6	59	49
VIA		84	20	1	0	0	1
FUMV		0	0	0	0	0	0
<b>Total OUT (kg)</b>		<b>3616</b>	<b>292</b>	<b>50</b>	<b>6</b>	<b>59</b>	<b>51</b>
<b>Bilan global (kg ferme<sup>-1</sup>)</b>		15469	582	228	102	255	201
<b>Bilan global (kg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)</b>		1289,1	48,4	19,0	8,4	21,2	16,7

Exploitation 2	C	N	P	Mg	Ca	K	
<b>IN</b>							
ENG		0	0	0	0	0	0
FUM		0	0	0	0	0	0
ALI		1983,4	107,0	28,9	12,7	28,0	23,6
ANI		0	0	0	0	0	0
AUTR		1236,3	28,8	3,3	8,0	12,4	42,4
<b>Total IN (kg)</b>		<b>3219,7</b>	<b>135,8</b>	<b>32,2</b>	<b>20,7</b>	<b>40,4</b>	<b>66,0</b>
<b>OUT</b>							
VEG		45	1	0	0	0	0
LAI		864	67	12	1	15	12
VIA		79	3	0	0	0	0
FUMV		393	21	7	6	11	19
<b>Total OUT (kg)</b>		<b>1382</b>	<b>92</b>	<b>20</b>	<b>8</b>	<b>25</b>	<b>32</b>
<b>Bilan global (kg ferme<sup>-1</sup>)</b>		1838	44	13	13	15	34
<b>Bilan global (kg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)</b>		735,2	17,4	5,0	5,2	6,0	13,7

<b>Exploitation 3</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>Mg</b>	<b>Ca</b>	<b>K</b>
<b>IN</b>						
ENG	0,0	4	8	0	0	6
FUM	0	0	0	0	0	1
ALI	44	1	1	0	0	1
ANI	0	0	0	0	0	0
AUTR	0	0	0	0	0	0
<b>Total IN</b>	<b>44</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>8</b>
<b>OUT</b>						
VEG	85	2	0	0	0	0
LAI	0	0	0	0	0	0
VIA	5	1	0	0	0	0
FUMV	126	6	1	1	4	4
<b>Total OUT</b>	<b>215</b>	<b>10</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>4</b>
<b>Bilan global (kg ferme<sup>-1</sup>)</b>	<b>-172</b>	<b>-5</b>	<b>7</b>	<b>-1</b>	<b>-3</b>	<b>4</b>
<b>Bilan global (kg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)</b>	<b>-214,7</b>	<b>-6,0</b>	<b>8,5</b>	<b>-1,4</b>	<b>-4,2</b>	<b>4,5</b>

<b>Exploitation 4</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>Mg</b>	<b>Ca</b>	<b>K</b>
<b>IN</b>						
ENG	0	2	4	0	0	3
FUM	91	5	1	1	3	4
ALI	493,2	25,4	5,5	6,4	15,7	19,9
ANI	0	0	0	0	0	0
AUTR	0	0	0	0		
<b>Total IN</b>	<b>585</b>	<b>32</b>	<b>11</b>	<b>8</b>	<b>19</b>	<b>27</b>
<b>OUT</b>						
VEG	644	18	2	2	1	4
LAI	238	18	3	0	4	3
VIA	4	1	0	0	0	0
FUMV	0	0	0	0	0	0
<b>Total OUT</b>	<b>885</b>	<b>37</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>7</b>
<b>Bilan global (kg ferme<sup>-1</sup>)</b>	<b>-300</b>	<b>-5</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>14</b>	<b>20</b>
<b>Bilan global (kg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)</b>	<b>-300,2</b>	<b>-4,5</b>	<b>5,3</b>	<b>5,5</b>	<b>13,6</b>	<b>19,7</b>