



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

ECOLE DOCTORALE A2E « AGRICULTURE – ELEVAGE – ENVIRONNEMENT »

Impact des innovations agro-écologiques sur les flux de carbone et d'azote des cultures pluviales.

Cas des Hautes Terres de Madagascar

Présenté publiquement le 04 août 2017

par

LAINGO IRINTSOA RASOLOFO

En vue de l'obtention du diplôme de doctorat en Sciences
Agronomiques

RABEHARISOA Lilia

Professeur titulaire -
Université d'Antananarivo

Président de jury
Examineur

**RAKOTOZANDRINY
Jean de Neupomuscène**

Professeur titulaire - ESSA,
Université d'Antananarivo

Rapporteur interne

RAKOUTH Bakolimalala

Professeur - Faculté des
Sciences, Université
d'Antananarivo

Rapporteur externe

SCOPEL Eric

Docteur - CIRAD

Examineur

RAZAFIMBELO Tantely

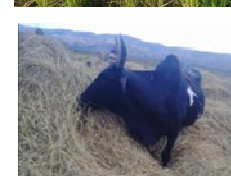
Professeur - LRI,
Université d'Antananarivo

Directeur de thèse

NAUDIN Krishna

Docteur - CIRAD

Encadrant de thèse



FIFAMANOR





UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

ECOLE DOCTORALE A2E « AGRICULTURE – ELEVAGE – ENVIRONNEMENT »

Impact des innovations agro-écologiques sur les flux d'azote et de carbone des cultures pluviales, Cas des Hautes Terres de Madagascar

Présenté publiquement le 04 août 2017

par

LAINGO IRINTSOA RASOLOFO

En vue de l'obtention du diplôme de doctorat en Sciences Agronomiques

RABEHARISOA Lilia	Professeur titulaire - Université d'Antananarivo	Président de jury Examineur
RAKOTOZANDRINY Jean de Neupomuscène	Professeur titulaire - ESSA, Université d'Antananarivo	Rapporteur interne
RAKOUTH Bakolimalala	Professeur - Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo	Rapporteur externe
SCOPEL Eric	Docteur - CIRAD	Examineur
RAZAFIMBELO Tantely	Professeur - LRI, Université d'Antananarivo	Directeur de thèse
NAUDIN Krishna	Docteur - CIRAD	Encadrant de thèse



Remerciements

Ce travail de thèse a pu être mené à terme grâce à la collaboration de nombreuses personnes.

Eric Scopel est l'une des personnes sources de cette thèse. Mon premier stage avec toi et Krishna en 2011 a éveillé mon ambition de continuer et de me baigner dans le monde de la recherche. Vos conseils, appuis et confiances en moi depuis cette année là m'ont permis à finir et soutenir ma thèse et j'espère que cela m'aidera toujours à suivre les bonnes voies dans le futur. Tu as encore accepté d'être parmi les membres de jury malgré la soutenance en période de vacance. Merci beaucoup pour tout !

Vololonirina Ramalanjaona : Grâce à vous, qui a bien coordonné le projet BIOVA, cette thèse a pu être réalisée. J'ai fait ma thèse dans de bonne condition avec le projet. « Mankasitraka indrindra » !

Lilia Rabeharisoa : Merci d'avoir présidé cette soutenance de thèse. Je réitère également mes remerciements à Bakolimalala Rakouth et Jean de Neupomuscène Rakotozandriny. Vos temps consommés avec patience pour évaluer ma thèse sont très importants pour moi. Merci d'avoir accepté d'être parmi les membres de jury !

Tantely Razafimbelo : Tu me faisais un rappel quand je dois rendre une partie de la thèse. Ca m'a fait peur... mais m'a beaucoup aidé, oui c'était très utile. Tu as accepté que je vienne chez toi te déranger en congé, et tu as encore priorisé ton temps (en période de vacance) à m'aider et m'encourager les jours avant la soutenance. Merci beaucoup !

Julie Dusserre : Tes aides pour les travaux sur la matrice, tes temps consacrés à la correction de certaines parties de la thèse, tes aides quand j'ai fait des présentations sont super importants pour moi. Tous les travaux ont été bien arrangés avec toi. Meilleur encadrement ! Merci !

Krishna Naudin : Tu étais basé à Montpellier mais tu es venu m'appuyer et visiter mes parcelles d'expérimentation à Antsirabe. Tu es basé au Brésil mais tu es venu m'encadrer de près à Montpellier. Comme on était dans le même bureau grâce à tes réponses rapides avec plusieurs centaines d'échange par mail (même en vacance) et plusieurs dizaines de skype, tu as bien suivi de très près ma thèse. Ton encadrement est excellent ! Théâtre, Karaoke, Merci. Tu es non seulement un encadrant mais aussi un frère pour moi !

Paulo Salgado : Tes réponses rapides à chaque fois que je t'ai demandé une chose, tes week end chargés à la correction de mes travaux sont très chers pour moi. Tu as bien assuré notre voyage Antsirabe-Tanà-Antsirabe, corrigé ma présentation et partagé beaucoup d'expériences en même temps! Tu ne m'as jamais laissé seule et as trouvé toujours des solutions par rapport aux problèmes techniques et financiers que j'ai rencontrés. Super encadrement ! Merci mon chef, mon grand frère !

*Misaora an'i
Jehovah ry fanahiko,
ary izay rehetra ato
anatiko, misaora ny
anarany masina.*

*Misaora an'i
Jehovah ry
fanahiko, ary aza
misy hadinoinao ny
fitañiany rehetra.*

Tantely, Julie, Krishna, Paulo, merci pour l'encadrement et la formation que vous m'avez apportés. Je sais très bien vos milliards d'occupations mais vous m'avez toujours dédié du temps ! Tout cela est vraiment précieux pour moi.

Jean Louis Chopart : Merci pour les connaissances et expériences que tu as partagées avec moi. Tu m'as toujours accordé du temps quand je t'ai demandé de l'aide. Merci pour ta contribution dans l'élaboration de mon protocole de travail surtout sur les travaux des racines.

Alain Albrecht, Kendji Fujisaki, Rémi Cardinaël : Vous vous êtes libérés de vos occupations pour m'aider sur la partie carbone du sol. Merci pour le partage d'expérience. J'espère qu'on continuera et réussira à surmonter toutes les difficultés rencontrées.

Thierry Becquer : Tu as accepté d'être parmi les membres de mes trois comités de thèse, merci pour tes conseils, tes contributions dans l'amélioration de mes travaux, tes interventions dans les analyses de mes échantillons des sols et racines.

Philippe Letourmy, Romain, Diaretou : Vos appuis sur la statistique et l'analyse des données avec le logiciel R me font tourner la tête, mais m'ont sincèrement aidé sur les traitements de toutes mes données. Merci !

Serge Nabeneza : Tu n'as jamais oublié mes milliers de spectres et à chaque fois que je t'ai demandé de l'aide, tu m'as toujours répondu rapidement. Merci pour les formations SPIR que tu nous as apportées avec patience.

Brigitte, Anne-Laure, Jocelyne, Soary, Felana : Vous avez toujours facilité la préparation de mes dossiers de séjour à Montpellier, merci. Par la même occasion, merci Hary de venir en aide pour l'achat de certains matériels de labo. Merci Vero, Rachelle pour vos aides sur tous les dossiers financiers du projet.

Aina, Victor et leurs équipes : Merci pour les travaux de terrain, sérieux et toujours responsables. Vous avez bien assuré avec patience et délicatesse le lourd (temps et énergie) travail sur les racines.

Équipes Fifamanor, en particulier Lucile, Bernadette, José, Lalaina : Vous étiez toujours là à m'aider, m'encourager, me déstresser. Merci !

Fofifa et les équipes : Merci de bien m'accueillir dans votre institution depuis 2011. Les divers événements pour nous insérer dans la recherche, les karaoke pour nous déstresser ont été très utiles.

Équipes SPAD : J'ai vraiment de la chance d'être parmi les équipes SPAD. J'ai appris différentes expériences professionnelles et sociales avec tous les Spadiens. J'ai également sollicité divers appuis (bon encadrement, techniques, financiers) hormis le thé, chocolat, cake, ... Merci beaucoup !

Mendrika, Odom : Vos super travaux de terrain et laboratoire étaient très satisfaisants, « mankasitraka e ». Moi et ma famille avons passé des bons moments ensemble avec vous à Antsirabe!

Merci aux paysans qui ont accepté de travailler avec moi et m'ont laissé d'utiliser une partie de votre parcelle de culture, pendant les campagnes 2013-2014 et 201-2015. Merci de votre aimable accueil, patience et confiance en nous.

Guillaume : Merci pour toutes tes aides. Tu n'as jamais cessé de chercher des réponses à toutes mes questions. C'est bien vrai ce que tu as dit « Tsara ny finamanana, misaotra » !

Lalaina, Narindra, Fanja, Manjaka, Tatiana, Tahiry, Meva Tahiry: Je ne me sentais jamais seule à Montpellier grâce à vous. J'ai sincèrement adoré les moments passés ensemble, c'était rigolant, déstressant mais plein de partage de connaissance également ! Et n'oubliez pas la pause vernis pour dé-stresser les filles !!!

Mes parents et toute ma famille : Vous étiez toujours là à m'aider, m'encourager, me soutenir. Merci, merci pour tout !

Merci Tolotra d'avoir pris soin de notre fille surtout pendant que j'étais absente. Tu as pu encore m'aider sur mes travaux de terrain et de laboratoire, tu es vraiment un super papa, un super mari ! Merci Andhy d'avoir accepté que maman a dû se concentrer dans sa thèse ! Merci pour votre patience, souffrance, soutien, amour !

Sommaire

	Fintina – Résumé - Abstract	
	Introduction générale	1
1	Contexte de l'étude.....	2
2	Zone d'étude.....	3
3	Innovations agro-écologiques.....	4
4	Objectifs et hypothèse	6
	Chapitre 1: Méthodologie générale de la thèse	9
1	Zones expérimentales	12
2	Expérimentation en milieu contrôlé	13
3	Expérimentation en milieu réel	21
	Chapitre 2: Relationships between root length and biomass of upland rice in the Madagascar Highlands	24
1	Introduction	25
2	Materials and methods.....	26
3	Results and discussion.....	27
	Chapitre 3: Contribution des racines des cultures pluviales à la restitution du carbone au sol.....	31
1	Introduction	32
2	Matériels et méthodes.....	33
3	Résultats	38
4	Discussion	47
5	Conclusion.....	50
	Chapitre 4: Impacts des innovations agro-écologiques sur le rendement en grain et en biomasse aérienne des cultures pluviales	51
1	Introduction	53
2	Matériels et méthodes.....	54
3	Résultats	59
4	Discussions.....	77
5	Conclusion.....	80
	Chapitre 5: Gestion de l'utilisation des biomasses végétale et animale : effets sur la restitution du carbone au sol.....	81
1	Introduction	82
2	Matériels et méthodes.....	83
3	Résultats et discussion.....	90
4	Conclusion.....	100

	Chapitre 6: Gestion de l'utilisation des biomasses végétale et animale : effets sur les flux d'azote dans une exploitation agricole	102
1	Introduction	103
2	Matériel et méthodes	105
3	Résultats et discussion.....	112
4	Conclusion.....	119
	Conclusion générale	121
1	Synthèse générale	122
2	Perspectives	126
	Références bibliographiques.....	128
	Annexes	137

Tables des illustrations

Liste des figures

Figure 1 : Région de Vakinankaratra, Madagascar	3
Figure 2 : Schéma conceptuel de la thèse.....	8
Figure 3 : Schéma méthodologique de la thèse	11
Figure 4 : Situation géographique et pédologiques des dispositifs expérimentaux.....	12
Figure 5 : (a) Température et (b) pluviométrie enregistrées avec la station CIMEL, Andranomanelatra et avec le pluviomètre installée à Betafo (parcelles paysannes).....	13
Figure 6 : Dispositif expérimental en milieu contrôlé.....	15
Figure 7 : Densité de semis	16
Figure 8: Model calibration (2014-2015).	28
Figure 9: Model validation (2015-2016 season).	29
Figure 10 : Caractéristiques du climat d'Andranomanelatra.....	34
Figure 11 : Profil pédologique des parcelles d'Andranomanelatra	34
Figure 12 : Densité de semis et prélèvement racinaire.	36
Figure 13 : Modèle de distribution racinaire de certaines cultures pluviales à la floraison	40
Figure 14 : Quantité de carbone dans les différents compartiments de la plante de chaque système de culture.	46
Figure 15 : Pluviométrie et températures décadaires des trois campagnes culturales avec les dates des opérations culturales.....	57
Figure 16 : Espacement entre plantes.....	58
Figure 17 : Production en grain et paille de riz en milieu contrôlé.	63
Figure 18 : Rendement en grain et paille de riz en milieu paysan.	65
Figure 19 : Distribution de rendement en (a) grain et (b) paille de riz.....	68
Figure 20 : Distribution des rendements de chaque parcelle individuelle de (a) haricot, (b) maïs et (c) avoine, en milieu contrôlé et en milieu paysan.	74
Figure 21 : Rendement en grain et biomasse aérienne de chaque système de culture des parcelles contrôlées	76
Figure 22 : Structure du modèle Rothamsted Carbon	87
Figure 23 : Structure du modèle Hénin&Dupuis.....	89
Figure 24 : Stock moyen de carbone du sol entre 2002 à 2011.....	91
Figure 25 : Stock de carbone du sol dans 0-30 cm en 2002 et en 2011, en milieu contrôlé.	93
Figure 26 : Relation entre l'apport de carbone par les biomasses agricoles et le stock de carbone du sol dans 0-30 cm à partir de 2002 jusqu'en 2011.....	94
Figure 27 : Variation du stock de carbone initial dans le sol sur des parcelles paysannes (n=19).....	96
Figure 28 : Différence du stock de carbone du sol pendant 20 ans de culture	99
Figure 29 : Quantité et qualité des biomasses végétales annuellement exportables pour maintenir le stock C du sol initial à l'équilibre pendant 20 ans de culture.....	99
Figure 30 : Flux partiels d'azote dans une exploitation mixte agriculture et élevage	108
Figure 31 : Flux d'azote dans les systèmes de culture pluviale.	113
Figure 32 : Lait produit et azote restitué dans le sol suivant les options d'utilisation de la biomasse végétale aérienne dans les systèmes.....	117
Figure 33 : Restitution d'azote au sol, delta carbone du sol (20 ans), production laitière, rendement en grain de chaque système de culture.	126

Liste des tableaux

Tableau 1 : Historique des parcelles en milieu contrôlé depuis 2002	18
Tableau 2 : Mesures effectuées avec les essais en milieu contrôlé et en milieu réel.....	19
Tableau 3: Model calibration of the relationships between root biomass density (RBD g m^{-3}) and root length density (RLD m m^{-3})	28
Tableau 4: Statistical analysis of RLD and RBD between measured and predicted values in the 2015-2016 season and model validation characteristics.....	29
Tableau 5 : Caractéristiques du modèle de distribution racinaire de certaines cultures pluviales.....	39
Tableau 6 : Biomasse racinaire (kg ha^{-1}) mesurée et calculée de certaines cultures pluviales.....	41
Tableau 7 : Production de biomasse racinaire et aérienne de certaines cultures pluviales.....	43
Tableau 8 : Teneur en C ($\text{g } 100\text{g}^{-1}$ MS) de la biomasse aérienne (tiges + feuilles) et racinaire de certaines cultures pluviales.....	44
Tableau 9 : Caractéristiques physico-chimiques moyennes des sites contrôlé et paysans d'Andranomanelatra et de Betafo.....	55
Tableau 10 : Composante de rendement et rendement en grain et paille de riz de 2014 à 2016, en milieu contrôlé.....	61
Tableau 11 : Composante de rendement et rendement en grain et paille de riz de 2014 et 2015 des parcelles paysannes.	66
Tableau 12 : Rendement en grain et biomasse des cultures en rotation suivant les saisons culturales, systèmes de culture en milieu contrôlé.....	70
Tableau 13 : Rendement en grain et biomasse des cultures en rotation avec le riz en milieu paysan...	72
Tableau 14 : Valeurs minimale et maximale de coefficients d'humification k_1 de fumier, biomasse aérienne et biomasse racinaire et de minéralisation k_2 trouvées dans des bibliographies.	90
Tableau 15 : Valeurs de coefficient d'humification k_1 et de minéralisation k_2 utilisé dans le modèle Hénin&Dupuis	94
Tableau 16 : Quantité et qualité des grains, des biomasses aérienne et racinaire de chaque culture étudiée en milieu paysan.	109
Tableau 17 : Equivalence économique en $\text{kAr ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (10^3 Ariary) de la quantité d'azote restitué au sol et du lait produit par système de culture	117

Liste des photos

Photo 1 : Mesure de la biomasse racinaire	19
Photo 2 : Comptage des intersections entre les racines et la grille.....	20
Photo 3 : Lecture d'un échantillon avec l'appareil SPIR.	21
Photo 4 : Prélèvement des sols.	23

Liste des abréviations

A : Année	ha : Hectare
A+V : Association d'avoine et vesce	HI: Harvest index
AC : Agriculture de conservation	HSD: High significant difference
ADL: Acid detergent lignin	HUM: Humified organic matter
Al : Aluminium	ICBM: Introductory carbon balance model
ANOVA: Analysis of variance	INSTAT : Institut national de la statistique
BA : Biomasse aérienne	IOM: Inert organic matter
BIO: Microbial biomass	IRD : Institut de recherche pour le développement
BIOVA : Recycling of plant and animal biomasses in crop-livestock systems	JAS : Jour après semis
°C : Degré Celsius	K : Potassium
C : Carbone	kAr : kiloAriary
Ca : Calcium	kg : Kilogramme
CA: Conservation agriculture	KW: Kruskal Wallis
CB : Cellulose brut	l : Litre
CEC : Capacité d'échange cationique	lab : Labour
CHN : carbone, hydrogène, azote	LRI : Laboratoire des radio-isotopes
CI : Capacité d'ingestion	LSD: Low significant difference
CIB : Capacité d'ingestion de l'animal rempli par les biomasses végétales	m : Mètre
CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement	M+C : Association de maïs et crotalaire
cm : Centimètre	M+H : Association de maïs et haricot
CO ₂ : Dioxyde de carbone	MAT : Matière azotée totale
COP 21 : Paris climateconference	MB: Mean Bias
CT : Cendre total	Mg : Magnésium
CT: Conventional tillage	mm : Millimètre
DPM: Decomposable plant material	MS : Matière sèche
DM: Dry matter	N : Azote
EA : Excrétion animale	NDF: Acid detergent fibre
F: Fertilisation	NE: Nash efficiency
F0 : sans fertilisation	P : Phosphore
FAO : Food and agriculture	PDI : Protéine digestible dans l'intestin
FE : Fumier à l'étable	PIB : Produit Intérieur Brut
FIFAMANOR : Fiompiana fambolena malagasy norveziana	PNUD : Programme des Nations Unies pour le développement
Fm : Fumure minérale	Prot : Protéine
FOFIFA : Foibem-pirenena momba ny fikarohana ampiharina amin'ny fampanandrosoana ny eny ambanivohitra ou Centre national de la recherche appliquée au développement rural	PV : Poids vif
Fu : Fumure organique	R//A+V : Rotation biennale de riz suivi de l'avoine + vesce
FuA : Fumier amélioré	R//M+C : Rotation biennale de riz suivi de maïs + crotalaire
FuC : Fumier conventionnel	R//M+H : Rotation biennale de riz suivi de maïs + haricot
g : Gramme	R/S : Root shoot ratio
	RA : Refus alimentaire
	RBD: Root biomass density
	RLD: Root length density
	RMSE: Root mean square error

Roth C: Rothamsted carbon

ROVA : Rononon'i Vakinankaratra

RPM: Resistant plant material

SC : Système de culture

SCRiD: Systèmes de culture et riziculture durable

SOCOLAIT : Société commerciale laitière

SPiR : Spectrométrie dans le proche infra-rouge

SRL: Specific root length

t : Tonne

UFL : Unité fourragère lait

Fintina – Résumé - Abstract

Famintinana

Ny voly rakotra (VR) dia nampidirina teto Madagasikara mba hanatsarana sy hahafahana mamokatra maharitra amin'ny voly an-tanety. Ny VR sy ny fiompiana omby dia afaka mifameno tsara, nefa koa indraindray mety hifaninana amin'ny fampiasana ny mololo. Ny VR etsy andaniny dia hahafahana mamokatra vilona atao sakafon'ny omby. Ny omby indray kosa, etsy ankilany, dia mamerina ny ampahany amin'ireo vilona nohaniny, nefa tsy levony, ao amin'ny tainy. Noho izany dia afaka manatsara ny tsiron'ny tany ny omby amin'ny alalan'ny fampiasana ireo zezika vokariny eny an-tanimboly. Io famerenana ireo singa mineraly ao amin'ny tany ireo dia azo atsarina amin'ny alalan'ny fahaiza-mampiasa ny mololo sy mitahiry tsara ny zezika hahatahiry ireo singa ireo. Ity asa fikarohana ity dia natao mba hahalalana ny amin'ny fahaiza-mitsinjara sy mampiasa ny mololo sy vilona ary ny zezika vokatra ao amin'ny fiompiana sy fambolenan'ny tantsaha mba hahafahana manatsara ny vokatra aoriana. Ny tarigetra dia ny anodinana sy ampisana araka ny tokony ho izy ireo mololo sy vilona ary zezika ireo ka ampihenana ny fahaverezana mety hisy eo amin'ireo singa mineraly ao anatin'ny izay tena ilaina amin'ny fiompiana sy ny fambolena. Karazam-boly no narahany teny amin'ny saha izay efa natokana manokana anaovana fikarohana, nandritra ny telo taona (2013-2016): (i) vary an-tanety ny taona voalohany ka dimbiansan'ny katsaka novolena miaraka amin'ny *Crotalaria grahamiana* ny taona faharoa, natao voly rakotra; (ii) vary an-tanety dimbiansan'ny *avoine* novolena miaraka amin'ny *vesce*, natao voly rakotra; ary (iii) vary an-tanety dimbiansan'ny katsaka novolena miaraka amin'ny tsaramaso, natao teny amin'ny tany voaasa. Isak'ireo karazam-boly ireo dia nampitaha zezika efatra karazana koa izahay: (i) tsy nasiana zezika; (ii) 5 t ha^{-1} amin'ny zezi-pahitra tsotra; (iii) 5 t ha^{-1} amin'ny zezi-pahitra natsaraina; ary (iv) 5 t ha^{-1} amin'ny zezi-pahitra tsotra nampiana zezika mineraly. Ankoatr'ireo dia namboly ilay karazam-boly *ii* sy *iii*, ary karazan-jezika *ii* sy *iii* koa izahay niaraka tamin'ny tantsaha, izay teny amin'ny tanin'izy ireo ihany nandritra ny roa taona (2013-2015). Ny valin'ny fikarohana dia maneho fa ny voka-bary azo tamin'ny fampiasana zezi-pahitra natsaraina sy zezika mineraly dia tsara kokoa (4 t ha^{-1}), izany hoe 27% mahery noho ny azo tamin'ny fampiasana zezi-pahitra tsotra ary 48% mahery noho ny azo tamin'ny tany tsy nasiana zezika. Ny vokatra avy amin'ireo voly hafa koa dia toy izao ny fahatsarany arakaraky ny zezika nampiasaina: zezika mineraly > zezi-pahitra natsaraina > zezi-pahitra tsotra > tsy nasiana zezika, saingy ny elanelana misy araka ny statistika natao dia teo amin'ny vokatra katsaka ihany no hita ary teo amin'ilay saha fanaovana fikarohana no nahitana izany. Rehefa natambatra ary ireo vokatra rehetra azo isaky ny karazam-boly dia hita fa ambony ny voa azo tamin'ilay vary nafandimby tamin'ny katsaka novolena niaraka tamin'ny *crotalaire* sy tamin'ny katsaka novolena niaraka tamin'ny tsaramaso. Ny totalim-bokatra mololo sy

vilona isaky ny karazam-boly azo avy amin'ny vary nafandimby tamin'ny katsaka+*crotalaire* koa dia ambony lavitra ny (10 hatramin'ny 17 t ha⁻¹ ny roa taona), raha oharina amin'ny azo avy amin'ny vary nafandimby tamin'ny *avoine* na katsaka+tsaramaso, nohon ny habetsahan'ny azo avy amin'ny *crotalaire*. Marihina fa ny vokatry azo teo amin'ilay saha natokana anaovana fikarohana sy ny teny amin'ny tanin'ny tantsaha dia mitovitovy ihany. Ny fitambaran'ny fakan'ireo voly nampiasaina isaky ny karazam-boly dia ahafahana mamerina indray ao amin'ny tany 18%, 27% sy 28% ny C rehetra azo avy amin'ny vary novolena nifandimby tamin'ny katsaka+*crotalaire* (10,0 t C ha⁻¹ isaky ny roa taona), *avoine* (3,1 t C ha⁻¹ isaky ny roa taona) ary katsaka+tsaramaso (3,6 t C ha⁻¹ isaky ny roa taona). Ny faminavinana ny *carbone* ao anatin'ny tany (faritra 0-30 cm) mandritra ny roapolo taona dia maneho fa ny voly vary dimbiasan'ny katsaka+*crotalaire* dia afaka mampitombo hatrany ny C ao anatin'ny tany raha toa ka latsaky ny 160 t C ha⁻¹ ny C hita tao amin'ny tany ny taona voalohany. Ny voly vary dimbiasan'ny *avoine* na katsaka+tsaramaso kosa dia afaka mitahiry ilay habetsaka *carbone* tao amin'ny tany, hita ny taona voalohany, raha toa ka 60 t C ha⁻¹ io lanja io, ary tsy mihoatra ny 90% ny tahan'ny mololo alana eo amin'ny tany izay omena hoan'ny omby. Raha toa ka mihoatra an'io lanja io kosa ny *carbone* hita ao amin'ny tany ny taona voalohany, nefa tiana ho voatazona hatrany ny lanja mitovy aminy roapolo taona aty aoriana dia tsy maintsy ahena 17% (hoan'ny vary//*avoine*) sy 13% (hoan'ny vary//katsaka+tsaramaso) ny tahan'ny mololo alana eo amin'ny tany omena ny omby isaky ny miakatra 10 t C ha⁻¹ ilay *carbone* ao amin'ny tany ny taona voalohany. Raha mihoatra ny 110 t ha⁻¹ ny *carbone* ao amin'ny tany novolena vary//*avoine*+*vesce* ary 130 t ha⁻¹ ny ao amin'ny tany novolena vary//katsaka+tsaramaso, ny taona voalohany, dia tsy maintsy mihena hatrany ny ireo lanja ireo roapolo taona aty aoriana. Hita ihany koa fa ny habetsaky ny azota (N) miverina ao amin'ny tany isan-taona dia ambony lavitra amin'ny tany novolena vary//katsaka+*crotalaire* (164 kg N ha⁻¹) noho ny hita ao amin'ny tany novolena vary//*avoine* sy vary//katsaka+tsaramaso (45 kg N ha⁻¹). Ny fambolena vary//*avoine* kosa indray anefa dia hahafahana mahazo ronono ambony lavitra (3 640 l) noho ny azo avy amin'ireo karazam-boly roa hafa: manatombo 19% noho ny azo avy amin'ny fambolena vary//katsaka+tsaramaso ary 41% noho ny azo avy amin'ny vary//katsaka+*crotalaire*. Ary ny fambolena vary//katsaka+tsaramaso indray dia hahafahana mahazo voa be proteina kokoa noho ireo karazam-boly roa hafa. Rehefa atambatra anefa ny vokatry rehetra azo (voa, ronono, azota miverina ao amin'ny tany) isaky ny karazam-boly ka ampitomboina amin'ny vidiny famarotan'ny tantsaha ireo vokatry ireo dia hita fa ny fambolena ny vary//katsaka+*crotalaire* no ahazoana tombony kokoa, izany hoe ahazoana 330 hatramin'ny 430 kAr ha⁻¹ isan-taona noho ny fambolena vary//*avoine* ary 60 hatramin'ny 620 kAr ha⁻¹ isan-taona noho ny fambolena vary//katsaka+tsaramaso, arakaraka ny fitsinjarana ny mololo avela eny amin'ny tany sy omena hoan'ny omby. Isaky ny karazam-boly anefa dia tsapa sy hita fa ny vola azo avy amin'ny vidin-dronono vokatry kosa dia hahafahana mividy zezika be dia be mba

hanatsarana ny nofon-tany sy hanatsarana ny vokatra. Noho izany ny fisafidianana izay karazam-boly mety amin'ny tantsaha dia miankina amin'ny tanjony sy ny halehiben'ny fambolena sy ny fiompiana ataony.

Teny manan-danja: voly rakotra, mololo, zezi-pahitra natsaraina, vokatra voany, ronono, fakan-kazo

Résumé

L'agriculture de conservation (AC) a été introduite à Madagascar dans l'objectif de maintenir la durabilité des cultures pluviales. L'AC et l'élevage de ruminants doivent être considérés comme des activités complémentaires et synergiques mais des compétitions pour l'utilisation de la biomasse peuvent néanmoins apparaître dans certaines circonstances. En effet, l'AC permet de fournir des ressources fourragères pour l'alimentation des ruminants. En contrepartie les ruminants recyclent une partie de la biomasse ingérée, mais non digérée, sous forme de fumier. Les ruminants permettent ainsi d'améliorer la fertilité du sol via l'apport de fumier. Le recyclage des nutriments au sein d'une exploitation mixte d'agriculture-élevage peut être optimisé en améliorant les techniques de conservation des résidus des cultures et des effluents d'élevage. Cette thèse vise à acquérir des connaissances pour une gestion optimisée des biomasses végétales et animales afin d'améliorer la production agricole. Le principe est de favoriser le recyclage des biomasses végétales et animales en limitant les pertes en nutriments au sein de l'exploitation agricole. Pour cela, trois systèmes de culture pluviale ont été suivis en milieu contrôlé durant trois campagnes (2013 à 2016) : (i) rotation du riz avec du maïs associé à crotalaire en AC, (ii) rotation du riz avec de l'avoine en AC et (iii) rotation du riz avec du maïs associé au haricot en labour. À l'intérieur de chaque système de culture, quatre types de fertilisation ont été comparés : (i) aucune fertilisation, (ii) 5 t ha⁻¹ de fumier conventionnel, (iii) 5 t ha⁻¹ de fumier amélioré et (iv) 5 t ha⁻¹ de fumier conventionnel + fumure minérale. Nous avons installé et suivi également les systèmes de culture *ii* et *iii*, et les deux fertilisations *ii* et *iii* en milieu paysan, pendant deux campagnes (2013 à 2015). Les rendements en grain de riz sont 27% et 48% supérieurs en utilisant le fumier amélioré ou la fumure minérale, respectivement, par rapport à la situation sans fertilisation. Pour les autres cultures, l'ordre d'importance des rendements en grain ou paille est similaire : fumure minérale > fumier amélioré > fumier conventionnel > sans fertilisation, mais la différence n'est significative que pour le maïs en milieu contrôlé. La production totale en grain (de toutes les cultures de la rotation) est plus élevée avec la rotation riz//maïs associé à la crotalaire et riz//maïs associé au haricot par rapport à la rotation riz//avoine. La production totale en paille de la rotation riz//maïs associé à la crotalaire est toujours significativement importante (10 à 17 t MS ha⁻¹) en comparant à celle des deux autres systèmes de culture, grâce à la forte

production de la crotalaire. Les rendements en paille ou en grain en milieu contrôlé et paysan sont similaires. Les racines de l'ensemble des plantes de chaque système de culture étudié permettent de restituer 18%, 27% et 28% du carbone total de toutes les biomasses aériennes et racinaires de la rotation riz//maïs associé à la crotalaire ($10,0 \text{ t C ha}^{-1}$ sur 2 ans), riz//avoine ($3,1 \text{ t C ha}^{-1}$ sur 2 ans) et riz//maïs associé au haricot ($3,6 \text{ t C ha}^{-1}$ sur 2 ans), respectivement. La simulation sur vingt ans du stock en C du sol (horizon 0 à 30 cm) montre que le delta carbone est toujours positif sous la rotation riz//maïs associé à la crotalaire quand le stock en C total initial est inférieur à 160 t C ha^{-1} . Sous culture de riz//avoine et riz//maïs associé au haricot, le stock en C du sol peut être maintenu à l'équilibre, même en exportant 90% de la biomasse végétale aérienne pour l'alimentation animale, si le stock en C initial est de 60 t C ha^{-1} . À chaque augmentation de 10 t C ha^{-1} du stock en C initial, les biomasses des rotations riz//avoine et riz//maïs associé au haricot exportées doivent être réduites respectivement de 17% et de 13% pour maintenir le stock en C initial. Ainsi, le delta carbone des rotations riz//avoine et riz//maïs associé au haricot devient négatif si les stocks en C de départ sont respectivement supérieurs à 110 et 130 t C ha^{-1} . Pour ce qui concerne la restitution d'azote au sol, elle est également plus importante avec la rotation riz//maïs associé à la crotalaire ($164 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) en comparant avec les deux autres rotations (de l'ordre de $45 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$). En contrepartie, la rotation riz//avoine permet une production importante de lait (jusqu'à $3\,640 \text{ l ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) par rapport aux autres rotations, riz//maïs associé au haricot (19% inférieur) et riz//maïs associé à la crotalaire (41% inférieur). En revanche, la rotation riz//maïs associé au haricot permet une production plus importante en grain plus riche en protéine par rapport aux deux autres rotations. Cependant, en tenant compte de toutes les productions (lait, grain, azote résidé au sol), la rotation riz//maïs associé à la crotalaire est la plus intéressante économiquement, avec un gain de $330 \text{ à } 430 \text{ kAr ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ par rapport à la rotation riz//avoine, et de $60 \text{ à } 620 \text{ kAr ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ par rapport à la rotation riz//maïs associé au haricot, suivant le taux d'exportation de la biomasse végétale consommable par les animaux. Pour chaque système de culture, la vente du lait produit, en valorisant la biomasse végétale comme fourrage, permet d'acheter une forte quantité de fumier et des engrais minéraux pour améliorer la fertilité du sol afin d'accroître les productions en grain dont celles du riz pour l'alimentation humaine. Le choix du système de culture utilisé dépendra, au final, de l'objectif de chaque paysan et de la taille de son exploitation.

Mots clés : agriculture de conservation, biomasse végétale, fumier amélioré, grain, lait, racines

Abstract

Conservation agriculture (CA) has been introduced in Madagascar to maintain the sustainability of rainfed cropping system. CA and ruminant livestock production must be considered as complementary and synergistic activities. Nevertheless, in certain circumstances, the competition in the use of plant biomass can occur. CA provides fodder resources to feed cattle. In return, ruminants recycle one part of the biomass ingested, but not digested, into manure. Thus, ruminants allow the improvement of soil fertility via manure supply. Nutrient recycling within cro-livestock farms can be optimized by improving the techniques of conservation of crop residues and livestock effluents. This thesis aims to acquire knowledge for an optimized management of animal and vegetable biomass in order to improve agricultural production. The idea is to promote recycling of plant and animal biomass limiting nutrient losses within the farm. For this, three rainfed cropping systems were monitored in a research station during three seasons (2013 to 2016): (i) rotation of upland rice with maize intercropped with *Crotalaria grahamiana* under CA, (ii) rotation of rice with oat under CA and (iii) rotation of rice with maize intercropped with bean under conventional tillage (CT). In each cropping system, four types of fertilization were used: (i) no fertilizer, (ii) manure produced by conventional management techniques at 5 t ha⁻¹, (iii) improved manure at 5 t ha⁻¹, and (iv) conventional manure at 5 t ha⁻¹ + mineral fertilizer. We also implemented and monitored the two cropping systems (ii and iii), and the two types of fertilization (ii and iii) in farmers' fields, during two campaigns (2013-2015). Rice grain yield is 27% and 48% higher when using improved manure or mineral fertilizer compared to the situation with conventional manure and without fertilization, respectively. For the other crops, the order of importance of grain or straw yield is similar mineral fertilizer > improved manure > conventional manure > no fertilizer. However, the difference appears to be significant only for maize production. Total grain yield (of all the crops in the rotation) is much higher in the rotation rice//maize+crotalaire and rice//maize+bean than in the rice//oat rotation. The total production of straw by the rotation rice//maize+crotalaire is always significantly important (10 à 17 t DM ha⁻¹) compared to the two other cropping systems because of the high production of crotalaire. Grain or straw yields in research station and on-farm are similar. The roots of all plants in each cropping system studied can return to soil 18%, 27% and 28% of total carbon of all aerial and root biomass of the rotation rice//maize+crotalaire (10.0 t C ha⁻¹ for 2 years), rice//oat (3.1 t C ha⁻¹ for 2 years) and rice//maize+bean (3.6 t C ha⁻¹ for 2 years), respectively. The twenty-year simulation of the C soil stock (horizon 0 to 30 cm) shows that delta carbon for rice//maize+crotalaire rotation is always positive when the initial total soil carbon content is lower than 160 t C ha⁻¹. On rice//oat and rice//maize+bean systems, soil C stock can be maintained at equilibrium even when exporting 90% of the aerial plant biomass

for animal feed, if the initial C stock is 60 t C ha^{-1} . At each 10 t C ha^{-1} increase in the initial soil C stock, the biomass exported from rice//oat and rice//maize+bean rotations must be reduced by 17% and 13% , respectively, to maintain the initial C stock. Thus, the carbon delta of rice//oat and rice//maize+bean rotations becomes negative if the initial C stock is greater than 110 t C ha^{-1} and 130 t C ha^{-1} , respectively. Regarding the nitrogen restitution to the soil, it is also higher with the rotation rice//maize+crotalaire ($164 \text{ kg N ha}^{-1}/\text{year}$) comparing with to the other two rotations (around $45 \text{ kg N ha}^{-1}/\text{year}^{-1}$). In return, rice//oat rotation allows higher milk production (up to $3\,640 \text{ l ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) compared to the other rotations, rice//maize+bean (19% lower) and rice//maize+crotalaria (41% lower). On the other hand, rice//maize+bean rotation allows a higher production of grain rich in protein compared to the other two rotations. However, taking into account all the productions (milk, grain, nitrogen resituated to the soil), the rotation rice//maize+crotalaire is the most economically interesting, with a gain of 330 to $430 \text{ kAr ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ compared to rice//oat rotation and from 60 to $620 \text{ kAr ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ compared to the rotation rice//maize+bean, following the export rate of plant biomass consumable by animals. For each cropping system, the sale of the milk produced by enhancing vegetable biomass as forage allows purchasing higher quantity of manure and of mineral fertilizers to improve soil fertility and in order to increase grain production. The choice of cropping systems used will depend on the objective of each farmer and the size of his farm.

Keywords: conservation agriculture, vegetable biomass, improved manure, grain, milk, roots

Merci pour les corrections d'anglais Claudia !

Introduction générale

1 Contexte de l'étude

Le secteur agricole occupe la majorité des malgaches en intégrant plus de 80% de la population active (INSTAT, 2010). Or il représente seulement 27% de PIB (Produit intérieur brut) du pays. Diverses formes d'intensification agricole ont été menées pour améliorer la production (Rakotoarisoa et al., 2016). Cependant, des contraintes techniques, financières ou sociales limitent l'aboutissement de ces tentatives d'intensifications (Ralaifenomanana, 2009). La production agricole reste donc insuffisante et en décalage avec la croissance démographique. La projection du PNUD évalue la croissance démographique à 2,8% par an (INSTAT, 2010). Sur les Hautes Terres, les fortes pressions démographiques sur les surfaces cultivables en riz irrigués ont conduit à l'exploitation des collines ou des parcelles en pente qui sont généralement pauvres et exposées au phénomène de dégradation des sols. Des systèmes d'agriculture de conservation (AC), tels que définit par la FAO (2015) ont été introduits et diffusés à Madagascar afin d'améliorer la durabilité des cultures via la restauration de la fertilité du sol (Husson et al., 2012), le stockage de carbone dans le sol (Razafimbelo et al., 2006), la réduction du risque à l'érosion (Douzet et al., 2010), le contrôle des maladies (Dusserre et al., 2017; Sester et al., 2014). Toutefois, l'une des contraintes à l'adoption de l'AC est l'utilisation de la biomasse végétale dans l'alimentation animale (Corbeels et al., 2014). De plus, les effets de la couverture du sol sur les fonctions agro-écologiques varient suivant sa quantité (Naudin et al., 2015) et le type des résidus. Néanmoins, l'agriculture en AC et l'élevage peuvent être complémentaires et leur intégration peut avoir un intérêt économique (Andriarimalala et al., 2013; Naudin et al., 2015). L'animal représente un levier essentiel pour améliorer la fertilité des sols par sa capacité à recycler une partie des nutriments au sol via le fumier (Salgado et Tillard, 2012 ; Koga and Tsuji, 2009). L'efficacité du recyclage des nutriments et de la production agricole dans une exploitation mixte agriculture-élevage peut être également améliorée en conservant au mieux le fumier produit (Rufino et al., 2007).

Les deux techniques agro-écologiques : agriculture de conservation et fumier amélioré sont donc traitées dans cette thèse. L'analyse des compromis entre les deux voies d'utilisation de la biomasse végétale est menée en combinant le maintien du stock en carbone du sol, la restitution de l'azote au sol et la production de lait. Pour cela, l'ensemble de la biomasse végétale c'est-à-dire les biomasses racinaires et aériennes, et la biomasse animale c'est-à-dire le fumier, seront quantifiées et évaluées.

2 Zone d'étude

La région de Vakinankaratra se situe sur les Hautes-terres centrales de Madagascar (19°52'S, 47°02'E), entre 1300 à 1800 m d'altitude (Figure 1). Elle est très peuplée avec 1 982 millions d'habitants dans une superficie de 16 599 km², soit 8% de la population nationale abritée dans 3% du territoire national. C'est une région où les exploitations combinent souvent agriculture et élevage bovin, porcin et petit élevage. L'agro-industrie qui fait augmenter l'économie de la région est également très développée sur les Hautes-terres. Elle favorise également les activités d'agriculture et d'élevage par : (1) l'achat des produits agricoles, par exemple SOCOLAIT ou la coopérative ROVA qui collecte et transforme le lait, la STAR qui travaille avec les paysans pour la production de l'orge ; et (2) par la vente d'autres alimentations animales comme le drèche, sous-produit de la STAR, ou les fourrages produites par ROVA.

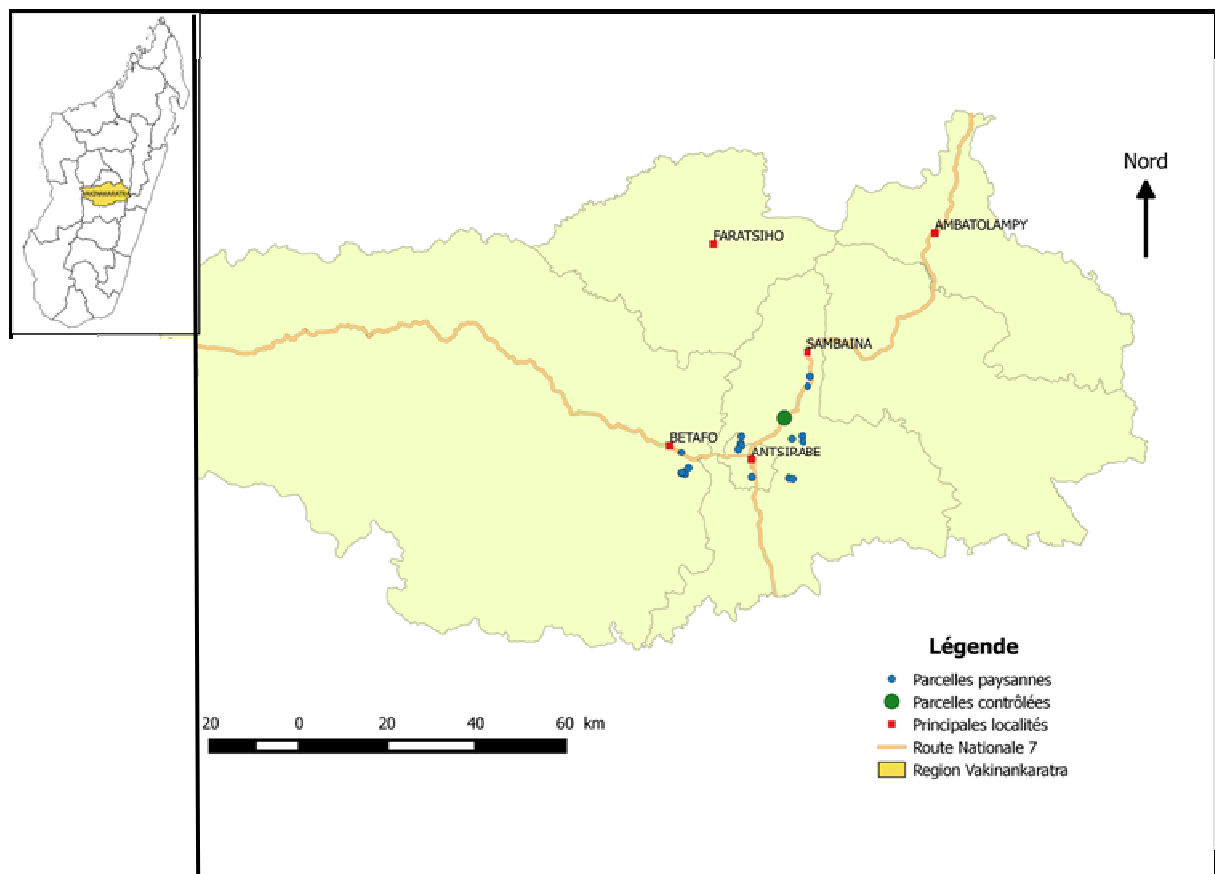


Figure 1 : Région de Vakinankaratra, Madagascar (FTM, BD 800)

Parmi les cultures vivrières, le riz reste la culture principale. La production rizicole a fortement augmenté depuis les années 2007 due à l'expansion des cultures du riz pluvial, favorisé surtout avec la diffusion de variétés menée par le CIRAD et le FOFIFA depuis les années 2000 (Raboin et al., 2011), mais également à la pratique des cultures de contre saison avec un apport important de fertilisation qui ont un impact positif sur le riz irrigué en succession. Depuis les années 2000, les cultures pluviales se sont très développées, la pratique

de riz pluvial par exemple a augmenté jusqu'à 30% en 2005 et 71% en 2011 (Raboin et al., 2014). La diversification des cultures, en pratiquant la rotation et l'association culturales, est également répandue en rapport avec la faible superficie cultivable dans la région. La culture des pommes de terre, patate douce, maïs et haricot est largement pratiquée après le riz pour l'autoconsommation et une partie pour des revenus monétaires (EPP PADR et APB Consulting, 2009). Cependant, les parcelles de *tanety* qui sont fortement utilisées pour l'agriculture sont encore pauvres voire même dégradées. La restauration de la fertilité du sol s'avère être alors important afin d'assurer une production durable.

Pour ce qui est de l'élevage, la région de Vakinankaratra se situe au cœur du triangle laitier de Madagascar. L'élevage des vaches laitières constitue une importante source de revenu des agriculteur-éleveurs. Malgré l'impact de la crise de 2009 sur les débouchés du lait dans la région de Vakinankaratra, les éleveurs ont pu s'adapter en recherchant de nouveaux débouchés et en adoptant des politiques de production du lait. Par exemple, en réduisant la production de lait ou en diminuant le nombre des vaches laitières dans l'objectif de diminuer également la dépendance des intrants extérieurs.

L'intégration agriculture-élevage dans la région est un atout potentiel pour favoriser le recyclage de nutriments dans une exploitation. L'agriculture en AC par la diversification permet une source fourragère pour l'alimentation animale, et l'animal procure de l'énergie pour le travail agricole et des effluents pour la fertilisation des cultures. Dans ce contexte, il est important de mieux gérer l'utilisation de la biomasse végétale et la conservation du fumier produit pour améliorer la fertilité du sol, la production végétale (grain et fourrage) et animale (Blanchard et al., 2013).

3 Innovations agro-écologiques

L'agro-écologie consiste à « concevoir des formes d'agriculture durable en considérant des pratiques respectueuses de l'environnement, ... et un recyclage des sous-produits et déchets » (Dugué et al., 2017). Nous avons considéré deux techniques agro-écologiques qui permettent de favoriser l'intégration agriculture-élevage dans cette thèse : (1) l'agriculture de conservation et (2) le fumier amélioré.

3.1 Agriculture de conservation

L'agriculture de conservation (AC) est promue dans le monde entier pour réconcilier sécurité alimentaire et lutte contre le réchauffement climatique. Elle a pour objectif de mobiliser des processus écologiques afin de produire des services écosystémiques et d'assurer les fonctions nécessaires à la production agricole. Elle est basée sur trois principes (FAO, 2015) :

- Travail minimal du sol : La technique est de minimiser la perturbation du sol afin de favoriser les activités biologiques du sol et de ralentir la minéralisation du carbone et de l'azote ;
- Couverture permanente du sol : L'objectif est de protéger le sol contre l'érosion, réduire la pression des adventices et assurer des conditions favorables au développement de l'activité biologique. La couverture du sol peut être morte en utilisant les résidus végétaux de la culture précédente ; vivante en associant d'autre plante avec la culture principale, ou mixte.
- Association et/ou rotation culturale : L'objectif est de produire plus de biomasse végétale pour assurer la couverture permanente du sol. Le principe est d'utiliser des plantes multifonctionnelles suivant l'objectif de production de l'agriculteur. Cette technique augmente la restitution de carbone au sol et améliore la fertilité du sol via la restitution d'azote (Wang et al., 2017).

L'AC a été introduite à Madagascar au début des années 1990 dans l'objectif d'améliorer la fertilité des sols agricoles des Hautes Terres, de limiter l'érosion hydrique dans la région d'Alaotra et d'améliorer l'efficience en eau des parcelles agricoles de la région du Sud-ouest. Elle visait alors à assurer la durabilité des systèmes de culture. Actuellement, la pratique de l'AC est toujours peu répandue dans ces trois régions mais certaines composantes de la technique sont passées petit à petit dans les habitudes de certains paysans. En effet, l'adoption de l'AC dépend de plusieurs facteurs, et varie en fonction des contraintes et des objectifs de production des paysans. Dans cette thèse, nous avons donc proposé d'évaluer trois systèmes de culture à trois orientations de production différentes, dont deux conduits en AC : (1) riz // maïs (*Zea Mays*) + *Crotalaria grahamiana* et (2) riz // avoine (*Avena sativa*) + vesce (*Vicia vilosa*) et un autre en labour (3) riz // maïs + haricot (*Phaseolus vulgaris*). Le premier système avec l'utilisation de la crotalaire est orienté vers l'amélioration de la fertilité du sol via la couverture du sol ; le deuxième avec l'utilisation de l'avoine est orienté vers la production de fourrage pour l'alimentation des animaux et pour la production laitière; et le troisième est orienté vers la production de grain pour l'alimentation humaine. Nous avons également développé des études sur l'intégration agriculture-élevage afin de tenir en compte les compromis d'utilisation de la biomasse végétale pour la couverture du sol et l'alimentation des animaux.

3.2 Fumier amélioré

Le fumier figure parmi les sources fertilisantes les plus utilisées à Madagascar à cause notamment du coût élevé des fumures minérales. La plupart des paysans malagasy sont généralement des exploitants mixtes agriculture-élevage. Il est alors important de bien gérer les ressources disponibles dans l'exploitation afin de mieux recycler les nutriments et de bénéficier des avantages procurés par l'agriculture pour l'élevage et *vice versa*. L'efficience

de recyclage de l'azote dans une exploitation dépend surtout de la gestion de la conservation de fumier (Rufino et al., 2007). L'efficacité de conservation de l'azote dans le fumier peut varier de 0 à 87% (Rufino et al., 2006, Salgado et al., 2014) pendant la conservation et de 14 à 73% (Salgado et al., 2014) entre la sortie de fumier du lieu de stockage et son épandage sur la parcelle. Le fumier amélioré correspond alors à un type de fumier plus riche en éléments nutritifs (27 g N kg⁻¹ MS, 4 g P kg⁻¹MS, 9 g K kg⁻¹MS) que le fumier de ferme traditionnel (2 à 15 g N kg⁻¹ MS et 2 à 3 g P kg⁻¹MS, 4 à 7 g K kg⁻¹MS) (Fiche technique). L'utilisation de fumier amélioré permet de réduire l'émission de N₂O et par conséquent de recycler une part importante des éléments nutritifs dans l'exploitation (Snyder et al., 2014).

La valeur fertilisante de fumier peut être améliorée par des pratiques de gestion de conservation, des techniques d'épandage sur la parcelle, des ajouts d'autres composants de fumier (Salgado et Tillard, 2012). Les améliorations de l'étable par l'utilisation d'une dalle sur le sol, le stockage de fumier dans une fosse et/ou protégé de préférence par un toit, et la réduction du temps de stockage, limitent les pertes d'azote dans le fumier. En fait la dalle évite la perte d'azote par lessivage surtout lors de la saison pluvieuse ; le stockage de fumier dans une fosse et protégé par un toit limite les pertes d'azote par volatilisation ; l'ajout de lisier de porc et/ou des fientes de volailles enrichie la valeur fertilisante de fumier ; l'ajout de paille protège l'azote dans le fumier contre le lessivage et la volatilisation. Le jour d'épandage de fumier sur la parcelle et sa sortie de l'étable doivent être le même pour éviter que l'azote dans le fumier se volatilise rapidement surtout quand le fumier n'est pas protégé. Après l'épandage, il est préférable de recouvrir le fumier par du sol.

Dans cette thèse, nous évaluons l'impact de l'utilisation de ce fumier amélioré sur le rendement agricole et sur le flux partiel d'azote dans une exploitation agricole mixte de cultures pluviales et d'élevage bovin.

4 Objectifs et hypothèse

L'objectif général de la thèse est de contribuer à l'acquisition des connaissances pour une gestion optimisée des biomasses végétales et animales dans le but d'accroître la production agricole (animale et végétale) tout en réduisant les pertes en nutriments et en carbone à l'échelle d'une exploitation agricole.

Les objectifs spécifiques sont de :

- évaluer l'importance des racines des cultures pluviales sur la restitution de carbone au sol ;

- déterminer les effets des techniques agro-écologiques (agriculture de conservation et fumier amélioré) sur la production en grain et en biomasse végétale des cultures pluviales ;
- simuler la dynamique du carbone du sol des cultures pluviales suivant les différentes options d'utilisation de la biomasse végétale ;
- évaluer le flux d'azote et la production laitière dans une exploitation agricole suivant les options d'utilisation de la biomasse végétale ;
- déterminer les compromis d'utilisation de la biomasse végétale aérienne sur la production animale et la fertilité du sol.

Ces objectifs seront traités dans les cinq derniers chapitres de la thèse (Figure 2) allant de petite à grande échelle, et ils sont regroupés suivant les trois hypothèses de travail. Ces cinq chapitres ont été menés sur les mêmes dispositifs expérimentaux et certaines mesures effectuées sont communes.

Le premier chapitre développe la méthodologie générale de la thèse.

Hypothèse 1 : « Les racines contribuent d'une manière importante à la restitution de matière organique au sol ».

Nous cherchons à confirmer ou infirmer cette hypothèse dans les chapitres 2 et 3. Le deuxième chapitre « *Relation entre longueur et poids des racines de riz pluvial* » est une étude méthodologique sur la relation entre longueur et poids des racines dans le but de mettre en relation le rôle des racines dans l'apport en carbone au sol et la nutrition des plantes. Le troisième chapitre « *Contribution des racines des cultures pluviales à la restitution du carbone au sol* » présente les biomasses racinaires des cultures étudiées et illustre la capacité de chaque système de culture à produire du carbone dans le sol. Il répond alors au premier objectif spécifique, et est élargi sur les autres matières organiques comme la biomasse végétale aérienne et le fumier, sources de carbone du sol dans les chapitres suivants.

Hypothèse 2 : La gestion d'utilisation de la biomasse végétale influe beaucoup dans l'amélioration ou le maintien du stock en carbone du sol

Le chapitre 4 « *Impact des innovations agro-écologiques sur la production en grain et en biomasse des cultures pluviales* » détaille la production en grain et biomasse végétative de chaque culture et système de culture suivant différents types de fertilisation (Objectif 2). Cette partie est indispensable avant de développer le chapitre 5 « *Effet de la gestion d'utilisation de la biomasse végétale et animale sur le stock en carbone du sol* ». La possibilité de restitution de la biomasse végétale dépend surtout de la production de cette biomasse et de son exportation pour l'alimentation animale (Objectif 3). Nous allons vérifier l'hypothèse 2 dans ce chapitre 5.

Hypothèse 3 : La pratique des innovations agro-écologiques et la bonne gestion d'utilisation de la biomasse végétale favorisent le recyclage de nutriments dans une exploitation et améliorent la production agricole (animale et végétale)

Le chapitre 4 et le chapitre 6 « *Gestion d'utilisation de la biomasse végétale et animale et le flux d'azote dans une exploitation agricole* » permettent de répondre à cette troisième hypothèse. Le chapitre 6 analyse le flux partiel d'azote dans une exploitation mixte agriculture – élevage, ce qui permet par la suite l'évaluation de la production laitière de chaque système de culture (Objectif 4). Le flux obtenu dans cette partie est partiel parce que l'étude est menée seulement sur la culture pluviale (côté agriculture) et les vaches laitières (côté élevage). Une synthèse de tous les résultats : les productions agricoles c'est-à-dire la production animale (lait) et végétale (grain), l'équivalence en urée de l'azote restitué au sol, et le maintien du carbone au sol sera présentée dans la conclusion générale afin de synthétiser les impacts des systèmes de culture étudiés.

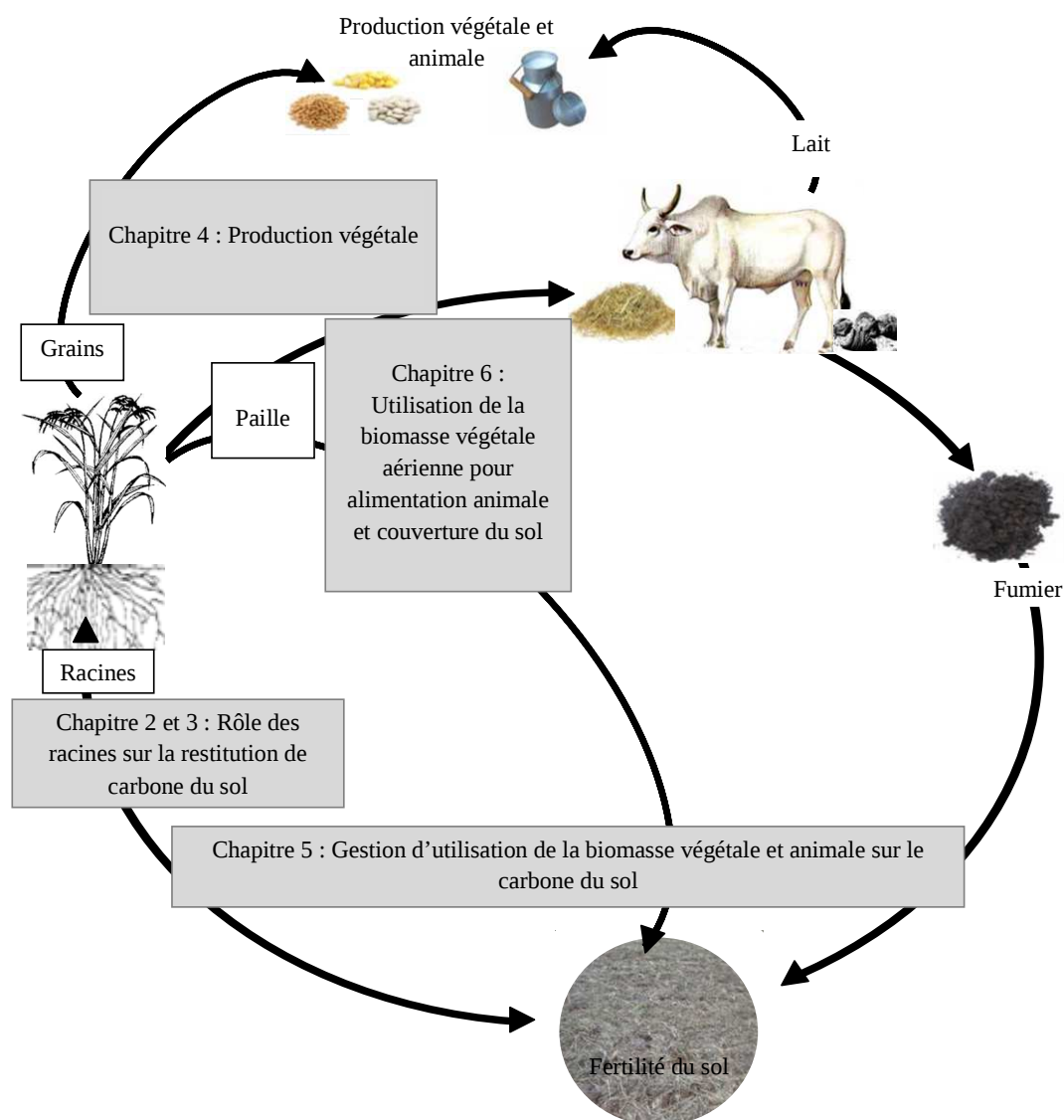


Figure 2 : Schéma conceptuel de la thèse

Chapitre 1 :
Méthodologie générale de la thèse

Dans le cadre de cette thèse, différentes mesures (Figure 3) ont été effectuées afin de mieux répondre à la question de recherche « Les innovations agro-écologiques proposées sont – elles réellement des solutions adéquates pour l’augmentation et la durabilité de la production agricole des paysans malgaches ? ». Ainsi, la contribution de toutes les biomasses végétales (aérienne et racinaire) et animales, que ce soit direct ou indirect, sur la production agricole sont étudiés dans cette thèse. Des essais expérimentaux en milieu contrôlé et en milieu réel ont été conduits dans la région de Vakinankaratra, Madagascar (Figure 4), durant les campagnes culturales 2013-2014, 2014-2015, 2015-2016. En milieu contrôlé, la variabilité est relativement faible parce que certains facteurs influençant l’essai sont maîtrisés, par exemple l’homogénéité des parcelles utilisées, les opérations culturales, le contrôle des bioagresseurs tels les adventices et insectes. De plus, les essais en milieu contrôlé ont été conduits sur des parcelles déjà cultivées depuis 2003 avec le même mode de gestion des sols et fertilisation. Or les systèmes en AC n’expriment souvent leur intérêt qu’après plusieurs années. Il était alors fort utile de pouvoir bénéficier de ces effets à moyen terme de l’AC. Les essais conduits en milieu réel permettent de connaître quelle est l’ampleur de la variabilité de la réponse de la production et autres variables aux traitements testés.

Les dispositifs d’essai utilisés et certaines mesures réalisées sont communs dans les différents chapitres de la thèse. Ce chapitre présente donc la description de la zone d’étude, des dispositifs expérimentaux et des mesures effectuées sur chaque dispositif.

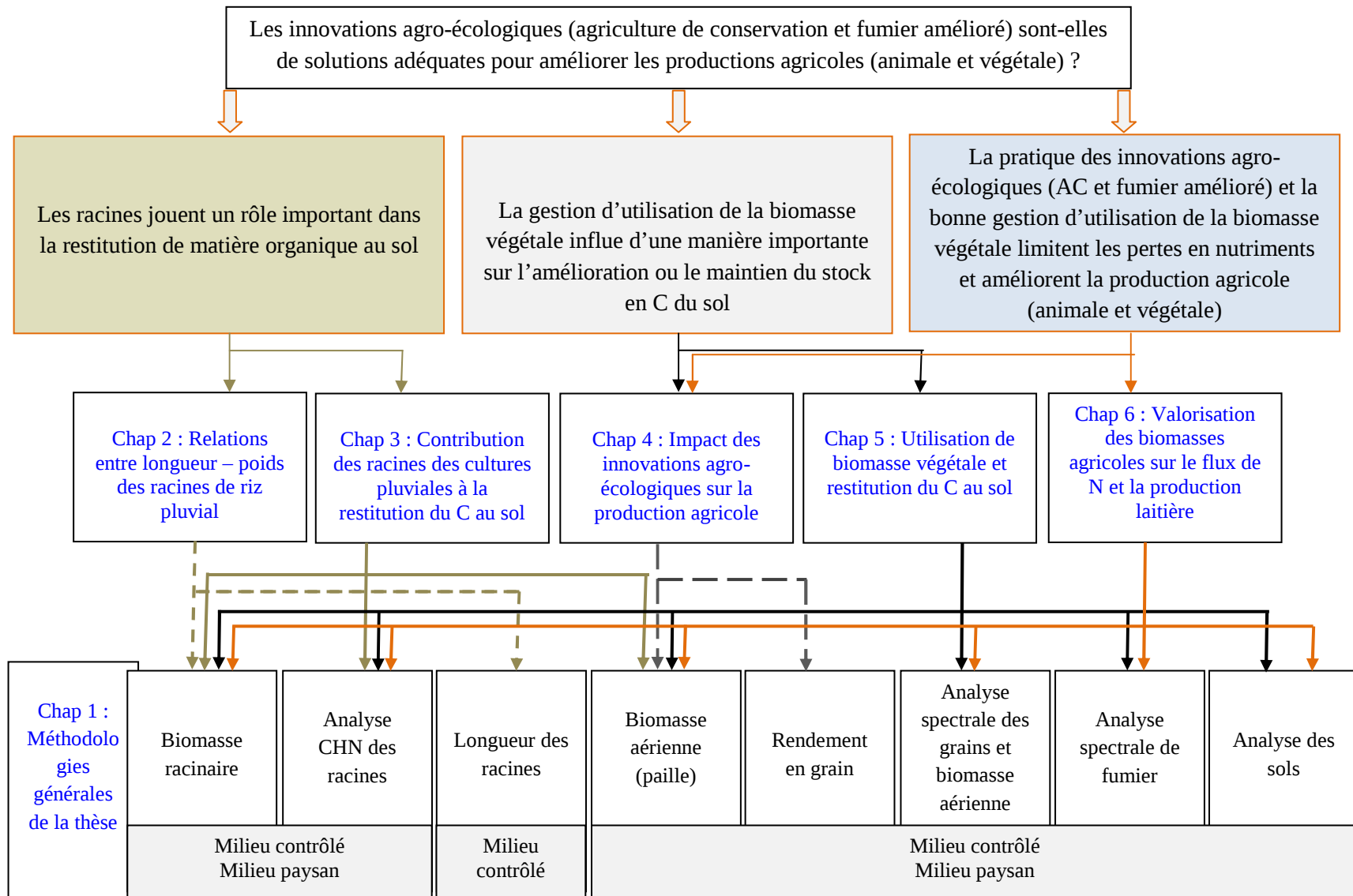


Figure 3 : Schéma méthodologique de la thèse

1 Zones expérimentales

L'expérimentation conduite sur un dispositif expérimental en milieu contrôlé se situe à Andranomanelatra (19°47'S, 47°06'E, 1640 m) à 15 km au nord-est d'Antsirabe, et celle menée sur des parcelles paysannes se situent autour d'Andranomanelatra-Antsirabe et Betafo (19°53'S, 46°54'E, 1542 m) à 22 km au sud-ouest d'Antsirabe (Figure 4).

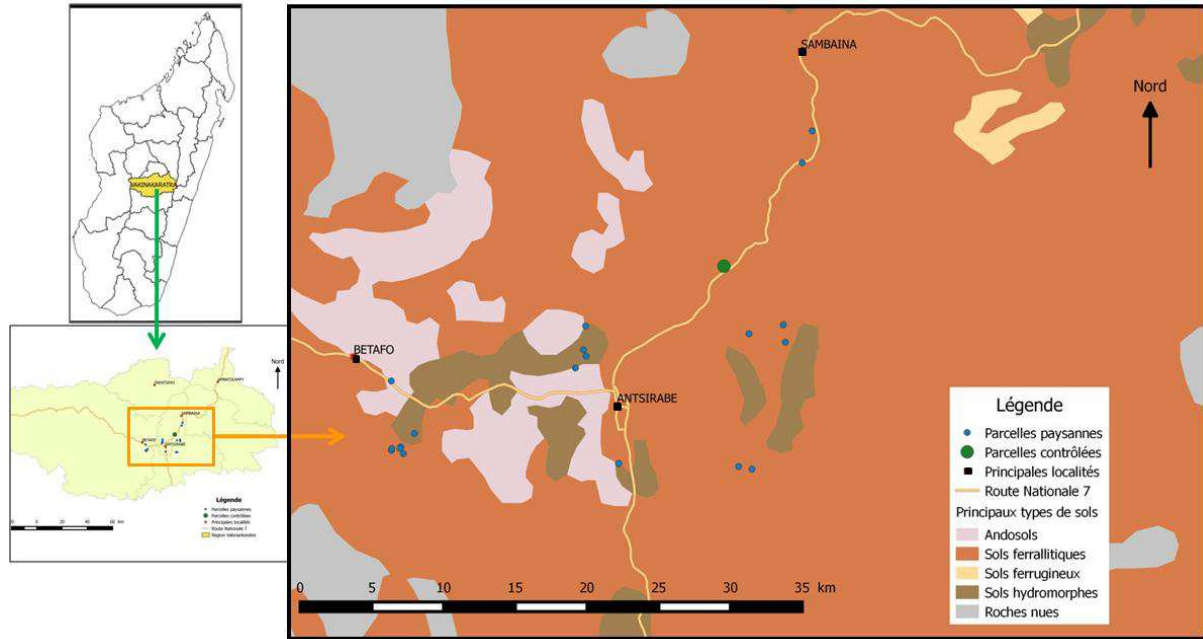


Figure 4 : Situation géographique et pédologiques des sites expérimentaux.

1.1 Climat

La région est caractérisée par un climat tropical d'altitude divisé en deux saisons : une saison chaude et humide, à partir du mois d'octobre jusqu'en avril, avec une température moyenne de 19,1°C; et une saison sèche et froide, à partir du mois de mai à septembre, avec une température minimale de 6°C (en juillet) et une moyenne mensuelle de 14,8°C. Les pluviométries annuelles en 2013-2014, 2014-2015, 2015-2016 sont respectivement de 1308 mm, 1564 mm et 1511 mm. La pluie enregistrée la première année de l'expérimentation est proche de la moyenne annuelle (1319 mm), moyenne de 2003 à 2013 ; et est supérieure à la moyenne annuelle des deux dernières campagnes de l'expérimentation (Figure 5). En 2014-2015, la pluie mesurée durant les mois de janvier à mars est beaucoup plus abondante à Betafo que celle mesurée à Andranomanelatra.

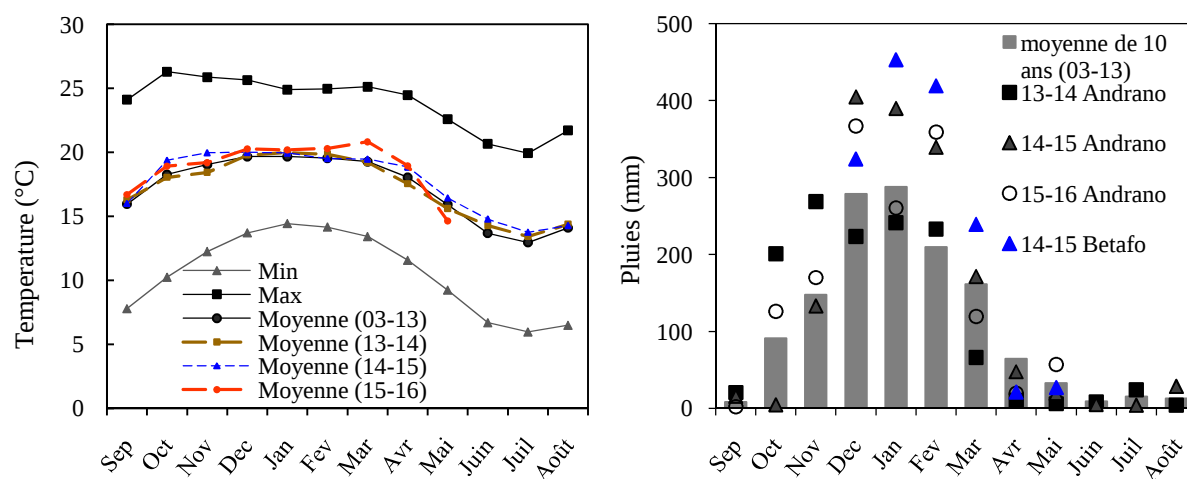


Figure 5 : (a) Température et (b) pluviométrie enregistrées avec la station CIMEL, Andranomanelatra et avec le pluviomètre installée à Betafo (parcelles paysannes) pendant les années 2003-2013, 2013-2014, 2014-2015, 20015-2016.

1.2 Sols

Les parcelles de tanety des Hautes Terres de Madagascar sont principalement constituées de sol ferralitique. Toutefois, il y a également des sols formés sur alluvions à hydromorphie qui se situent généralement dans les bas fonds (Figure 4). Dans la zone d'Andranomanelatra, une superposition des deux couches I et II forme le profil pédologique (Razafimbelo, 2005) dont la texture est argileuse, voire très argileuse dans l'horizon II. Cependant, ces sols présentent également des caractères andiques qui peuvent influencer les potentialités de stockage du carbone au sol. Ce sol est classifié comme ferralitique fortement désaturé, humifère sur matériau volcanique acide (Razafimbelo et al., 2006). La porosité est assez bonne et le pH est faible (4,8) (Chapitre 4). Dans la zone de Betafo, une superposition de deux horizons I et II est également observée, de texture limono-argileuse ou limoneuse. En général, les sols de Betafo ont des caractéristiques andiques (Raunet, 1981). Les teneurs en carbone des parcelles d'expérimentation sont très variables mais sont généralement élevées (supérieurs à 2%) sauf sur deux parcelles paysannes sableuses (de l'ordre de 0,6 % à 1,6% suivant les profondeurs). Ces teneurs en C sont encore plus élevées sur les parcelles situées à Betafo (supérieur à 5%) (Chapitre 4).

2 Expérimentation en milieu contrôlé

2.1 Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental conduit en milieu contrôlé à Andranomanelatra a été utilisé pour ce travail de thèse pendant les campagnes culturales 2013-2014, 2014-2015 et 2015-2016.

Trois systèmes de culture, de différentes vocations, à base de riz pluvial (*Oryza sativa*), variété Chhomrhong Dhan, ont été comparés : (1) rotation de riz pluvial avec l'association de maïs (*Zea mays*), variété locale « Tombontsoa » et de *Crotalaria grahamiana* en AC, noté R/M+C, utilisé surtout pour l'amélioration de la fertilité du sol via l'utilisation de biomasse de crotalaire pour couverture du sol ; (2) rotation de riz pluvial avec l'association de l'avoine (*Avena sativa*), variété Fanantenana et de la vesce (*Vicia vilosa*), variété Mahavokatra en AC, noté R/A+V, plus orienté vers l'alimentation animale via la production de fourrage d'avoine ; et (3) rotation de riz pluvial avec l'association de maïs et du haricot (*Phaseolus vulgaris*), variété RI 5-2, en conventionnel de labour, noté R/M+C, plus orienté vers la production de grain (riz + maïs + haricot). A l'intérieur de chaque système de culture, quatre traitements de fertilisation ont été testés : (1) sans apport de fertilisation (F0), (2) apport de 5 t ha⁻¹ de fumier conventionnel (FuC) (13 gN kg⁻¹MS, 3,6 gP kg⁻¹MS), (3) apport de 5 t ha⁻¹ de fumier amélioré (FuA) (26 gN kg⁻¹MS, 5,5 gP kg⁻¹MS), et (4) apport de 5 t ha⁻¹ de FuC appliqué avec de la fumure minérale (Fm) (100 kg ha⁻¹ de NPK 11-22-16 + 100 kg ha⁻¹ de l'urée (46%N) appliqué en deux apports). Les résidus de récolte sur les parcelles en AC ont été totalement restitués pour couvrir le sol tandis que ceux obtenus sur les parcelles en labour ont été complètement exportés de la parcelle.

Quatre blocs correspondant à quatre répétitions et deux anciennes fertilisations différentes (fumier et fumure minérale noté respectivement exFu et exFm) ont été utilisés pour chaque système de culture et les types de fertilisation. Les niveaux de fertilisation exFu ou ancienne fumure organique et exFm ou ancienne fumure minérale ont été respectivement séparé en deux sous-niveaux formant au total quatre niveaux de fertilisation : F0, FuC, FuA et Fm. Les deux cultures en rotation, c'est-à-dire le riz et les cultures associées (maïs + crotalaire, avoine + vesce, maïs + haricot), ont été installé côte à côte chaque année. En somme, il y a total 192 parcelles élémentaires de 10 m x 10 m cultivées chaque année (Figure 6). Dans cette thèse nous n'avons utilisé que les données en exFu afin d'éviter l'effet de l'ancienne fertilisation minérale sur les quatre types de fertilisation testés pendant la thèse.

En 2014-2015, des parcelles en culture pure de crotalaire, maïs, haricot, avoine et vesce ont été installées dans le but de comparer les racines de chaque type de plante en culture associée avec celles en culture pure. Ces cultures pures ont été cultivées avec les mêmes densités que celles des cultures en association (Figure 7). Les données issues de cette expérimentation complémentaire seront utilisées dans le chapitre 3 qui traite de la contribution des racines des cultures à la restitution du carbone dans le sol.

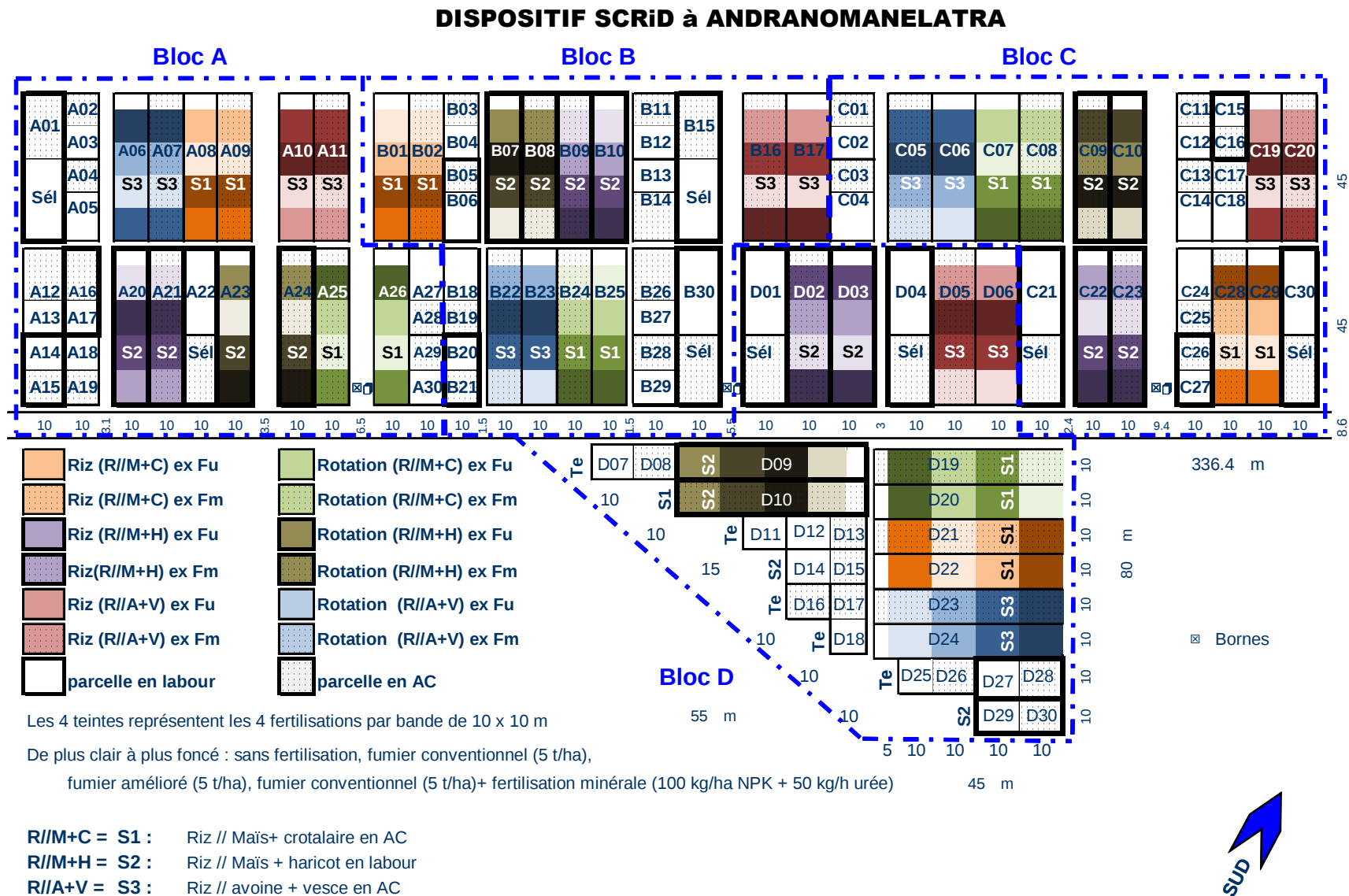


Figure 6 : Dispositif expérimental en milieu contrôlé

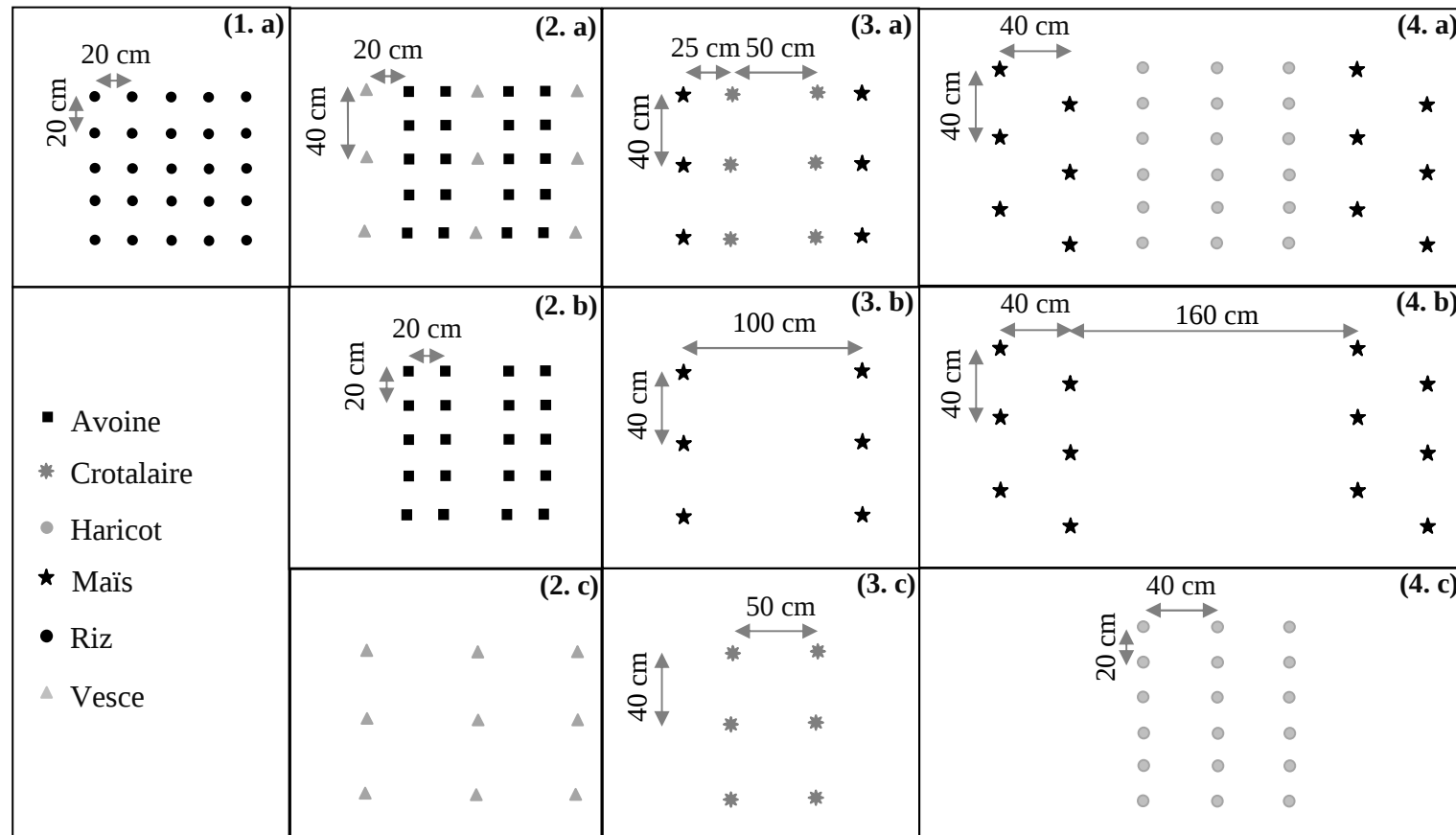


Figure 7 : Densité de semis de (1) riz, (2. a) avoine + vesce, (2. b) avoine pure, (2. c) vesce pur, (3. a) maïs + crotalaire (M+C), (3. b) maïs pur (M+C), (3. c) crotalaire pur (M+C), (4. a) maïs + haricot (M+H), (4. b) maïs pur (M+H), (4. c) haricot (M+H)

Ce dispositif a été installé en 2002, soit onze ans avant notre expérimentation. Depuis la première installation du dispositif, trois changements de système de culture ont été faits suivant les objectifs de la recherche effectuée. Le système R//M+C a été pratiqué deux ans avant l'expérimentation. Par conséquent le riz dans ce système a alors été cultivé sur de précédent maïs + Crotalaire alors que le riz dans les systèmes R//A+V et R//M+H a été cultivé sur des précédents maïs + haricot (radis) et maïs + crotalaire. Les cultures associées (maïs + crotalaire, avoine + vesce et maïs + haricot) ont été précédées par des cultures de riz. Par contre la gestion des sols, c'est-à-dire AC et labour, a été gardée, donc les parcelles sont déjà en labour ou en AC depuis onze ans. Le Tableau 1 synthétise l'historique du dispositif expérimental.

Tableau 1 : Historique des parcelles en milieu contrôlé depuis 2002, conduites en agriculture de conservation (AC) et en labour

Système 2013- 2016	Avant notre expérimentation					Notre expérimentation		
	Gestion du sol	Culture				Culture		
	2002-2016	2002-2007	2007-2011	2011-2013	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016
R//M+C	AC	Riz // Haricot /	Riz // Maïs	Riz	Maïs + crotalaire	Riz	Maïs + crotalaire	Riz
R//M+C	AC	Avoine + Vesce	+ Haricot / Avoine	Maïs + crotalaire	Riz	Maïs + crotalaire	Riz	Maïs + crotalaire
R//A+V	AC	Riz // Avoine /	Riz // Maïs	Riz	Maïs + Haricot / Radis	Riz	Avoine + vesce	Riz
R//A+V	AC	Haricot + Raygrass	+ Soja / Radis	Maïs + Haricot / Radis	Riz	Avoine + vesce	Riz	Avoine + vesce
R//M+H	Labour	Riz // Haricot /	Riz // Maïs	Riz	Maïs + crotalaire	Riz	Maïs + Haricot	Riz
R//M+H	Labour	Avoine + Vesce	+ Haricot / Avoine	Maïs + crotalaire	Riz	Maïs + Haricot	Riz	Maïs + Haricot

// : rotation sur deux ans; / : rotation dans une année ; + : association

2.2 Mesures effectuées

Les mêmes mesures ont été effectuées chaque année : évaluation de la biomasse racinaire et aérienne, du rendement en grain et de la longueur des racines, analyse des échantillons de racines et de biomasse aérienne, et analyse de fumier utilisé (Tableau 2)

Tableau 2 : Mesures effectuées avec les essais en milieu contrôlé et en milieu réel

	Milieu contrôlé			Milieu réel		Chapitres concernés
	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2013-2014	2014-2015	
Evaluation des biomasses racinaires	x	x	x		x	2, 3, 5, 6
Evaluation de la longueur des racines de riz		x	x			2
Evaluation des biomasses aériennes	x	x	x	x	x	3, 4, 5, 6
Evaluation de rendement en grain	x	x	x	x	x	4, 6
Analyse CHN des racines	x	x			x	3, 5, 6
Analyse spectrale des biomasses aériennes	x	x	x	x	x	5, 6
Prélèvement et analyse des sols	x			x		5, 6
Analyse spectrale de fumier	x	x	x	x	x	5, 6

2.2.1 Evaluation de la biomasse racinaire

Le prélèvement racinaire a été effectué avec une tarière à racines Eijkelkamp® de 750 cm³ (Photo 1. 1, 1. 2) de volume, pendant la période de coupe de fourrage d'avoine, au moment de la floraison de chaque plante, période où les biomasses végétales (aérienne et racinaire) sont les plus importantes, et chaque mois jusqu'à la récolte pour la crotalaire afin de déterminer à quel moment elle atteint sa production maximale de biomasse. Les mesures ont été faites tous les 15 cm jusqu'à une profondeur maximale variant suivant les plantes cultivées et dans des endroits différents suivant le type des cultures (Chapitre 3). Les mottes de terre prélevées ont été par la suite lavées et tamisées (Photo 1.3) pour récupérer les racines.

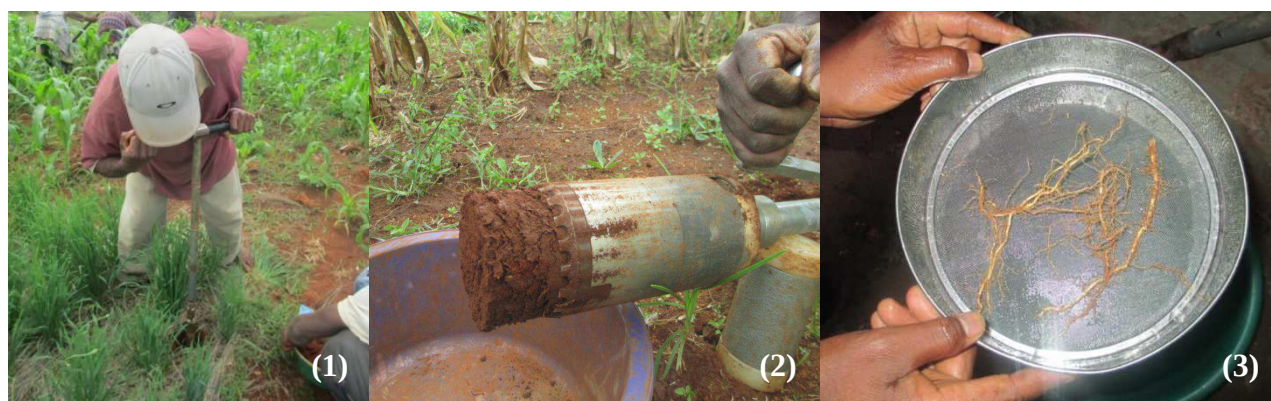


Photo 1 : Mesure de la biomasse racinaire : (1) et (2) prélèvement, (3) tamisage.

2.2.2 Détermination de la longueur des racines

La mesure de la longueur a été faite sur les racines de riz pendant la deuxième et la troisième année de l'expérimentation afin de déterminer les relations entre la longueur et le poids des



racines pour de futures études (Chapitre 2). La longueur a été évaluée en utilisant les grilles de Newman – Tennant (Photo 2). Cette méthode consiste à mettre les racines prélevées sur une grille quadrillée de 10 cm x 10 cm ; les intersections entre les lignes de 1 cm x 1 cm et les racines ont été comptées. La longueur totale des racines a été obtenue par la suite d'après la formule suivante (Tennant, 1975) :

$$LR = N \times \pi/2 \times S / L$$

Photo 2 : Comptage des intersections entre les racines et la grille.

LR : la longueur totale des racines (cm), N : le nombre d'intersections, S : la surface de la grille d'étalement (cm²), et L : la longueur totale des lignes de la grille, avec $L = n \times l$ dont n : le nombre des lignes de la grille (20) et l : la longueur d'une ligne.

2.2.3 Evaluation de la biomasse aérienne et du rendement en grain

La biomasse aérienne et le rendement en grain ont été évalués chaque année lors de la coupe de fourrage, à la floraison et à la récolte. La mesure a été effectuée dans un carré central de 5 m x 5 m lors de la coupe de fourrage et à la récolte, et pendant la floraison, à l'extérieur du carré central de 25 m², sur 4 placettes de 1 m² pour le riz et l'avoine et sur 2 m linéaire de la double ligne pour le maïs et le haricot (Chapitre 4).

2.2.4 Analyse CHN des racines

Les racines prélevées ont été broyées pour être analysées avec un microanalyseur CHN, dans le laboratoire de l'UMR Eco&Sol Montpellier, afin de déterminer la teneur en azote N et en carbone C de chaque type des plantes. Cette méthode de prélèvement analytique de l'ordre de milligramme convient pour les échantillons des racines avec de biomasse prélevée très faible.

2.2.5 Analyse spectrale de biomasse aérienne et de fumier

Les analyses spectrales ont été effectuées avec les échantillons de biomasse ou de fumier séchés et finement broyés en utilisant la Spectrométrie dans le Proche Infra-Rouge (SPIR) qui mesure les spectres entre 350 et 2500 nm (Photo 3, monochromateur LabSpec 4, ASD Inc., USA). La SPIR est basée sur la mesure de l'absorption des rayonnements infrarouges par la matière organique et la technique repose sur les propriétés vibrationnelles des molécules et leurs interactions avec la lumière (Chapitre 6).



Photo 3 : Lecture d'un échantillon avec la sonde (1) et spectre obtenu (2).

3 Expérimentation en milieu réel

3.1 Dispositif expérimental

Dix neuf parcelles paysannes de 8 ares ont été utilisées dont une douzaine de parcelles choisies autour d'Andranomanelatra – Antsirabe et les autres autour de Betafo. Les parcelles ont été choisies suivant les conditions suivantes : exploitant à la fois agriculteur et éleveur (exploitant mixte) ; exploitant possédant une parcelle suffisante pour notre essai (une parcelle de 8 ares ou deux parcelles de 4 ares) ; exploitant intéressé pour conduire les expérimentations ; exploitant déjà suivi (encadré) par FIFAMANOR auparavant dans le but d'avoir un maximum des données concernant chaque exploitant avant la première année de l'essai. Ils sont regroupés comme suit, selon les typologies des exploitants de Vakinankaratra effectuées dans le cadre d'une étude au sein de la région (Randrantoarimbola, 2015) :

- Classe 1 : regroupe les paysans avec une grande exploitation (9 exploitants), caractérisée par la présence des bovins supérieurs à 5, d'élevage de volailles supérieurs au nombre de 100 têtes, de surface cultivée de plus de 2 ha, de cultures fourragères ;
- Classe 2 : regroupe les paysans avec une exploitation moyenne (4 exploitants), caractérisée par la présence de 2 à 5 têtes de bovins, 20 têtes de volailles, de cultures fourragères ;
- Classe 3 : regroupe les paysans avec une exploitation moyenne (3 exploitants), caractérisée par la présence de 2 têtes de bovins, de cultures fourragères en culture pluviale;
- Classe 4 : regroupe les paysans avec une petite exploitation (2 exploitants), caractérisée par la présence de 1 à 2 bovins non laitiers et de l'absence de cultures fourragères.

Deux systèmes de culture: (1) riz pluvial en rotation avec l'association de l'avoine et de la vesce (R//A+V) en AC et (2) riz pluvial en rotation avec l'association de maïs et du haricot (R//M+H) en labour ; et deux types de fertilisation : (1) 5 t ha⁻¹ de fumier conventionnel (FuC) (13 gN kg⁻¹ MS, 3,6 gP kg⁻¹ MS) et (2) 5 t ha⁻¹ de fumier amélioré (FuA) (26 gN kg⁻¹ MS, 5,5 gP kg⁻¹MS) ont été comparés. La première année de l'expérimentation, toutes les

parcelles ont été labourées, et la même provenance de fumier amélioré ou conventionnel a été utilisée pour tous les essais en milieu contrôlé et réel. Comme en milieu contrôlé, les deux cultures en rotation, c'est-à-dire le riz et les cultures associées (avoine + vesce et maïs + haricot), ont été installées côte à côte chaque année. Par conséquent, 152 parcelles élémentaires de 10 m x 10 m ont été installées et suivies en milieu paysan.

Les précédents culturaux des parcelles paysannes utilisées pour l'expérimentation varient suivant la zone. La majorité des parcelles de riz, soit 60% ou 46 sur 76 parcelles de riz, ont été précédées par la culture de maïs associé avec une légumineuse (haricot ou soja), 13 et 10 parcelles installées respectivement après la culture de pomme de terre et du riz et les dernières après la culture de blé et de fourrage. Les cultures associées, avoine + vesce et maïs + haricot, ont été installées sur des anciennes parcelles de riz (26 parcelles), de maïs associé avec du haricot, du soja ou de la pomme de terre (24 parcelles), de pomme de terre (10 parcelles) et de blé, fourrage pour les restes des parcelles.

3.2 Mesures effectuées

Les mesures effectuées en milieu contrôlé ont été réalisées également en milieu paysan : évaluation des biomasses racinaires, aérienne et rendement en grain ; détermination de la teneur en C et N des racines avec l'analyse CHN, évaluation de la qualité des biomasses aériennes (fourrage, paille, grain) et de fumier avec des analyses spectrales (Tableau 2). En plus, des échantillons des sols de chaque parcelle paysanne ont été prélevés et analysés au début de l'expérimentation. Toutes les parties simulations dans la thèse ont été faites sur les données obtenues en milieu paysan alors que les données obtenues en milieu contrôlé ont servies à l'optimisation du modèle de dynamique de carbone.

Les mêmes méthodes d'évaluation de biomasse racinaire, d'analyse des racines, d'analyse de biomasse aérienne et de fumier ont été réalisées en milieu contrôlé et en milieu réel. Les biomasses aériennes et rendement en grain ont été évalués à partir de la moyenne des mesures sur les cinq placettes de 1 m², situées au nord, sud, est, ouest et au centre de chaque parcelle élémentaire.

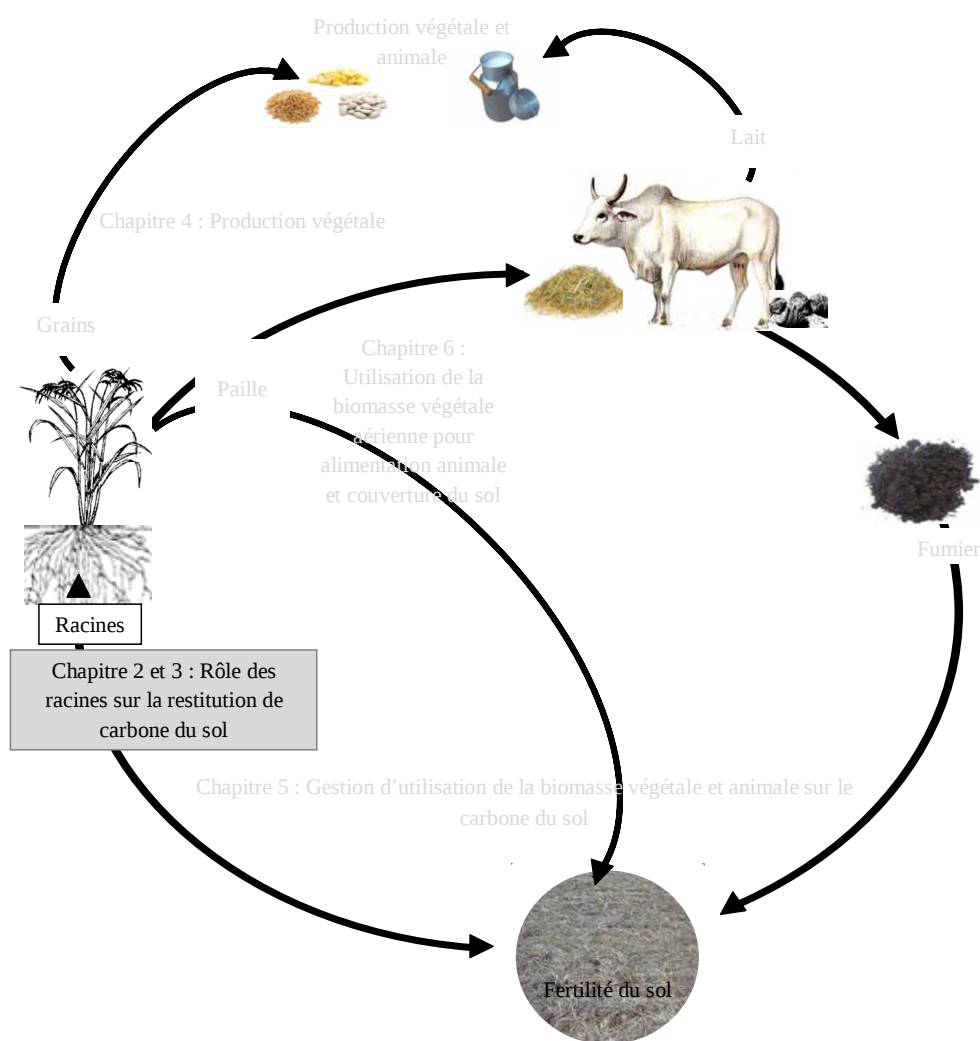
Le prélèvement des sols (Photo 4) a été effectué au début de l'expérimentation, sur les parcelles paysannes, afin de mesurer la teneur en C et N dans les sols, pour la détermination de la dynamique du C dans le sol et le flux de N au niveau d'une exploitation. La mesure a été effectuée sur les profondeurs 0-10, 10-20 et 20-30 cm. Le C et le N ont été mesurés par combustion au microanalyseur élémentaire CHN du laboratoire de l'IRD Eco&Sols à Montpellier.



Photo 4 : Prélèvement des sols.

Chapitre 2:

Relationships between root length and biomass of upland rice in the Madagascar Highlands



Soumis dans un journal international Soil Science and Plant Nutrition
Laingo Irintsoa Rasolofo, Jean-Louis Chopart, Julie Dusserre, Paulo Salgado, Tantely Razafimbelo, Krishna Naudin. Relationships between root length and biomass of upland rice in the Madagascar Highlands.

Abstract

The relationship between root length density (RLD) and root biomass density (RBD) is important when combining crop water and nutrient uptake for growth and studies of soil carbon sequestration. We studied this relationship in upland rice over a period of two years. The RLD and RBD of fine roots and thick roots were measured separately. The data from the first year were used as the calibration set. The best fit between the RBD and RLD was a power function for fine roots and for all roots and a linear regression for thick roots. The models were tested using data from the second year. Modeling RLD from RBD and *vice versa* was satisfactory for thick roots. For fine and all roots, modeling RLD from RBD was better than modeling RBD from RLD. Specific root lengths (SRL) of fine roots and all roots ranged from respectively 81 to 39 m g⁻¹ and 46 to 27 m g⁻¹ when RBD ranged from 15 to 150 g m⁻³ and 20 to 200 g m⁻³. Mean SRL was 13 m g⁻¹ for thick roots. These relationships predicted the RLD and RBD of upland rice in tropical conditions reasonably well.

Key words: root dry weight; root length density; root modelling; specific root length

1 Introduction

Agriculture and land-use change are major contributors to climate change through greenhouse gas emissions (IPCC, 2014). But agriculture can also capture and store carbon in soils thereby reducing concentrations of greenhouse gases in the atmosphere (Wassenaar et al., 2016). At the same time agriculture, and especially tropical agriculture, has to adapt to ongoing climate change (Howden et al., 2007). These two challenges, mitigation and adaptation, have been integrated in the concept of climate smart agriculture (Lipper et al., 2014), but as the subject is fairly new, few studies have evaluated the potential of varieties, crops, and cropping systems to contribute to the two objectives. In this context, crop roots are particularly interesting to study because they determine the capacity of the plant to exploit the water in the soil to the best possible degree and thus to adapt to periods of drought, for example. They are also an important source of biomass in an ideal position to contribute to carbon sequestration. However these two aspects of roots have not been widely studied to date. Studies of soil carbon sequestration focus on root biomass density (RBD) and on estimating the contribution of roots of soil carbon sequestration (Woodward and Osborne, 2000; Bolinder et al., 2002a; Kätterer et al., 2011); but to be able to model water and nutrient uptake by crops, it is also important to know their root length densities (RLD, mm⁻³) (Nodichao et al., 2011; Chopart et al., 2012; Dusserre et al., 2012).

This study concerns the root system of upland rice. Upland rice cropping has become a familiar part of the landscape in Madagascar's central highlands, a densely populated region mainly characterized by resource poor family farmers and cold climatic conditions (Raboin et

al., 2014). Very few authors have investigated both the RBD and RLD of rice because these measurements are very time consuming, Yoshida and Hasegawa (1982) studied the rice root system to understand its function and development in drought conditions. In our study, we looked for relationships between RBD and RLD and consequently, specific root length SRL (m g^{-1}), in a local variety of upland rice (Chhomrong Dhan), since SRL varies with the variety and with environmental conditions (Yoshida and Hasegawa, 1982). This variety is the most widely cultivated in this region (Raboin et al., 2014). Farmers appreciate the variety for its relatively high yield under low input conditions. A better knowledge of its root system is needed to understand its adaptation to environmental conditions and the roots' contribution to soil carbon sequestration. The objective of the study was to estimate RLD from RBD and *vice versa*. These correlations will be useful in studies on soil organic matter, and crop water and nutrient uptake.

2 Materials and methods

The study was carried out at Andranomanelatra (19°47'S, 47°06'E, 1,640m asl.) in the Vakinankaratra region of Madagascar during the 2014-2015 and 2015-2016 rainy seasons. The climate is tropical altitude with a warm rainy season from October to April and a cold dry season from May to September. The soil is classified as acid ferralsols (Razafimbelo et al., 2006).

The rice (*Oryza sativa*), variety "ChhomrongDhan" was sown in November in rainfed experiments lasting 170 to 175 days. This Nepalese variety, which is cold tolerant, proved to be well adapted to the rainfed cropping conditions of Madagascar's highlands (Raboin et al., 2014). Total rainfall was 1,563 and 1,483 mm, respectively in the 2014-2015 and 2015-2016 season; the average temperature was 20°C from sowing to flowering. Upland rice was sown in hills spaced 20 x 20 cm apart (25 hills per m^2), with different cropping systems and rotations. Each plot was fertilized with 5 t ha^{-1} of cattle manure (39% dry matter (DM), 2.7% DM nitrogen content).

2.1 Measurements

Root biomass was sampled at the rice flowering stage using the soil core method with respectively two and one replicates per individual plot in the 2014-2015 and 2015-2016 cropping seasons. Root augers 8 cm in diameter and 15 cm in length (volume 750 cm^3) were used. The number and location of the samples were adapted to crop geometry in order to take horizontal gradients into account with the minimum possible number of samples. Four 15cm soil layers (down to -60 cm) were sampled and each soil sample was washed individually in a 1mm mesh sieve to extract the roots on the same day as the samples were collected, or on the following day, in which case the soil cores were stored at 8°C. The roots were separated into two subsamples based on diameter (d): $d < 1 \text{ mm}$ for fine roots, and $d > 1 \text{ mm}$ for thick roots,

by visual evaluation. The root samples for biomass measurements were dried at 60°C for 72 h and weighed to determine dry weight. Lengths were evaluated using the Newman-Tennant intersection method (Tennant, 1975). Each layer of each core was weighed and its length was measured separately. Samples with RBD values $< 10 \text{ g m}^{-3}$ were removed from our data because, if very few roots are collected in soil cores, sampling and measurements of weight and length may be inaccurate and consequently, the relationships between RBD and RLD may also be inaccurate. In the end, 21 samples were used to establish the RLD:RBD calibration and 11 samples were used for the validation study. Modeling RLD from RBD or RBD from RLD of fine roots, thick roots and all roots was performed with data measured in the 2014-2015 season; we chose the function with R^2 closest to 1. The models were validated independently using data measured in the 2015-2016 season. The difference between measured and predicted values of RLD and RBD were analyzed by analysis of variance (ANOVA) and Tukey's test in R 3.2.2, by linear regression considering regression R^2 , slope and intercept, and by statistical quantities like Nash efficiency coefficient (NE) (Nash and Sutcliffe, 1970), mean bias (MB) and normalized root mean square error (RMSE) (Loague and Green, 1991). ANOVA was used after data transformation, to obtain the homogeneity of variance and to ensure that the data showed normal distribution. A nonparametric test was used for comparison when the data distribution was not normal.

3 Results and discussion

3.1 Model calibration

The RBD of upland rice ranged from 49 g m^{-3} in the deep horizons (45 – 60 cm) to 304 g m^{-3} in the top soil (0 – 15 cm). Most of the rice root biomass (70%) was located in the 0 – 30 cm soil layer. The biomass of the thick roots represented 60% of the rice root system located less than 15 cm under the base of the stem. The relationships between the RBD and RLD were fitted with a power function for all roots together and for fine roots, and with a linear regression for thick roots (Figure 8, Tableau 3). According to the power function of the fine roots and all RLD and RBD relationships (Tableau 3), SRL ranged from 81 to 39 m g^{-1} when RBD ranged from 15 to 150 g m^{-3} and from 46 to 27 m g^{-1} when RBD ranged from 20 to 200 g m^{-3} respectively, for the fine roots and all roots. The SRL of thick roots was 13.3 m g^{-1} (Tableau 3).

Tableau 3: Model calibration of the relationships between root biomass density (RBD g m^{-3}) and root length density (RLD m m^{-3}), with linear regression $\text{RLD} = a \text{ RBD}$ or power function $\text{RLD} = b \text{ RBD}^c$.

Roots	n*	RLD from RBD				RBD from RLD			
		a	b	c	R ²	a	b	c	R ²
Fine	18		194.0	0.68	0.90		0.06	0.88	0.88
Thick	18	13.26			0.87	0.07			0.87
All	21		90.8	0.77	0.93		0.08	0.91	0.94

*n = number of samples $> 10 \text{ g m}^{-3}$

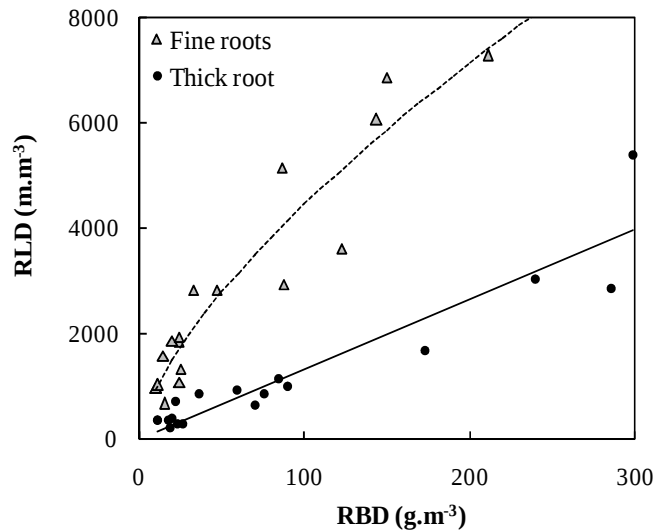


Figure 8: Model calibration (2014-2015). Relationships between root biomass density (RBD) and root length density (RLD), $\text{RBD} > 10 \text{ g m}^{-3}$, see Tableau 4 for model characteristics.

The RBD and RLD showed a good correlation for fine and thick roots. The correlation was also satisfactory when thick and fine root were not separated. A similar relationship between RBD and RLD has been reported in sugarcane (Chopart et al., 2010). Although when the thick and fine root were not separated, the relationships between RBD and RLD were good, their predictive power is probably lower than when they are used separately as the proportion of fine and thick roots may vary depending on the soil, the variety, the age of the plant, and the cropping system. Consequently, to estimate RLD from RBD and *vice versa*, the fine and thick roots should be separated if possible.

3.2 Model validation

The selected calibration models were validated using data measured in the 2015-2016 season. An ANOVA or a nonparametric test, at the 0.05 level of statistical significance, showed that measured and predicted RLD or RBD of fine roots, thick roots and all roots were not significantly different (Tableau 4). The model validation characteristics are summarized in Tableau 4. Modeling RLD from RBD and *vice versa* was satisfactory for thick roots. For fine roots and all roots, modeling RLD from RBD was better than *vice versa* (Figure 9). This

result may be due to the fact that the SRL of fine roots varies widely depending on the environmental conditions (Yoshida and Hasegawa, 1982). In addition, measurement errors may be caused by the difficulties involved in extracting fine roots in the field, as well as measuring their weight and length. The percentage of thick roots in the total root weight was similar to that found by Yoshida and Hasegawa (1982).

Tableau 4: Statistical analysis of RLD and RBD between measured and predicted values in the 2015-2016 season and model validation characteristics. ANOVA was used to compare means, Tukey HSD for ⁽¹⁾ log transformed values or ⁽³⁾ square-root transformed values, or a ⁽²⁾ nonparametric test, $\alpha = 0,05$.

Roots	Models	n*	Mean comparison	Linear relationship			Statistical quantities		
			p - value	Slope	Intercept	R ²	NE	MB (%)	RMSE (%)
Fine	RLD = bRBD ^c	14	0.116 NS ⁽¹⁾	0.87	-322.8	0.76	0.51	37.5	54.3
	RBD = b RLD ^c	14	0.737 NS ⁽¹⁾	1.05	-3.5	0.76	0.75	3.1	42.1
Thick	RLD = a RBD	11	0.543 NS ⁽²⁾	1.20	63.4	0.85	0.74	19.7	34.1
	RBD = a RLD	11	0.395 NS ⁽³⁾	0.76	12.1	0.85	0.71	15.5	34.5
All	RLD = b RBD ^c	14	0.734 NS ⁽²⁾	0.79	203.6	0.82	0.70	17.2	36.5
	RBD = b RLD ^c	14	0.863 NS ⁽³⁾	1.07	-14.2	0.80	0.80	4.2	34.9

NS: no significant difference, *number of samples > 10g m⁻³

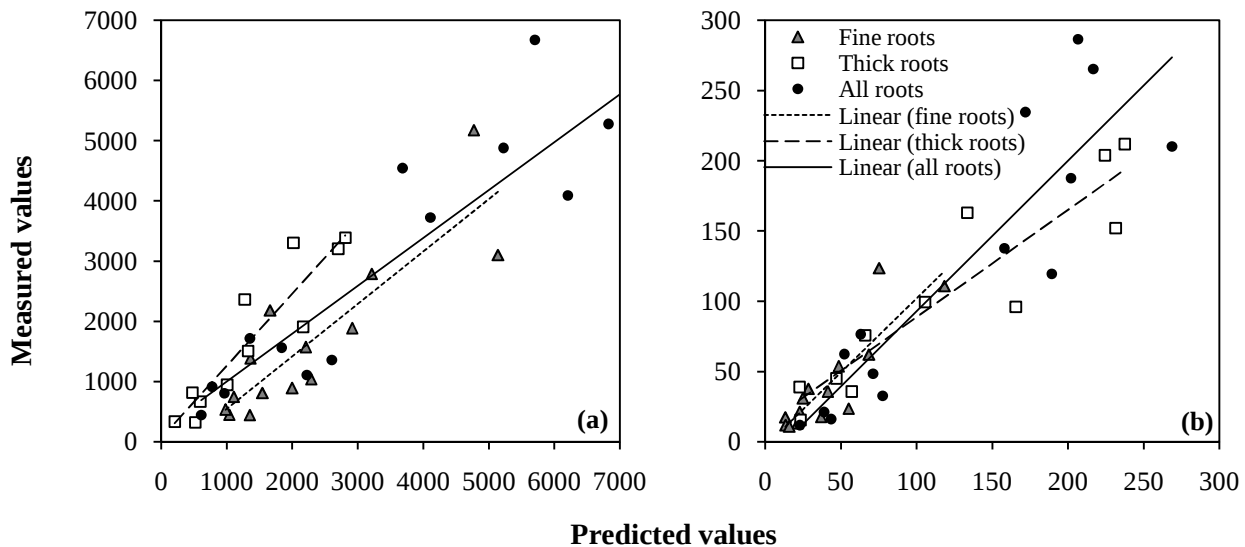


Figure 9: Model validation (2015-2016 season). Linear regression between (a) measured RLD (m m⁻³) and predicted RLD (g m⁻³) and (b) measured RBD and predicted RBD, according to the models (Tableau 3). See Table 4 for slope, intercept and R².

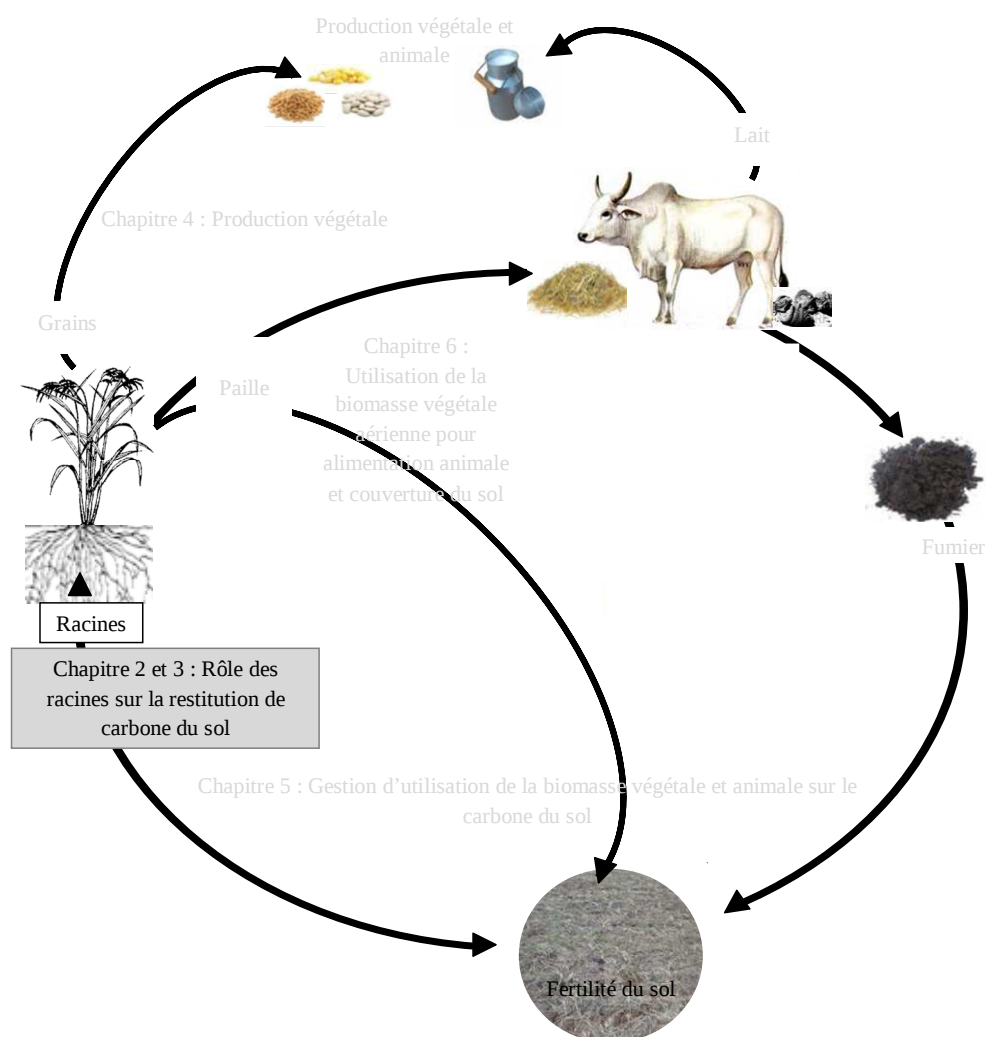
3.3 Final discussion

The relationship between RLD and RBD was identified on root samples with an RBD ranging between 10 and 300 g m⁻³. Thus, the modeling proposed here is valid only within these limits. The relationships between the RLD and RBD models for fine roots, thick roots and all roots were reasonably good and should help make rough and ready RLD estimations on the basis of RBD and *vice versa*. These functional relationships can also be used for the variety

“Chhomrong Dhan” of upland rice when only RBD or RLD is measured, for example to simply estimate the contribution of RBD to C sequestration in the soils from RLD, or to model water and mineral uptake from RBD. Further studies on other varieties and in other environments are now needed to improve the robustness of our results.

Chapitre 3:

Contribution des racines des cultures pluviales à la restitution du carbone au sol



Résumé

La restitution des biomasses végétales au sol contribue essentiellement à l'apport de matière organique du sol et à la séquestration du carbone dans le sol. Cependant, de nombreuses études sur le sujet ne se basent que sur des mesures de la biomasse aérienne et non souterraine. Notre objectif est donc d'évaluer l'importance des racines des cultures pluviales dans l'apport en carbone au sol. L'expérimentation a été conduite en milieu contrôlé (2013-2015) et sur des parcelles paysannes (2013-2014) dans la région de Vakinankaratra. Trois systèmes de cultures ont été testés en milieu contrôlé (C) et deux en milieu paysan (P) : (1) riz pluvial en rotation avec l'association de maïs + crotalaire, en agriculture de conservation (AC) (R/M+C) (en C) ; (2) riz pluvial en rotation avec l'association de l'avoine + vesce, en AC (R/M+C) (en C et P) ; et (3) riz pluvial en rotation avec l'association de maïs + haricot, en labour (R/M+H) (en C et P). Les résultats montrent que 90% des racines de riz et haricot, 80% des racines de l'avoine, et 70% des racines de crotalaire et de maïs se concentrent dans l'horizon 0-30 cm, sur des profils de mesure menés jusqu'à une profondeur maximale de 60 cm (haricot), 105 cm (riz et avoine), 150 cm (crotalaire) et 180 cm (maïs). Dans le cas d'une année avec des pluies irrégulières, la biomasse racinaire de maïs en AC est beaucoup plus importante que celle de maïs en labour, dans les couches superficielles. Le ratio biomasse racinaire (BR)/biomasse aérienne (BA) ou *R/S ratio* des cultures céréalières sont proches, 0,25, 0,28 et 0,29 respectivement pour le riz, maïs et avoine à la floraison. Il est de l'ordre de 0,68 pour le haricot et 0,21 pour la crotalaire. Le carbone apporté par an par R/M+C est trois fois plus important (10 tC MS ha^{-1}) par rapport à celui apporté par R/M+H ($3,6 \text{ t C MS ha}^{-1}$) et R/A+V ($3,1 \text{ t C MS ha}^{-1}$). Le rapport carbone BR/BA est en moyenne de 0,23 dans les systèmes R/A+V et R/M+H et de 0,18 dans R/M+C. Le carbone restitué par les racines contribue plus à la séquestration, même s'il ne représente que moins de 25% du carbone total de chaque système de culture. Il pourrait être encore plus élevé si la part libérée par la rhizodéposition était considérée. En conclusion, les racines contribuent bien à la restitution du carbone dans le sol, même sans prise en compte de la rhizodéposition.

Mots clés : agriculture de conservation, avoine, crotalaire, haricot, maïs, *R/S ratio*, riz, Madagascar

1 Introduction

Le changement climatique est un problème emblématique dans le monde actuel. L'agriculture est considérée d'un côté comme une source d'émission de gaz à effet de serre (Stocker et Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013). Mais elle peut également être un outil permettant la séquestration du carbone dans le sol (Robert, 2001), via notamment la pratique de l'agriculture de conservation (AC) (Baker et al., 2007 ; Franzluebbers, 2008 ; Srinivasarao

et al., 2015). Pour certain, l'agriculture de conservation est donc une des solutions pertinentes pour la lutte contre le réchauffement climatique (Fenni et Machane, 2010 ; Kaye et Quemada, 2017). Le principal mécanisme par lequel l'AC peut jouer sur la séquestration du carbone est l'augmentation de la restitution de biomasse végétale, et donc de carbone, au sol. (Lal, 1997; Ferreira et al., 2012; Smith et al., 2012; Poeplau and Don, 2015). La contribution de la biomasse racinaire dans cette séquestration de carbone est souvent mal évaluée alors qu'elle y joue un rôle important (Mazzilli et al., 2015a). Par exemple, la plupart des études considérant l'apport de carbone par les racines n'ont étudié que les apports dans les couches superficielles, par exemple Bolinder et al., (1999) ont travaillé sur une profondeur de 0 – 30 cm pour les fourrages; Wilts et al., (2004) ont prélevé les racines de maïs jusqu'à 45 cm.

A Madagascar, comme dans beaucoup de pays en voie de développement, les résidus de culture sont utilisés pour alimenter le bétail (Erenstein et al., 2015 ; Naudin et al., 2015). Dans ce cas la partie aérienne du carbone de la plante n'est donc pas directement restitué au sol, seule la partie souterraine reste. Nous avons donc cherché à mieux évaluer les apports en carbone des biomasses aériennes et souterraines par différents systèmes de culture. Nous avons notamment cherché à mieux évaluer l'importance de la biomasse racinaire des cultures pluviales jusqu'à des couches profondes. L'étude a été menée sur trois systèmes de culture à différentes finalités : un système en AC a priori plus intéressant pour le maintien de la fertilité du sol avec l'utilisation d'une plante de couverture (riz//maïs+crotalaire) ; un système en AC plus orienté vers la production de fourrage pour l'alimentation animale (riz//avoine+vesce) ; et un système en labour plus utilisé dans la production des grains pour l'alimentation humaine (riz//maïs+haricot). L'objectif est d'évaluer la quantité de carbone présente dans les racines de certaines cultures pluviales en relation avec celui des parties aériennes dans le système de culture étudié. Nous avons également cherché à modéliser la répartition de la biomasse racinaire en fonction de la profondeur pour pouvoir extrapoler les valeurs de prélèvements qui ne seraient fait que sur des horizons de surface. Nous avons également calculé le ratio biomasse aérienne et biomasse racinaire de ces plantes. Et enfin nous présenterons la quantité de carbone présente dans les différents compartiments de la plante, c'est-à-dire dans la biomasse végétative aérienne, racine entre 0-15 cm, 15-30 cm et en dessous de 30 cm.

2 Matériels et méthodes

2.1 Site expérimental

L'étude a été menée sur les Hautes terres de Madagascar. Un climat tropical d'altitude caractérise la zone, avec une saison sèche et fraîche pendant cinq mois suivie d'une saison chaude et humide durant sept mois dont quatre à cinq mois de pluie à partir de novembre. La température moyenne est de l'ordre de 19°C au début et pendant le cycle cultural (novembre

au avril) et diminue à 13°C après la récolte jusqu'au mois d'août. La pluie moyenne mensuelle varie de 100 mm (en octobre) à 300 mm (décembre – janvier), puis elle diminue jusqu'à moins de 30 mm à partir de mois de mai (Figure 10).

Les sols sont classés comme des sols ferrallitiques humifères avec un pH acide et une teneur en argile élevée dans les horizons A et B et de texture sablo-argileuse dans l'horizon II C/R (Figure 11) (Razafimbelo et al., 2006). Ils sont fortement carencés en phosphore (Rakotoarisoa et al., 2010). La porosité est assez bonne sur l'ensemble des horizons.

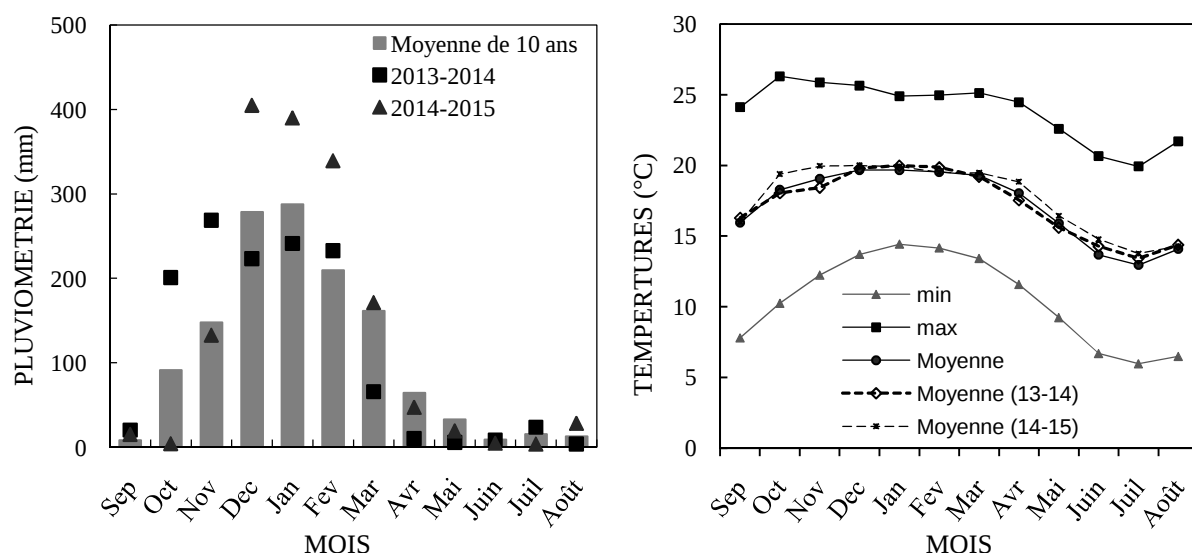


Figure 10 : Caractéristiques du climat d'Andranomanelatra (Station CIMEL FOFIFA/CIRAD Andranomanelatra)

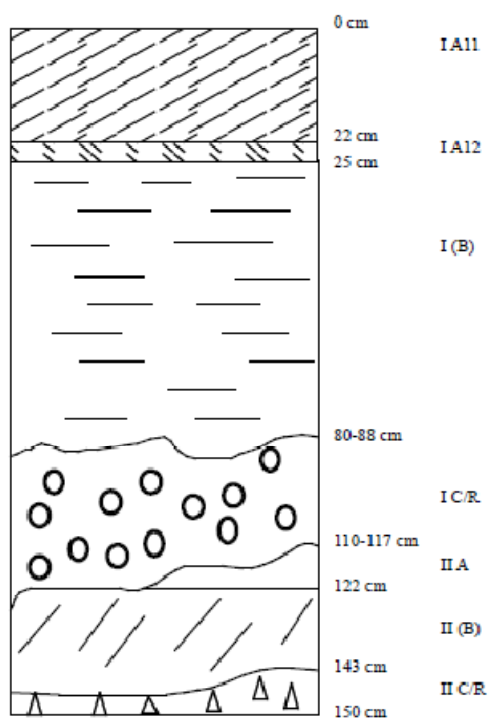


Figure 11 : Profil pédologique des parcelles d'Andranomanelatra (Razafimbelo et al., 2006)

2.2 Dispositif expérimental

Les expérimentations ont été conduites, pendant les campagnes culturales 2013 – 2014 et 2014- 2015, en milieu contrôlé FOFIFA/SCRiD d'Andranomanelatra (19°47'S, 47°06'E, 1640m), installé depuis 2002, et pendant la campagne 2014 – 2015 en milieu paysan situé autour d'Andranomanelatra, Antsirabe et Betafo (19°54'S, 46°53'E, 1569m).

En milieu contrôlé, l'expérimentation est en split plot, avec quatre blocs de répétitions. Trois systèmes de culture ont été comparés : (1) la rotation du riz pluvial (*Oryza sativa*), variété Chhomrong dhan, suivi du maïs (*Zea mays*), variété locale Tombontsoa cultivé en association avec la crotalaire (*Crotalaria grahamiana*), en AC (R//M+C), (2) la rotation du riz pluvial suivi de l'association de l'avoine (*Avena sativa*), variété Fanantenana et de la vesce (*Vicia villosa*), en AC (R//A+V), et (3) la rotation de riz pluvial suivi de l'association de maïs et de haricot (*Phaseolus vulgaris*), variété RI 5-2, en labour (R//M+H). Des parcelles complémentaires en culture pure de maïs, crotalaire, haricot, avoine et vesce ont été mises en place la campagne 2014 – 2015 avec les mêmes densités que celles des cultures en association. Elles ont servi pour comparer les racines de chaque type de plante en culture associée avec celles en culture pure.

En milieu réel, les essais ont été mis en place sur des parcelles de dix neuf paysans. Chez chacun de ces paysans, deux systèmes de culture ont été comparés : (1) riz pluvial en rotation avec de l'avoine + vesce, en AC et (2) riz pluvial en rotation avec du maïs + haricot, en labour sur des parcelles de 100 m² chacune. Pour cette étude seule une partie de toutes les parcelles expérimentales a été utilisée. Il s'agissait de celles qui étaient fertilisées avec du fumier amélioré (27 g N kg⁻¹ MS) de la même source, à raison de 5 t ha⁻¹. La vesce n'a pas poussé ni en milieu contrôlé ni en milieu paysan.

Les résidus des cultures ont été totalement restitués sur les parcelles pour être utilisés comme couverture du sol des parcelles en AC, et ont été complètement exportés pour les parcelles en labour. Ce dernier traitement vise à reproduire la situation la plus courante chez les paysans. Les deux cultures en rotation, le riz et les cultures associées, ont été installées côte à côte, chaque année. La densité de semis est différente suivant la culture (Figure 12). Le maïs en culture pure a été planté avec la même densité que le maïs associé (Figure 12.3, Figure 12.4) mais sans la présence des plantes en association (haricot ou crotalaire)

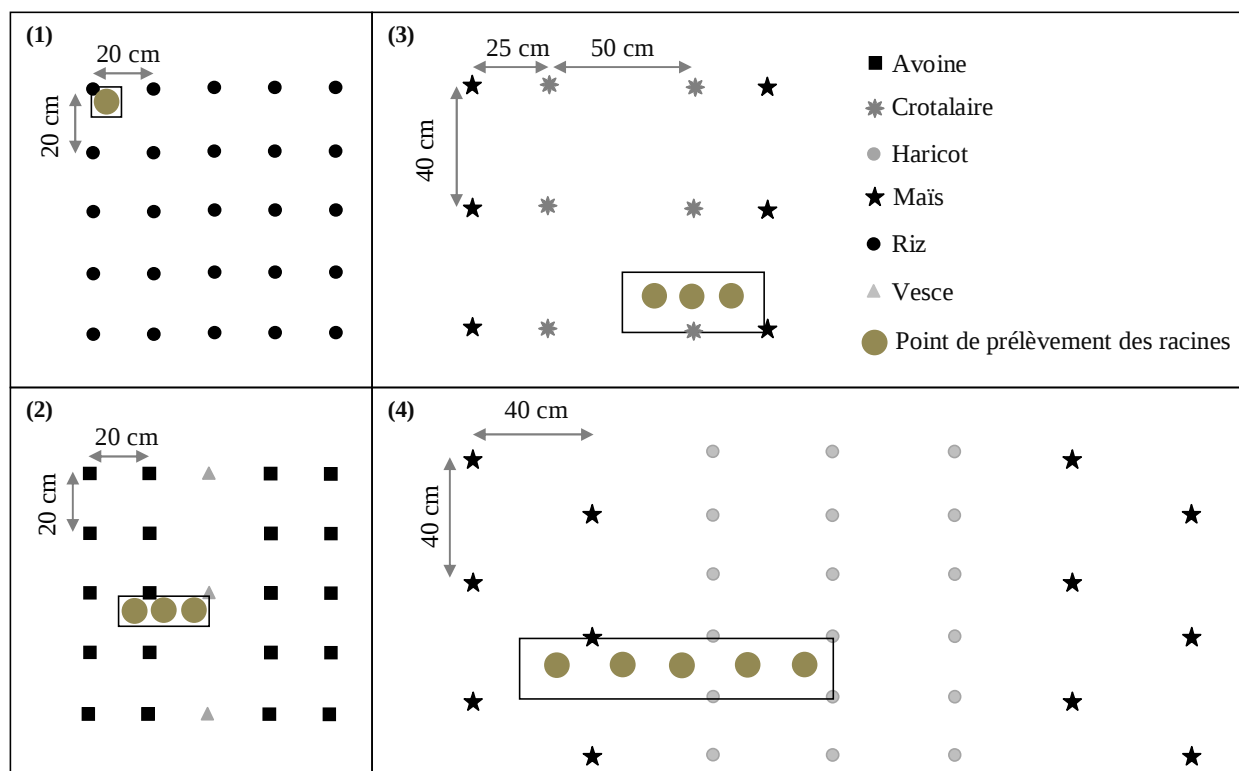


Figure 12 : Densité de semis et prélèvement racinaire effectué sur les parcelles de (1) riz, (2) avoine associé avec la vesce, (3) maïs associé avec la crotalaire, (4) maïs associé avec du haricot.

2.3 Mesures effectuées

2.2.6 Biomasses aériennes

La production de biomasse aérienne a été mesurée à chaque période de coupe de l'avoine (45 jours après semis (JAS)), et au moment de la floraison et à la récolte de toutes les plantes (riz, maïs, haricot, avoine, crotalaire). Les mesures au moment de la floraison ont été localisées sur des endroits différents suivant le type de plante : le riz et l'avoine ont été mesurés sur $4 \times 1 \text{ m}^2$ sur les quatre côtés de la parcelle, le maïs et le haricot sur 2 m linéaire de la double ligne, la crotalaire sur $2 \times 1 \text{ m}^2$. Pendant la coupe de l'avoine et à la récolte de toutes les plantes, les mesures ont été situées sur un carré de $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ au milieu de la parcelle. Des échantillons ont été prélevés à chaque mesure et ont été passés à l'étuve à 60°C pendant 72 h, pour connaître la teneur en matière sèche et en déduire la production de biomasse en matière sèche.

2.2.7 Biomasses racinaires

La production de biomasse racinaire a été mesurée pendant la période de coupe de l'avoine, au moment de la floraison de toutes les plantes et avant la remise en culture pour les plantes de couverture (crotalaire). Le prélèvement des racines a été effectué en utilisant une tarière à racines Eijkelkamp® de 8 cm de diamètre et 15 cm de hauteur (750 cm^3), au même endroit et aux mêmes dates de prélèvement des biomasses aériennes. Les positions du cylindre et la profondeur pour le prélèvement racinaire varient suivant la densité de semis de chaque culture

(Figure 12). La mesure a été faite par horizon de 15 cm jusqu'à des profondeurs maximales respectives de 60, 75, 105, 105, 150, 180 cm pour le haricot, l'avoine à la première coupe, le riz, l'avoine en floraison, la crotalaire, la première année de l'expérimentation. La deuxième campagne, les profondeurs maximales mesurées pour le haricot, riz et maïs ont été respectivement réduites à 45, 60 et 135 cm, profondeur où les racines atteignent déjà plus de 95% par rapport au profil maximal mesuré la première année.

Les échantillons de sol prélevés avec les racines ont été tamisés (maille quadrangulaire de 1mm) le même jour du prélèvement ou le jour suivant, et dans ce cas les échantillons ont été conservés dans un réfrigérateur à 8°C pour préserver les petites racines. Les racines ont été prélevées manuellement dans le tamis, et mises en étuve à 60°C pendant 72 h, puis pesées à l'aide d'une balance KERN 770® de portée 220 g et d'une précision de 0,0001 g.

2.2.8 Estimation de la distribution racinaire

La distribution des racines de chaque type des cultures dans le profil a été estimée à partir de l'équation de Fan et al. (2016) :

$$Y_i(d) = 1/[1+(d/d_a)^c] + [1-1/[1+(d_{max}/d_a)^c]] * d/d_{max}$$

Avec $Y_i(d)$ la distribution des racines pour chaque profil i à la profondeur d , d_a un paramètre du modèle exprimé en cm, c un autre paramètre, et d_{max} la profondeur maximale mesurée, en cm.

Etant donné que les profondeurs maximales mesurées la première et la deuxième année n'ont pas été les mêmes, la distribution racinaire a été estimée, dans un premier temps, sur les données de la première année mais en utilisant la profondeur maximale de la deuxième année de la même culture. L'objectif était de comparer les ratios cumulés des racines estimés par le modèle (en première année) et ceux mesurés la deuxième année. Si aucune différence statistique, avec un test non paramétrique, $\alpha = 0,05$, n'est trouvée, le modèle retenu est celui obtenu avec les données dont les prélèvements sont les plus profonds (ceux de la première année).

Le coefficient de Nash – Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970) a été utilisé pour évaluer l'efficacité du modèle. Pour avoir les quantités des racines sur les mêmes profondeurs pour la première et la deuxième année, les racines des profondeurs manquantes ont été estimées à partir des ratios obtenus avec les mesures complètes.

2.2.9 Détermination de la teneur en C des racines et de biomasse aérienne

Les racines prélevées pour chaque type de plantes ont été finement broyées après séchage à l'étuve à 60°C pendant 72 heures. Des analyses par combustion totale des racines sous courant d'hélium/oxygène et sous pression au microanalyseur CHN ont été effectuées au

laboratoire de l'UMR Eco&Sols, Montpellier. Le N et le C dans les échantillons sont transformés respectivement en oxyde d'azote qui est réduit en azote moléculaire et en dioxyde de carbone. Le C, N, et l'eau sont séparés sur une colonne chromatographique et mesurés par la suite par un détecteur à conductibilité thermique. Les teneurs en C des biomasses aériennes ont été obtenues à partir de données bibliographiques, ces valeurs étant beaucoup plus courantes dans la littérature que celles des teneurs en carbone des racines.

3 Résultats

3.1 Distribution racinaire

La répartition des racines dans les horizons dépend de l'espèce (Figure 13, Tableau 6). 95% des racines de certaines graminées telles que le riz et l'avoine sont contenus dans les 60 et 75 premiers centimètres de profondeur, dont 90% et 80% dans les couches superficielles 0-30 cm (Figure 13.1, Figure 13.5), avec une profondeur maximale de 105 cm. Par contre, les racines de maïs descendent jusqu'à 180 cm : 95% se développent dans 0 à 120 cm de profondeur et 65 à 75% dans les 30 premiers centimètres. Dans le cas où le maïs est associé avec des légumineuses (haricot ou crotalaire), 75 à 90% des racines se situent dans la partie superficielle (0-30 cm) et 95% sont observées en descendant au maximum à 90 cm de profondeur. La distribution racinaire du maïs est significativement différente entre la culture pure et la culture associée (Annexe 1). Pour ces deux cultures de maïs (associé ou pur) la biomasse racinaire en AC (maïs + crotalaire) est significativement plus élevée que celle de maïs + haricot en labour (Tableau 5). Cette différence est observée seulement en 2015, année pendant laquelle la pluie a été mal distribuée (Figure 10). En ce qui concerne le riz, il n'y a pas de différence entre les parcelles en AC et celles en labour.

Le haricot également possède des racines superficielles avec une importante concentration (95% des racines) dans 0-50 cm de profondeur et 85 à 90 % entre 0 et 30 cm dans le sol, avec une profondeur maximale mesurée de 60 cm. Les racines de crotalaire se développent profondément, jusqu'à 150 cm, avec une distribution racinaire qui varie suivant l'âge de la plante. A la fin de la floraison de crotalaire (mi-juin en 2014 et fin mai 2015), 95% des racines se trouvent dans moins de 80 cm de profondeur dont 70% sont dans les 30 premiers centimètres.

Le coefficient NE « Nash Efficiency » qui caractérise la validation du modèle de distribution racinaire utilisée pour chaque plante est supérieure à 0,80, sauf pour le riz (NE = 0,68) mais cela reste dans des limites acceptables (Tableau 5).

Tableau 5 : Caractéristiques du modèle de distribution racinaire de certaines cultures pluviales, $Y_i(d) = 1/[1+(d/da)c] + [1-1/[1+(dmax/da)c]] * d/dmax$ ou $Y_i = pr1*Exp(pr2*d_i)$ pour la crotalaire, caractéristiques de la validation du modèle.

Culture	Stade de mesure	N ⁽¹⁾	c	d _a	d _{max} (cm)	pr1	pr2	NE
Riz	Floraison	84	-1,45	13,00	105	-	-	0,68
Maïs + crotalaire (MC)	Floraison du maïs	48	-1,34	9,09	180	-	-	0,93
Maïs + haricot (MH) 13-14	Floraison du maïs	48	-1,57	13,36	180	-	-	0,90
Maïs pur densité MC	Floraison du maïs	36	-1,02	12,04	180 ⁽²⁾	-	-	0,86
Maïs pur densité MH	Floraison du maïs	36	-1,23	21,85	180 ⁽²⁾	-	-	0,97
Haricot en culture pure	Floraison	16	-1,08	12,31	60	-	-	0,90
Avoine	Floraison	28	-1,35	14,76	105	-	-	0,98
Crotalaire en culture pure	Floraison	70	-	-	150	1,17	3,78	0,82

⁽¹⁾ N = nombre des échantillons ; ⁽²⁾ valeurs estimées sur les profondeurs 135 à 180 cm.

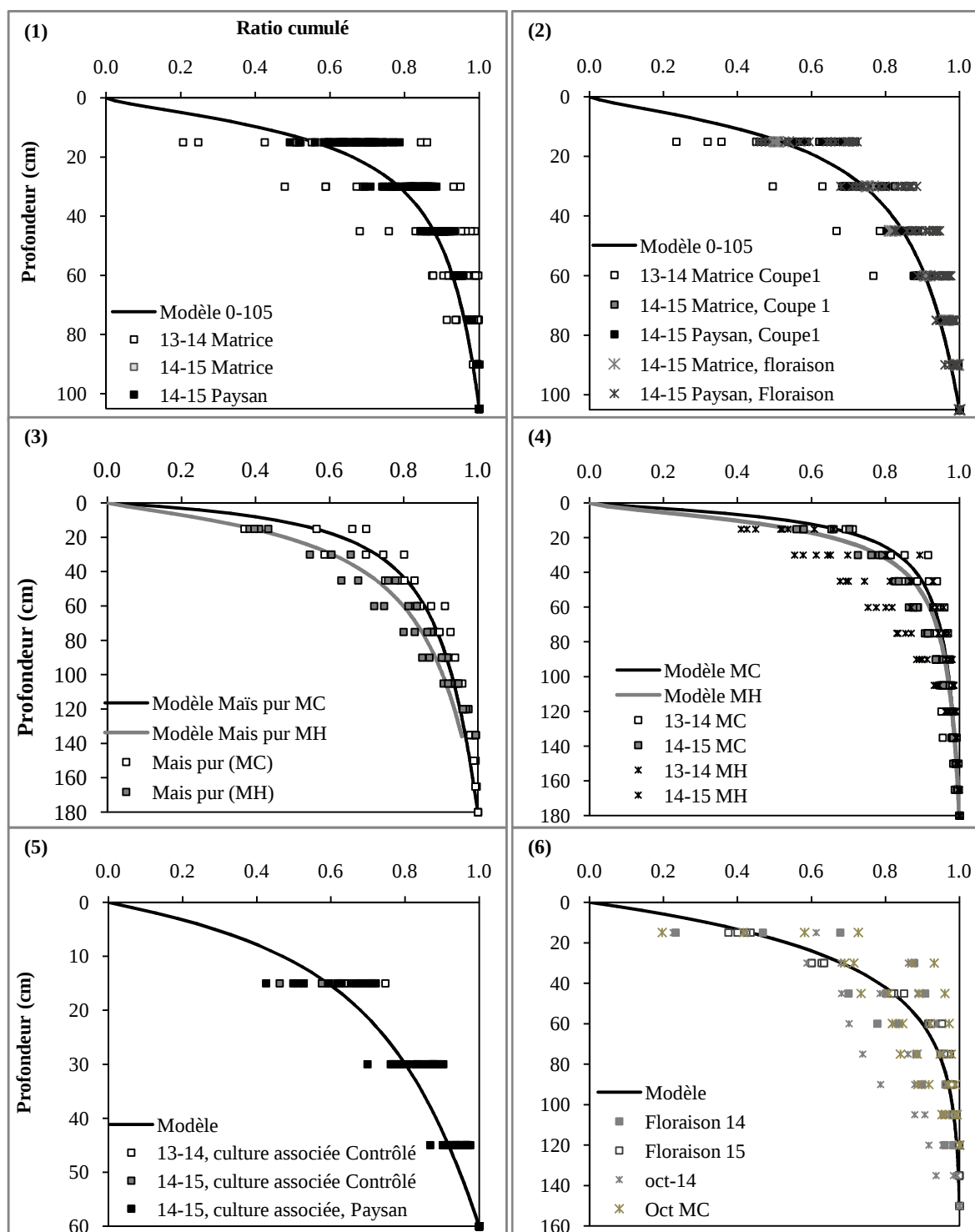


Figure 13 : Modèle de distribution racinaire de certaines cultures pluviales à la floraison de : (1) riz, (2) avoine, (3) maïs en culture pure, (4) maïs en culture associée : maïs+crotalaire (MC) et maïs+haricot (MH), (5) haricot en culture pure, (6) crotalaire suivant le modèle $Y_i(d) = 1/[1+(d/d_a)c] + [1-1/[1+(d_{max}/d_a)c]] * d/d_{max}$ (Tableau 5)

Tableau 6 : Biomasse racinaire (kg ha⁻¹) mesurée et calculée de certaines cultures pluviales suivant le type de gestion du sol et les types d'association : maïs + *Crotalaire* (M+C), maïs + haricot (M+H) et avoine + vesce (A+V) sur des parcelles contrôlées (C) et paysannes (P)

Horizon (cm)	Riz			Maïs associé					Maïs pur		Haricot				Avoine						Crotalaire		
				M+C		M+H			M+C	M+H	M+H		pur	A+V					Pur	Pur			
	C		P	C		C	P		C		C	P	C	C	P	C	P	C	C	C			
														1 ^{ère} coupe			Floraison						
	2014	2015	2015	2014	2015	2014	2015	2015	2015	2015	2014	2015	2015	2015	2014	2015	2015	2015	2015	2015	2014	2015	
0-15	822	432	340	857	537	575	269	163	470	165	342	140	149	74	202	347	218	507	561	727	1334	1354	
15-30	273	137	82	214	114	200	68	36	85	81	97	55	51	24	139	97	72	237	181	180	589	701	
30-45	226	52	37	64	61	114	58	22	41	44	29	21	31	16	88	16	47	62	83	89	260	705	
45-60	80	22	24	41	30	57	47	18	44	28	2*	12	14	7	54	8	20	93	39	67	115	331	
60-75	41	22*	17*	45	32	32	34	16	24	27	-	-	-	-	72	1	22	51	20	51	208	104	
75-90	25	13*	10*	9	22	15	27	14	19	18	-	-	-	-	1*	1*	13*	3	13	31	22	59	
90-105	6	3*	3*	17	14	10	23	12	17	18	-	-	-	-	0,2*	0,1*	2*	6	10	5	71	43	
105-120	-	-	-	6	13	5	16	11	20	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	33	
120-135	-	-	-	7	8	3	14	9	14	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	71	2*	
135-150	-	-	-	11	7*	4	2*	1*	6*	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1*	
150-165	-	-	-	6	4*	2	1*	1*	3*	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
165-180	-	-	-	8	5*	2	1*	1*	5*	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Total (2014)	1473	-	-	1285a		1019a		-	-	-	469		-	-	-	551	-	-	-	-	-	2676	-
Total (2015)	-	682	513	-	848a	-	560b	305b	749A	411B	-	228	245	121	-	470	395	986	906	1150	-	3334	

* Valeurs calculées à partir du modèle $Y_i(d) = 1/[1+(d/da)c] + [1-1/[1+(dmax/da)c]] * d/dmax$ pour toutes les cultures sauf la crotalaire ($Y_i = pr1 * \exp(pr2 * d_i)$).

a et b (pour culture associée) et A et B (pour culture pure) montrent la différence significative entre la biomasse racinaire de maïs cultivé en AC et en labour, à l'intérieur d'une année.

3.2 Ratio biomasse aérienne et biomasse racinaire : R/S ratio

La biomasse racinaire du riz, maïs et haricot, comme la biomasse aérienne, est significativement plus élevée, environ 2 fois plus en 2014 par rapport à celle mesurée en 2015. En moyenne, elle est respectivement de 1473, 1140 et 469 kg MS ha⁻¹ en 2014 contre 597, 571 et 236 kg MS ha⁻¹ en 2015 pour le riz, maïs et haricot (Tableau 7).

La biomasse racinaire de haricot+maïs, à la floraison de haricot, est deux fois plus élevée en 2014 qu'en 2015 et est quatre fois plus élevé en 2014 que celle mesurée sur la culture pure de haricot en 2015. La même tendance est également remarquée sur la biomasse aérienne de haricot, elle est plus élevée en 2014 qu'en 2015. Le ratio R/S est en moyenne 0,25 ; 0,28 et 0,68 pour la culture de riz, maïs en association avec de légumineuse et haricot (en culture pure ou associée), respectivement (Tableau 7). Ce ratio devient 0,42 pour le maïs en culture associée, avec une grande variation allant de 0,26 à 0,77 suivant le type de plante associée (haricot ou crotalaire). Il est plus élevé avec le maïs + crotalaire (0,69). Exceptionnellement, une valeur très élevée de ratio R/S de haricot (1,52) est observée sur la culture associée de haricot + maïs, à la floraison de haricot, en 2015.

Par contre, la biomasse racinaire est similaire durant les deux années de culture (2014 et 2015) pour la culture d'avoine et de crotalaire, avec une moyenne annuelle de 511 kg ha⁻¹ à la première coupe d'avoine (45 jours après semis ou JAS) et 3000 kg ha⁻¹ à la floraison de crotalaire. A la floraison de l'avoine (85 JAS), la biomasse racinaire augmente avec la biomasse aérienne, avec une quantité deux fois plus élevé par rapport aux biomasses produites à la première coupe. Le ratio R/S de l'avoine est en moyenne de 0,41 et 0,29 respectifs à la première coupe et à la floraison (Tableau 7). Pour la crotalaire installée en culture pure, la biomasse des racines mesurée à la floraison (6 à 7 mois après semis) est d'environ le double de celle qui a été mesurée avant la remise en culture (10 à 11 mois après semis) (1326 kg ha⁻¹). Toutefois, les ratios R/S à ces deux périodes restent proches, avec en moyenne 0,19 à la floraison et 0,22 avant la remise en culture (Tableau 7).

Tableau 7 : Production de biomasse racinaire et aérienne de certaines cultures pluviales avec le ratio R/S. Les écarts types sont donnés entre parenthèse.

Culture	Système	Dispositif	Année	Période de mesure	Profondeur (cm)	Biomasse racinaire (kg ha ⁻¹)	Biomasse aérienne verte ⁽¹⁾ (kg ha ⁻¹)	Paille (kg ha ⁻¹)	Grain (kg ha ⁻¹)	R : S
Riz	Culture pure	Station	2014	Floraison	0 – 105	1473(±609)	4603(±1189)	3505(±1769)	3862 (±1149)	0,33
			2015	Floraison		681*(±216)	4134(±2143)	2626(±926)	2332(±1311)	0,19
		Paysan	2015	Floraison		513*(±259)	3081(±2755)	2792(±2391)	2394 (±1660)	0,22
Maïs	Maïs + <i>Crotalaire g.</i>	Station	2014	Floraison	0 – 180	1276 (±668)	1625(±692)	1798(±1398)	1587(±1416)	0,77
			2015	Floraison		848*(±153)	1732(±826)	2212(±837)	1364(±751)	0,45
	Maïs pur (densité MC)	Station	2015	Floraison		699*(±252)	2885(±1280)	4384(±3542)	3236(±1655)	0,33
			Maïs + haricot	Station		2014	Floraison	1008 (±274)	3806(±416)	2483(±724)
	2015	Floraison				560*(±91)	997(±365)	1022(±391)	526(±312)	0,61
	Paysan	2015		Floraison		305*(±187)	1455(±973)	2131(±2021)	597(±532)	0,34
	Maïs pur (densité MH)	Station	2015	Floraison		411*(±139)	2404(±1165)	3578(±1772)	2920(±866)	0,24
Haricot	M+H	Station	2014	Floraison	0 – 60	499(±158)	738(±129)	196(±68)	208(±84)	0,69
			2015	Floraison		228*(±58)	154(±25)	147(±39)	48(±31)	1,52
		Paysan	2015	Floraison		245*(±144)	401(±188)	249(±200)	67(±79)	0,65
	Culture pure	Station	2015	Floraison		121*(±45)	181(±34)	238(±124)	50(±18)	0,69
Avoine	Culture pure	Station	2014	1 ^{ère} coupe	0 – 105	551*(±306)	160(±35)	897(±557)	1016(±238)	3. 39
			2015	1 ^{ère} coupe		470*(±113)	1000 (±410)			0. 53
				Floraison		986 (±88)	5136 (±887)	1859 (±647)	866 (±268)	0,20
		Paysan	2015	1 ^{ère} coupe		395* (±221)	1483 (±1129)			0,30
				Floraison		906(±279)	2695 (±1757)	1573 (±903)	630(±482)	0,39
<i>Crotalaire</i>	Culture pure	Station	2014	Floraison	0 – 150	2676* (±1064)	16135 (±2167)	-	-	0,16
				Récolte		1488 (±408)	-	4393 (±752)	-	0,35
	M+C		2015	Récolte		1147	-	5387	-	0,24
				Floraison		3334* (±441)	16045 (±2139)	-	-	0,21
	Culture pure		2015	Récolte		1164 (±256)	-	16122 (±1625)	-	0,07
				Récolte		2393	-	12259	-	0,20

* Présence des valeurs estimées dans les profondeurs non mesurées (Tableau 2), ⁽¹⁾ biomasse mesurée à la période de coupe de l'avoine ou à la floraison de toutes les plantes.
 Densité MC : même densité de semis que maïs + crotalaire (M+C), densité MH : même densité que maïs + haricot (M+H)

3.3 Teneur en carbone de chaque type des plantes

La teneur en carbone varie suivant le type de plante et le type de biomasse. Les racines des légumineuses contiennent beaucoup plus de carbone que les biomasses aériennes (Tableau 8), avec de teneurs significativement différentes entre les deux types de légumineuse utilisés : haricot (41,1 g kg⁻¹ MS) et crotalaire (43,2 g kg⁻¹ MS). Par contre, la concentration de carbone dans les parties souterraines des graminées est similaire de celle dans les parties aériennes avec une teneur aux alentours de 42,4 g kg⁻¹ MS. La teneur en carbone dans les biomasses aériennes (en moyenne 33,9 g kg⁻¹ MS) est plus faible pour les légumineuses en comparaison aux graminées (44,4 g kg⁻¹ MS).

Tableau 8 : Teneur en C (g 100g⁻¹ MS) de la biomasse aérienne (tiges + feuilles) et racinaire de certaines cultures pluviales, tirés de la bibliographie et des analyses CHN, respectivement.

Biomasse	Riz	Maïs	Haricot	Avoine	Crotalaire
Aérienne	45,85 ⁽¹⁾	43,40 ^(2,3)	30,00 ⁽⁴⁾	43,80 ⁽³⁾	37,82 ⁽³⁾
Racinaire	42,48	42,86	41,08	42,01	43,17

⁽¹⁾(Abiven et al., 2005) ; ⁽²⁾(Ferreira et al., 2012) ; ⁽³⁾(Gachengo et al., 2004)

3.4 Carbone dans les différents compartiments de la plante

En milieu contrôlé, la quantité de carbone totale présente dans les plantes est trois fois plus importante dans R//M+C (10 t C MS ha⁻¹ sur deux ans) que dans R//A+V (3,1 t C MS ha⁻¹ sur 2 ans) et R//M+H (3,6 t C MS ha⁻¹ sur 2 ans) (Figure 14. 1C, Figure 14. 2C, Figure 14. 3C). Par rapport à ces quantités totales de carbone dans chaque système, les racines présentent respectivement 18%, 27% et 28% de carbone dans R//M+C, R//A+V et R//M+H. Dans R//M+C, la crotalaire, le riz et le maïs fournissent respectivement 68%, 20% et 12% du carbone total du système. Dans R//A+V, les quantités de carbone dans le riz et l'avoine sont proches avec respectivement 44% et 56% du carbone total dans le système. Dans R//M+H, le riz présente beaucoup plus de carbone que le maïs et l'haricot, avec une part respective de 62%, 31% et 7%.

En milieu paysan, la quantité de carbone dans les systèmes R//M+H et R//A+V est proche de celle qui est obtenue avec les mêmes systèmes en milieu contrôlé (Figure 14). La proportion du carbone dans les plantes dans chaque système R//M+H ou R//A+V suit également les mêmes tendances que celles observées dans le même système en milieu contrôlé. En effet, avec R//A+V, l'avoine produit beaucoup plus de carbone (62% du C total) que le riz (38% du C total). Le riz, le maïs et le haricot dans R//M+H présentent respectivement 56%, 38% et 6% du carbone total dans le système. La somme de carbone dans les racines de riz et de l'avoine constitue 18% du carbone total dans le système R//A+V et 17% du carbone total dans le système R//M+H.

Ainsi, avec le système R//M+C en exportant la totalité des biomasses végétales consommables pour les animaux (paille de riz et paille de maïs), 2,4 t C MS ha⁻¹ sont exportés de la parcelle sur deux ans et 7,5 t C MS ha⁻¹ sont restitués dans et sur le sol par les résidus de crotalaire et les racines de toutes les plantes. Si les résidus aériens consommables par les animaux sont exportés complètement, 2,3 t C MS ha⁻¹ (2,7 t C MS ha⁻¹ en milieu paysan) sont enlevés de la parcelle sur deux ans et le tiers (quart en milieu paysan) de ce carbone exporté est restitué dans le sol dans le système R//A+V. Dans le système R//M+H, l'exportation totale des biomasses végétales consommables par les animaux permet une exportation de carbone de 2,6 t C MS ha⁻¹ (2,3 t C MS ha⁻¹ en milieu paysan) et une restitution de 1,0 t C MS ha⁻¹ (0,6 t C MS ha⁻¹ en milieu paysan) de carbone dans le sol.

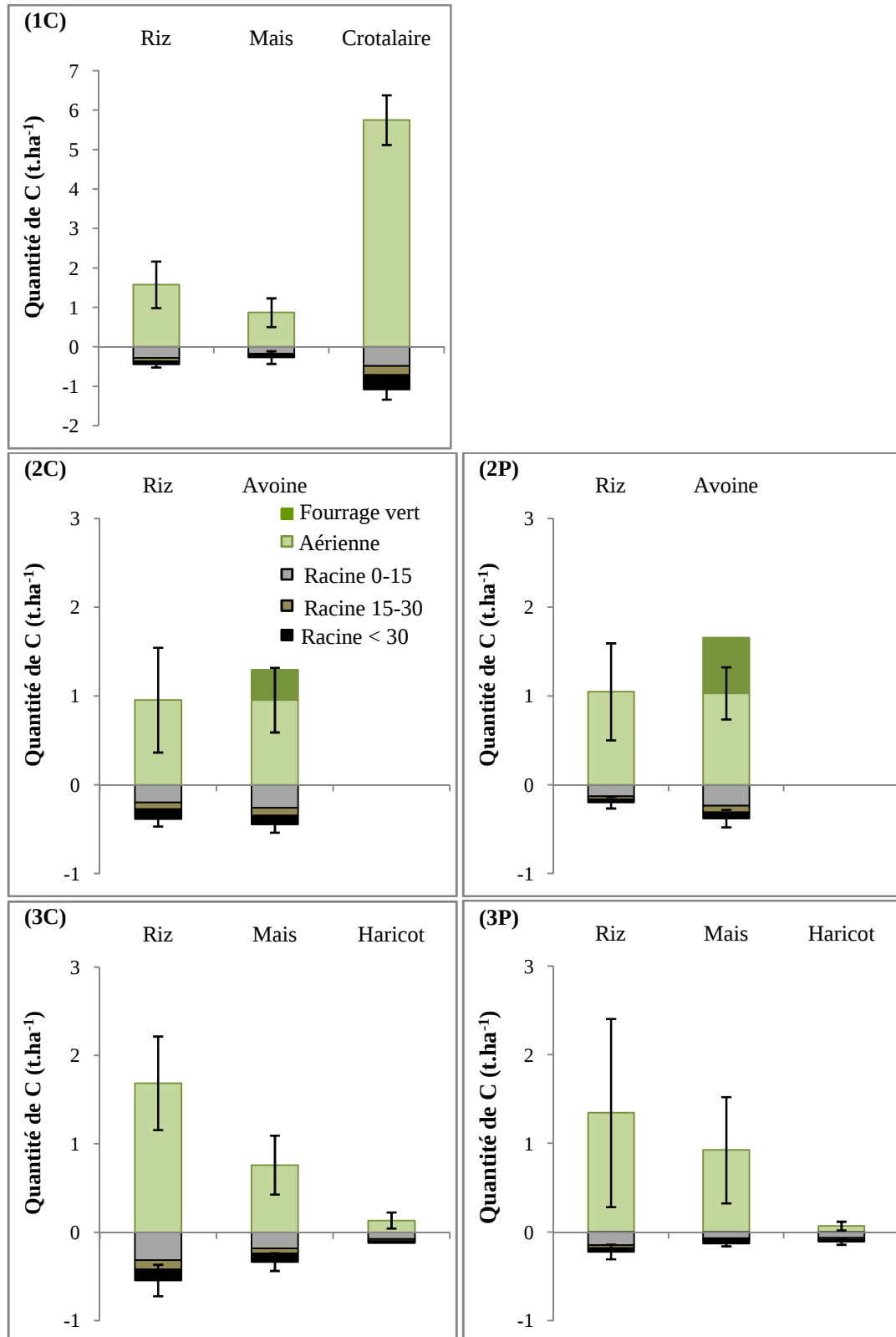


Figure 14 : Quantité de carbone dans les différents compartiments de la plante de chaque système de culture : (1) riz // maïs + crotalaire (R/M+C), (2) riz // avoine + vesce (R/A+V), (3) riz // maïs + haricot (R/M+H) en milieu contrôlé (C) et en milieu paysan (P). Les profondeurs maximales considérées sont 60 cm pour le haricot, 105 cm pour le riz et l'avoine, 150 cm pour la crotalaire et 180 cm pour le maïs.

4 Discussion

4.1 Distribution racinaire

L'horizon maximal mesuré pour la quantification des racines de maïs et de l'avoine est plus profond que celui donné par l'étude de Fan et al. (2016). Ils ont trouvé une profondeur maximale de 118,3 cm pour le maïs et 97,2 cm pour l'avoine alors que nous trouvons encore des racines de maïs jusqu'à 180 cm et des racines d'avoine jusqu'à 105 cm. Les profondeurs maximales mesurées pour le riz (105 cm) et le haricot (60 cm) sont respectivement inférieures à celles données par les céréales (128 cm) et les autres légumineuses (à partir de 93 cm) (Fan et al., 2016). Pourtant, la plus grande partie des racines de riz ou de haricot prolifèrent dans ces profondeurs mesurées. Les racines de crotalaire sont prélevées profondément (150 cm) avec 95% dans les 80 premiers cm de profondeur. Godefroy (1988) avait trouvé sur d'autres espèces de *Crotalaria sp.* que leurs racines pénétraient en majorité dans l'horizon de 0-35 cm, à l'âge de 10 mois et qu'il y avait quelques racines pivotantes très peu ramifiées jusqu'à 75cm.

La distribution racinaire du mélange de plante (maïs + crotalaire ou haricot) n'est pas la même que celle en culture pure, dans le cas de maïs. 95% des racines de maïs associé à des légumineuses (haricot ou crotalaire) se développent dans moins de 90 cm de profondeur alors que ce même pourcentage est trouvé jusqu'à 120 cm de profondeur sous culture pure. En effet, les racines des légumineuses sont superficielles, 70 à 90% sont dans les 30 premiers cm, et cela a augmenté le pourcentage des racines des cultures associées dans les profondeurs 0-30 cm. Les valeurs des paramètres de profondeur « d_a » et « c » dans le modèle de maïs pur et associé confirment cette observation : « d_a » et « c » sont respectivement supérieur et inférieur en culture pure qu'en culture associée (Tableau 5). Cela signifie que sur une même profondeur d_i , le ratio entre la quantité des racines dans la profondeur d_i et celle dans l'horizon total mesuré est plus faible en culture pure qu'en culture associée. Le maïs en culture pure ou associée produit beaucoup plus de biomasse racinaire en AC qu'en labour, surtout dans l'horizon superficiel 0-15 cm (Tableau 6). Cela est probablement dû à une plus grande concentration des minéraux et de l'eau dans cet horizon en AC comparé au labour (Martínez et al., 2008).

4.2 Ratio R/S

Les ratios de quantité de biomasse R/S obtenus avec la culture de riz (0,25), avoine à la première coupe (0,41) et maïs (0,28), sur des profondeurs maximales respectives de 105, 75, 180 cm sont proches de ceux trouvés dans la littérature même si les variétés sont différentes. A titre d'exemple, Bridgit et Potty, (2002) ont mesuré un ratio de 0,22 pour le riz, à la floraison, sur une profondeur de 30 cm, (Bolinder et al., 1997) ont obtenu un R/S de 0,4 pour l'avoine sur 0-30 cm et (Kisselle et al., 2001) ont un ratio de 0,32 pour la culture de maïs sur

0-15 cm. En utilisant le R/S dans une même profondeur que les littératures citées (30 cm pour le riz et l'avoine et 15 cm pour le maïs), le ratio R/S du riz et de l'avoine à la première coupe reste proche de celle de Bridgit et Potty (2002), mais est plus faible pour l'avoine à la floraison (0,17) et le maïs pur (0,19). Cette observation est sûrement liée à la proportion des racines dans les profondeurs 0-30 cm ou 0-15 cm par rapport à la quantité totale des racines jusqu'à des couches profondes. Pour le maïs associé, le R/S mesuré est plus élevé (0,69) sur l'association de maïs avec la crotalaire. Cela est dû à la présence des racines de cette légumineuse cultivée avec le maïs, qui constitue environ 65% du mélange des racines maïs + crotalaire.

Le ratio R/S de crotalaire est similaire à celui mesuré sur le *C. laburnifolia* (0,19), une autre espèce de *Crotalaria sp.* cultivé dans un pot (Doris, 2010). D'autres auteurs ont trouvé un R/S de crotalaire aux alentours de 0,32 au Kenya (Kaonga et al. 2005). Le R/S ratio du haricot (0,68) est plus élevé que ceux trouvés sur des cultures en solution dans un pot de 2 dm³, présentant une grande variation suivant les solutions utilisées, 0,16 à 0,53 (Andrews et al., 1999). Ce ratio élevé obtenu avec notre essai peut être lié (1) à la présence des racines de maïs cultivé en association avec le haricot dans le cas de culture associée, (2) à une faible production de biomasse aérienne, cas de culture pure, qui est probablement due à la pourriture rapide des feuilles et de tige de haricot sous l'excès d'eau, en 2015, avant la floraison (observation personnelle).

Toutefois, le ratio R/S de chaque culture varie suivant différentes conditions telles que le climat, le type de sol ou les techniques culturales. Hylander et Ae (1999a) ont trouvé par exemple un R/S plus élevé par rapport à ceux que nous avons obtenus, 0,63 et 0,59 respectivement pour le riz et le maïs cultivés dans un pot de 20 cm de hauteur. Bolinder et al., (2007) ont indiqué que le R/S mesuré sur le maïs au Canada est supérieur à celui trouvé aux Etats-Unis. La différence des valeurs de R/S que nous avons trouvé à ceux obtenus par d'autres études peut être induite également par la méthode de prélèvement ou d'extraction racinaire effectuée. Par exemple, la taille de maille utilisée pour séparer les racines du sol influe sur la mesure de la biomasse racinaire surtout pour les racines fines (Gathumbi, 2004).

4.3 Carbone de chaque système de culture

La quantité de carbone totale accumulée dans les plantes du système R//M+C est significativement plus élevée que celle dans les autres systèmes R//M+H et R//A+V. En effet, la quantité de carbone retenue dans la culture principale de chaque système de culture (riz) est très proche pour R//M+C et R//M+H et faible pour R//A+V ; celle dans le maïs (pour R//M+C et R//M+H) est aussi similaire. Ainsi, la quantité importante de carbone avec le système R//M+C est surtout due à la forte production de biomasse de crotalaire, qui atteint jusqu'à 16 t ha⁻¹ en un an. La biomasse racinaire de cette légumineuse est également supérieure à celle des

autres plantes ($1,1 \text{ t C MS ha}^{-1}$ sur 150 cm de profondeur), avec une concentration en carbone plus élevé (Tableau 8).

En exportant complètement les résidus végétaux consommables par les animaux sur les deux ans de rotation, la quantité de carbone exportée de la parcelle est proche pour les trois systèmes de culture étudiés, 2,4 ; 2,3 à 2,5 et 2,3 à 2,7 t C MS ha^{-1} respectivement pour R//M+C, R//M+H et R//A+V). Pourtant, les quantités de carbone restituées sur la parcelle sont nettement plus élevées avec R//M+C ($7,5 \text{ t C MS ha}^{-1}$) qu'avec R//A+V ($0,6$ à $0,8 \text{ t C MS ha}^{-1}$) et R//M+H ($0,5$ à 1 t C MS ha^{-1}). Le système avec crotalaire permet donc une restitution plus importante de carbone dans le sol sans pour autant réduire la quantité de biomasse utilisable pour l'alimentation des animaux. En effet, la crotalaire n'est pas directement consommable par les animaux mais elle permet une production supplémentaire de céréales, sans doute grâce à l'apport d'azote (Subaedah et al., 2016), dont les résidus peuvent être consommés par les animaux.

Le ratio carbone R/S, c'est-à-dire le carbone dans la biomasse racinaire sur le carbone dans la biomasse aérienne, des cultures céréalières (riz, maïs, avoine) diminue faiblement par rapport au ratio R/S, parce que le carbone est plus concentré dans la biomasse aérienne que dans les racines (Tableau 8). Pourtant ce C R/S est très faible en comparant avec les ratios obtenus par Johnson et al., (2006) sur le maïs et l'avoine ($0,78$ à $0,93$ pour le maïs et $0,90$ pour l'avoine). En effet il a inclus également le C obtenu par la rhizodéposition qui est défini par le transfert de carbone des racines vivantes des plantes vers le sol. La quantité de carbone restituée dans le sol par la rhizodéposition est 2,5 à 6 fois plus que celle mesurée dans la biomasse racinaire (Balesdent et al., 2011; Johnson et al., 2006).

La quantité de carbone restitué dans l'horizon 1 (0-30 cm) sur deux ans par le système R//M+C est de $1,3 \text{ t C MS ha}^{-1}$, soit supérieur à celui apporté par le fumier ($0,72 \text{ t C MS ha}^{-1}$). Elle est de $0,8 \text{ t C MS ha}^{-1}$ dans R//M+H en milieu contrôlé, soit similaire à la quantité de carbone restitué par le fumier ; et de $0,6$, $0,5$ et $0,4 \text{ t C MS ha}^{-1}$ respectivement dans R//A+V en milieu contrôlé et paysan et dans R//M+H en milieu paysan. Ces quantités sont plus faibles que celle obtenu par l'apport de fumier.

Le carbone total n'est toutefois pas présent sous la même forme. En effet le carbone contenu dans le fumier a déjà amorcé le processus d'humification et il contribuera plus aux formes stables du sol que celui des résidus végétaux (Bouajila et al., 2015).

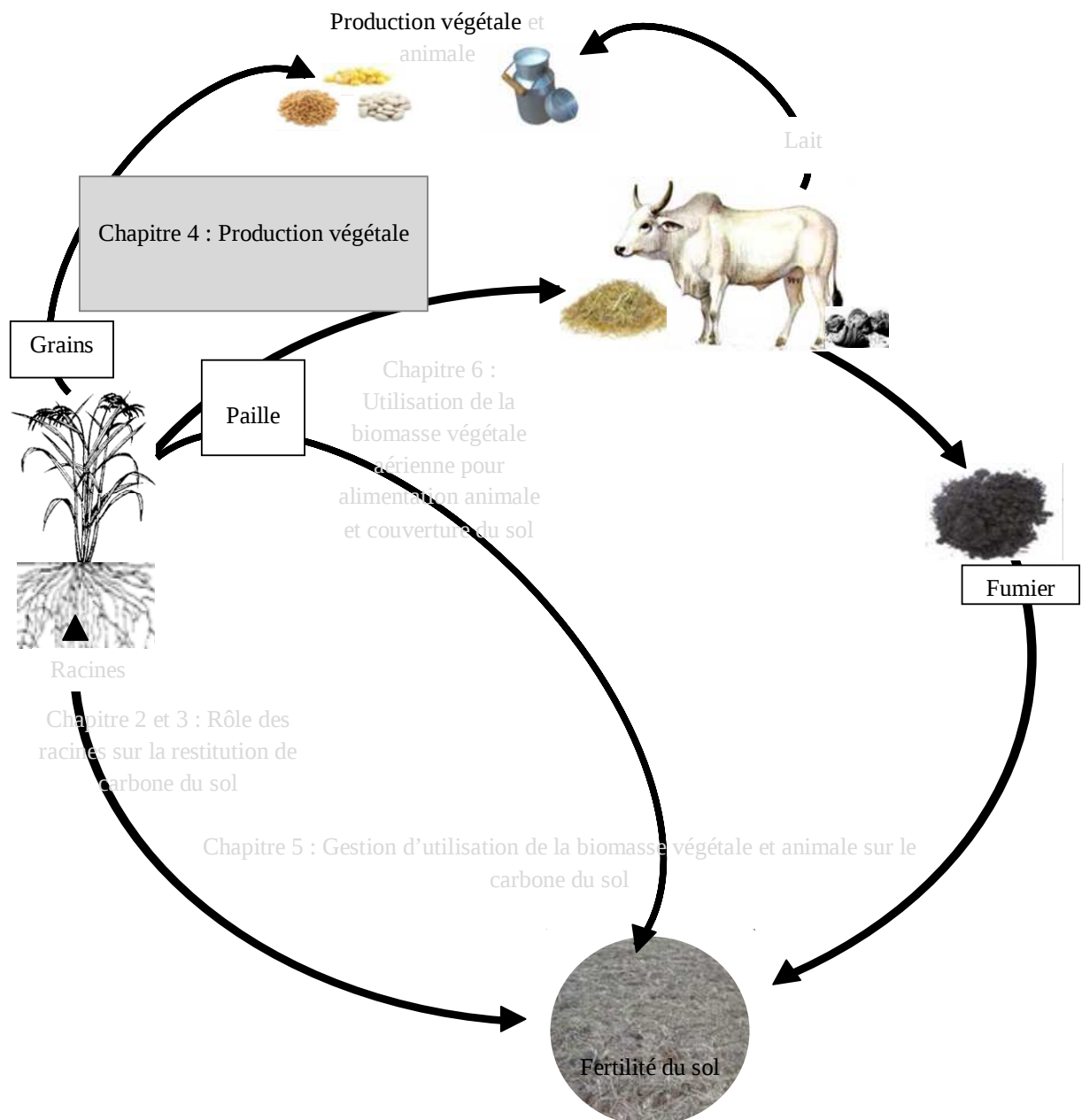
5 Conclusion

L'enracinement des plantes varie en fonction de leur espèce et de plusieurs conditions comme le type de sol, le climat, la gestion du sol. La proportion des racines dans les 30 premiers centimètres de sol, par rapport à la biomasse totale des racines mesurées jusqu'à la partie la plus profonde, est d'environ 90% pour le riz et le haricot, 75 à 85% pour l'avoine, 70% pour la crotalaire et 65 à 75% pour le maïs. La plus grande partie des racines (95%) se développent plus profondément jusqu'à 50 cm, 60 cm, 75 cm, 80 cm et 100 à 120 cm pour le haricot, riz, avoine, crotalaire et maïs en culture pure. En effet, les racines de maïs cultivé avec les légumineuses se concentrent majoritairement dans 0 à 75 cm de profondeur. L'année où la pluie a été mal distribuée durant le cycle cultural, le maïs (associé ou pur) cultivé en AC a produit beaucoup plus de biomasse racinaire dans les couches superficielles (0-15 cm) que le maïs installé sur labour. En mettant en relation la biomasse racinaire avec la biomasse aérienne de chaque plante, les ratios R/S sont proches pour les cultures céréalières riz (0,25), maïs (0,28) et avoine mesuré à la floraison (0,29). Ce ratio R/S devient élevé quand l'avoine est coupée à 45 JAS (0,41) et encore plus élevé pour la culture de haricot (0,68) mais faible pour crotalaire (0,19 à 0,22). Parmi ces trois systèmes de culture, R//M+C permet de produire beaucoup plus de carbone, jusqu'à 10 t C MS ha⁻¹ sur deux ans, en faisant la somme du carbone dans les biomasses aérienne et racinaire. Cette quantité est le triple de celle obtenue avec R//A+V et R//M+H. En exportant ainsi la totalité de biomasse végétale consommable par les animaux, les quantités de carbone exportables sont similaires pour les trois systèmes de culture étudiés tandis que la quantité de carbone laissée sur la parcelle, par la restitution des restes des biomasses végétales non exportées, est sept fois plus importante avec le système R//M+C par rapport aux deux autres systèmes. La quantité de carbone dans les racines superficielles (0-30 cm) des systèmes R//A+V ou R//M+H produite sur deux ans de culture a été l'équivalent du carbone apporté par le fumier (0,72 t C MS ha⁻¹) pendant ces deux ans ou inférieur dans le cas où la pluie est mal répartie pendant le cycle cultural (cas des cultures sur les parcelles paysannes). Pour le système R//M+C le carbone dans les racines de la couche 0-30 cm a été le double de celui apporté par le fumier.

En somme, les racines des plantes dans les systèmes R//A+V, R//M+H et R//M+C restituent respectivement 0,6 à 0,8 ; 0,5 à 1 et 1,8 t MS ha⁻¹ de carbone net dans le sol pendant deux ans. Cette contribution des racines est sûrement plus importante si l'on contabilise le carbone libéré par la rhizodéposition. La considération de tous les apports du carbone dans le sol (par la biomasse végétale ou animale) avec la perte de carbone est également nécessaire pour pouvoir évaluer la dynamique du carbone dans le sol par les différents types des systèmes de culture utilisés.

Chapitre 4 :

Impacts des innovations agro-écologiques sur le rendement en grain et en biomasse aérienne des cultures pluviales



Accepté avec revision dans un journal national Akon'ny Ala

Laingo Irintsoa Rasolofo, Julie Dusserre, Paulo Salgado, Tantely Razafimbelo, Krishna Naudin.
Impacts des innovations agro-écologiques sur le rendement en grain des cultures pluviales.

Résumé

La pauvreté du sol est l'un des facteurs responsable d'une production agricole faible dans les Hautes Terres de Madagascar. La fertilité du sol et la production agricole peuvent être améliorées par le recyclage des biomasses végétale et animale. Nous avons testé deux options techniques basées sur ce recyclage des biomasses : l'agriculture de conservation (AC) et le fumier amélioré. L'objectif de l'étude est d'évaluer leurs impacts sur le rendement en grain et en biomasse des cultures. Des essais ont été conduits en milieu contrôlé et paysan, en comparant trois systèmes de culture: (i) riz//maïs+haricot (R//M+H) en labour, (ii) riz//maïs+Crotalaire en AC et (iii) riz//avoine+vesce en AC ; et quatre types de fertilisation : (i) sans fertilisation, (ii) 5 t ha⁻¹ de fumier conventionnel (13 gN kg⁻¹ MS), (iii) 5 t ha⁻¹ de fumier amélioré (26 gN kg⁻¹ MS) et (iv) fumier conventionnel plus fumure minérale (100 kg. ha⁻¹ de NPK 11-22-16+100 kg ha⁻¹ d'Urée à 46%N). Les résultats montrent que le fumier amélioré a permis d'augmenter le rendement en riz (jusqu'à 27 %), le rendement total c'est-à-dire la somme des rendements en grain de chaque plante utilisé dans chaque système de culture (22 à 27%) et la production totale en biomasse aérienne (21 à 25%) par rapport au fumier conventionnel. Pendant l'année où la pluie a été mal répartie durant la campagne culturale, le rendement en riz de R//M+C en AC a été meilleur que celui de R//M+H en labour, avec une différence de 28%. Le R//M+C est un système intéressant dans l'amélioration de la fertilité du sol par la forte production en biomasse de crotalaire restituée dans le sol (14,5 t ha⁻¹). Par contre, le rendement a été toujours plus faible avec le système R//A+V en AC, mais il pourra être compensé par l'effet sur la production laitière via l'utilisation du fourrage pour alimentation animale.

Mots clés : Agriculture de conservation, fumier amélioré, riz pluvial, Hautes Terres, Madagascar

Abstract

Soil poverty is one of the major causes of low crop production in the Highlands of Madagascar. Soil fertility and crop production would be improved by better nutrient recycling through animal and vegetable biomasses recycling. This study aimed to evaluate the effects of two technics based on this recycling: conservation agriculture (CA) and improved manure, on crop and biomass production. The experimentations were conducted on a research station and farmers' fields. We compared three cropping systems: (i) rotation of upland rainfed rice followed by maize intercropped with bean under conventional tillage system (R//M+H), (ii) rotation of rice followed by maize

intercropped with crotalaria under CA system (R//M+C) and (iii) rotation of rice followed by oat intercropped with vetch under CA system (R//A+V); and four fertilizations' levels: (i) no fertilizer, (ii) conventional manure at 5 t ha⁻¹ (13 gN kg⁻¹ DM), (iii) improved manure at 5 t ha⁻¹ (26 gN kg⁻¹ DM), and (iv) conventional manure plus mineral fertilizer (100 kg ha⁻¹ of NPK 11-22-16 + 100 kg ha⁻¹ of urea at 46%N). Rice yields, total yields *ie* total grain yield of all plants used in each system, and total biomass production were significantly 27, 22 to 27 and 21 to 25% higher, respectively, using improved manure than conventional manure. R//M+C under CA improved rice yield until 28% and differed significantly from R//M+H under CT when rainfall is not evenly distributed throughout the season. R//M+C is important to improve soil fertility by the high biomass production of crotalaria restituted in the soil (until 14.5 t ha⁻¹). However, the rice yield with R//A+V under CA were the lowest but it may be compensate by the milk production through the forage used for animal feed.

Keywords: conservation agriculture, improved manure, upland rice, Highlands, Madagascar.

1 Introduction

À Madagascar la demande alimentaire croissante et l'augmentation de la pression foncière conduisent à la mise en culture en riz des « *tanety* » (Dabat et al., 2008). Toutefois, les rendements en culture pluviale restent faibles à cause notamment de la faible fertilité de ces terres (Rabeharisoa, 2004). De plus, les exploitants préfèrent utiliser les engrais organiques (fumier) et les quelques engrais minéraux qu'ils peuvent acheter dans leurs rizières où la production est moins risquée du fait de la sécurisation de l'alimentation hydrique.

Les systèmes de culture en agriculture de conservation (AC), basés sur le travail minimum du sol, la couverture permanente du sol et la diversification des espèces cultivées (Friedrich et Kienzle, 2007), ont été proposés aux exploitants (Dusserre et al., 2012 ; Raboin et al., 2012, 2013, 2014 ; Séguy et al., 2009) pour limiter l'érosion et pour améliorer la durabilité des cultures pluviales (Naudin et al., 2010; Thierfelder et al., 2013; Bruelle et al., 2015). Comme dans beaucoup d'autres régions du monde, il existe également une autre voie d'utilisation de la biomasse végétale, autre que la couverture du sol: l'alimentation animale (Naudin et al., 2015; Erenstein et al., 2015; Tifton et al., 2015). Cette option aussi peut être intéressante dans le recyclage des biomasses via l'utilisation de fumier obtenu par la capacité de l'animal à valoriser,

transformer et recycler les nutriments dans le fumier (Salgado et Tillard, 2012 ; Diogo et al., 2013).

Dans cette étude nous avons donc comparé l'impact sur la production des cultures de ces deux techniques basées sur le recyclage des biomasses: l'AC et le fumier. Les systèmes de culture utilisés sont à base de riz pluvial et ont différentes utilités : (i) un système, plus répandu chez les paysans des hautes terres, est plus orienté vers la production de grain (riz, maïs, haricot) avec a priori une production moyenne de riz ; (ii) un système en AC orienté vers l'amélioration de la fertilité du sol par l'utilisation de crotalaire qui est une légumineuse fixant d'une manière importante l'azote atmosphérique (Gathumbi et al., 2002), donc un système plus orienté vers l'amélioration de la fertilité du sol, avec de fait une production de riz a priori élevée car bénéficiant de l'apport d'azote par la crotalaire, et (iii) un système plus orienté vers la production de fourrage, avec a priori une production de riz faible. Les travaux que nous présentons ici cherchent à répondre aux questions suivantes : les systèmes de culture en AC et l'utilisation de fumier amélioré permettent-ils d'augmenter significativement la production en grain des cultures pluviales d'altitude (riz, maïs, haricot)? Les résultats des trois types de système de culture proposés correspondent-ils aux hypothèses avancées en termes de production de grain?

2 Matériels et méthodes

2.1 Zone d'étude

L'étude a été conduite durant trois saisons culturales (2013-2014, 2014-2015 et 2015-2016, notées par la suite par 2014, 2015 et 2016) dans les environs d'Andranomanelatra (19°47'S, 47°06'E, 1640m) au nord-est d'Antsirabe et de Betafo (19°54'S, 46°53'E, 1569m) au sud-ouest d'Antsirabe. La zone est caractérisée par un climat tropical d'altitude, avec une saison pluvieuse d'octobre à avril et une saison sèche et froide de mai à septembre. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 17°C avec de températures minimale d'environ 6°C (juillet) et maximale de 28°C (octobre). La pluviométrie moyenne annuelle est de 1450 mm avec un total de 1307, 1563 et 1480 mm durant les trois années culturales successives (Station CIMEL FOFIFA/CIRAD Andranomanelatra). Lors de la deuxième année, de fortes pluies se sont concentrées du mois de décembre à mars avec un maximum de 50 et 60 mm en une seule journée, respectivement, à Andranomanelatra et Betafo (Figure 15). Les sols d'Andranomanelatra sont classés comme ferrallitiques acides (Razafimbelo et al., 2006)

avec une capacité d'échange cationique (CEC) faible et les sols de Betafo sont classés comme des sols andiques (Tableau 9).

Tableau 9 : Caractéristiques physico-chimiques moyennes des sites contrôlé et paysans d'Andranomanelatra et de Betafo sur des horizons 0-20cm, tirés de ⁽¹⁾(Rakotoarisoa et al., 2010) et ⁽²⁾analyses effectuées avant l'expérimentation en 2013 par le LRI

		Site contrôlé ⁽¹⁾ Andranomanelatra (n = 96)		Site paysan – Andranomanelatra ⁽²⁾ (n = 12)		Site paysan – Betafo ⁽²⁾ (n = 7)	
		0 – 10	10 - 20	0 – 10	10 - 20	0 – 10	10 - 20
pH eau		4,94	-	4,79	4,84	5,45	5,53
N tot	g. 100g ⁻¹ sol	0,28	0,27	0,19	0,13	0,37	0,37
P résine	g. 100g ⁻¹ sol	-	-	0,03	0,02	0,03	0,03
P Olsen	g. 100g ⁻¹ sol	0,14	-	0,06	0,05	-	-
P total	g. 100g ⁻¹ sol	-	-	9,05	8,65	21,57	21,60
K éch	g. 100g ⁻¹ sol	-	-	1,11	0,93	0,40	0,41
C	g. 100g ⁻¹ sol	4,22	4,15	3,34	2,54	5,45	5,54
d a	g. cm ⁻³ sol	0,89	0,83	0,96	1,00	0,91	0,87
Al	cmol. kg ⁻¹ sol	1,32	-	1,5	1,54	-	-
Σ(Ca, Mg, K)	cmol. kg ⁻¹ sol	1,50	-	2,65	4,27	-	-
CEC	cmol. kg ⁻¹ sol	3,71	-	3,54	3,39	-	-
		-	-	-	-	-	-
Argiles	%	59,4	-	-	-	-	-
Limons	%	27,5	-	-	-	-	-
Sable	%	13,1	-	-	-	-	-

2.2 Dispositif expérimental

Les essais ont été menés : (1) en milieu contrôlé à Andranomanelatra, pendant trois campagnes culturales (2014 à 2016) et (2) en milieu paysan, pendant deux campagnes culturales (2014 et 2015), avec dix-neuf parcelles de 8 ares chacune, situées respectivement autour d'Andranomanelatra, Antsirabe et de Betafo.

En milieu contrôlé, trois systèmes de culture ont été comparés : (1) la culture du riz pluvial, variété « Chhomrong Dhan », en rotation avec l'association de maïs, variété locale « Tombontsoa » et de crotalaire, en AC (R//M+C) ; (2) la culture du riz pluvial, en rotation avec l'association de l'avoine, variété « Fanantenana » et de la vesce, variété « Mahavokatra », en AC (R//A+V), et (3) la culture du riz pluvial en rotation avec l'association de maïs et du haricot, variété « RI 5-2 », en labour (R//M+H). A l'intérieur de chaque système de culture, quatre types de fertilisation ont été testés : (1) aucune fertilisation (F0), (2) fumier conventionnel (5 t ha⁻¹) (FuC); (3) « fumier amélioré » (5 t ha⁻¹) (FuA) et (4) fumier conventionnel (5 t ha⁻¹) + engrais minéraux (100 kg ha⁻¹ de NPK 11-22-16, 100 kg ha⁻¹ d'Urée) (Fm). Le FuA, amélioré par des pratiques de gestion de conservation, est plus riche en éléments nutritifs avec 26 g N kg⁻¹ MS, 5,5 g P

kg^{-1}MS contre $13 \text{ g N kg}^{-1} \text{MS}$, $3,6 \text{ g P kg}^{-1} \text{MS}$ pour le fumier conventionnel. La totalité des résidus végétaux a été restituée sur la parcelle pour les cultures en AC, et a été exportée pour les cultures en labour. Le même système R//M+C était déjà pratiqué un an avant le début de nos essais, donc, dès la première année de l'étude, le riz a bien été cultivé sur un précédent maïs+crotalaire. En revanche, pour les systèmes R//M+H et R//A+V, le riz a été installé respectivement sur des anciennes parcelles de maïs+crotalaire et maïs+haricot. Toutes les cultures en association (M+C, M+H et A+V) ont été installées sur des anciennes parcelles de riz. Les parcelles sont respectivement en AC ou labour depuis onze ans.

En milieu paysan, deux systèmes de culture : (1) riz//avoine+vesce en AC (R//A+V) et riz//maïs+haricot en labour (R//M+H) et deux types de fertilisation : (1) fumier conventionnel (FuC) (5 t ha^{-1}), (2) fumier amélioré (FuA) (5 t ha^{-1}) ont été étudiés. La première année de l'expérimentation, toutes les parcelles paysannes ont été labourées. Les situations des cultures avant l'installation des expérimentations étaient variées : riz, maïs+haricot, pomme de terre. Nous ne pouvons donc pas étudier l'effet du précédent cultural (A+V ou M+H) sur la culture de riz que la deuxième année de l'expérimentation.

Chaque année, deux dispositifs ont été installés côte à côte dont l'un avec le riz et l'autre avec les cultures associées (avoine+vesce, maïs+haricot, et maïs+crotalaire). La même provenance des deux types de fumier a été utilisée pour toutes les parcelles expérimentales. Il faut toutefois noter que la vesce ne s'est jamais développée que ce soit en milieu contrôlé ou en milieu paysan. La densité des semis et la géométrie des parcelles sont présentés dans la Figure 16. Les opérations culturales telles que semis, coupe d'avoine et récolte avec les dates de floraison de riz sont résumées dans la Figure 15.

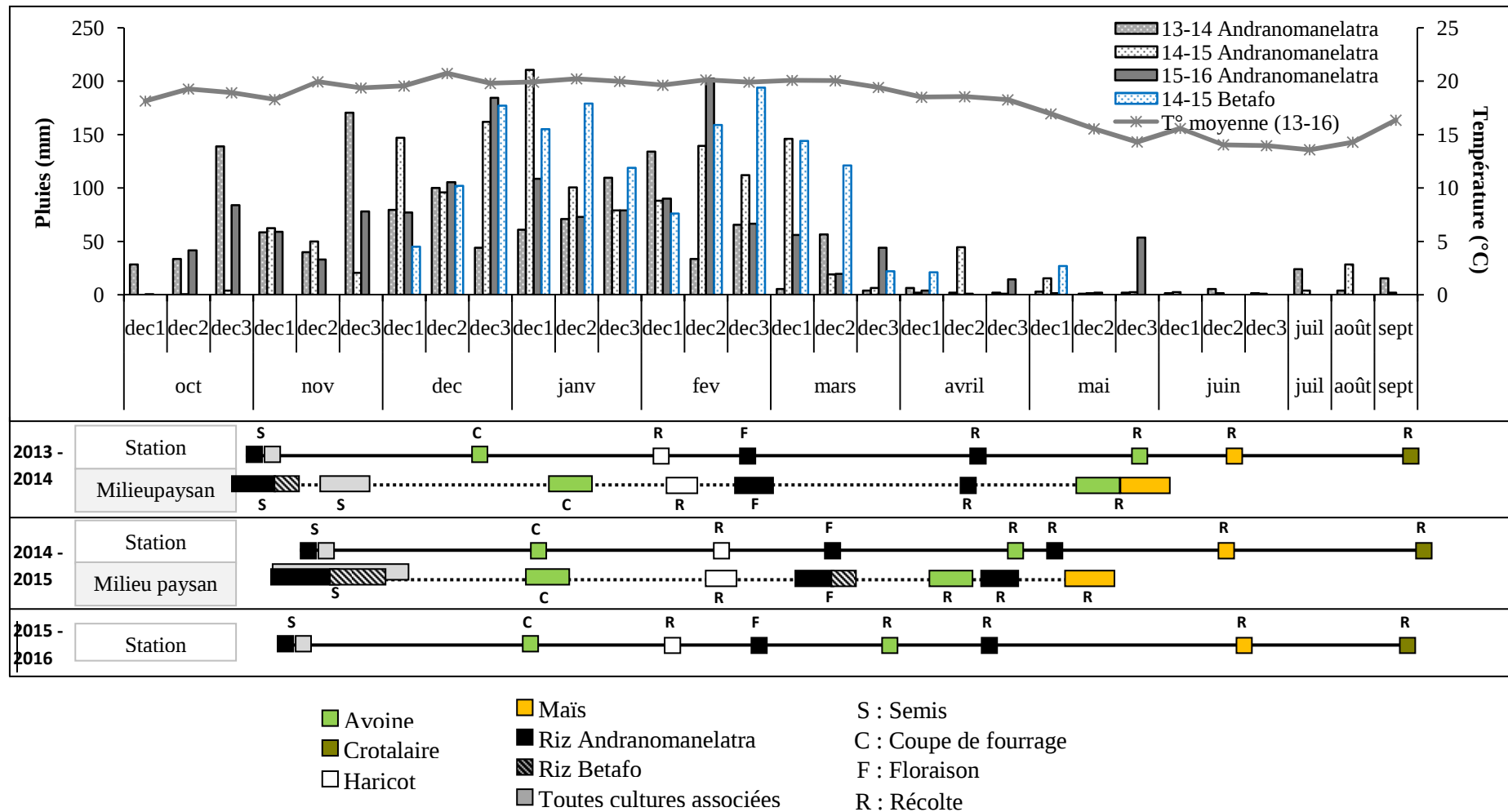


Figure 15 : Pluviométrie et températures décadaires des trois campagnes culturales avec les dates des opérations culturales

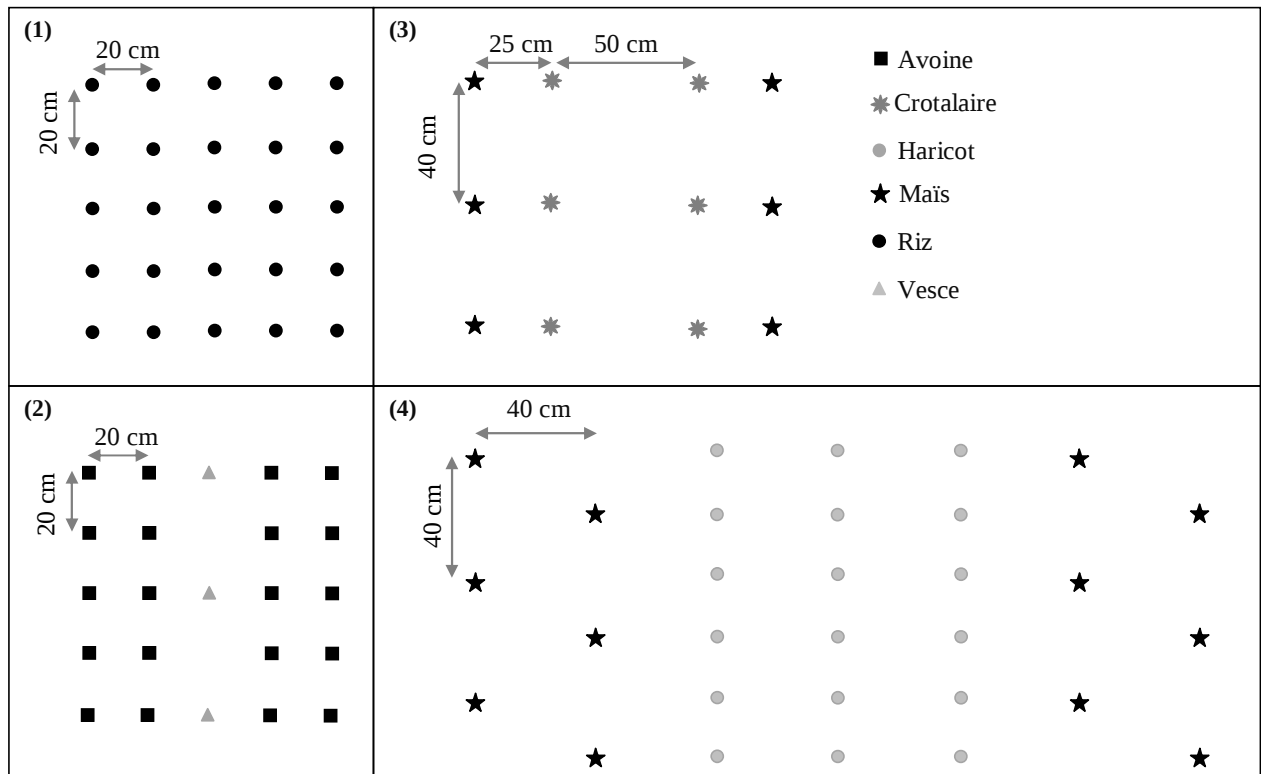


Figure 16 : Espacement entre plantes de : (1) riz, (2) association de l'avoine+vesce, (3) association du maïs+crotalaire, (4) association du maïs+haricot

2.3 Mesures effectuées

En milieu contrôlé le rendement en grain et en biomasse de toutes les cultures a été mesuré dans un carré de 5*5m au milieu de chaque parcelle (10*10m). En milieu paysan, le rendement a été mesuré sur 5 placettes de 1m² pour le riz et l'avoine, sur 5 placettes de 2m linéaires de la double ligne pour le maïs, situées au centre et aux quatre coins de la parcelle ; et sur la totalité de la parcelle cultivée (1are) pour le haricot. Les grains ont été nettoyés, vannés avant le pesage en frais pour calculer le rendement en grain vanné. Le poids sec a été obtenu après le passage des échantillons de grain et de biomasse prélevés à l'étuve, à 60°C pendant 72 heures. Pour le riz, neuf poquets ont été pris au hasard pour mesurer les composantes du rendement tels que le nombre de plants par m², le nombre de panicules par plant, le nombre d'épillets par panicule, le pourcentage de graines pleines et le poids de 1000 grains.

2.4 Analyse statistique

Les traitements statistiques des données ont été réalisés avec le logiciel R 3.2.2.

Le dispositif expérimental est du type split plot avec un facteur principal « système de culture » et un facteur secondaire « fertilisation » avec quatre parcelles en milieu

contrôlé et dix-neuf parcelles en milieu paysan. Un modèle linéaire a été utilisé pour estimer les facteurs qui affectent le rendement en grain. Il est du type :

$Y_{i,j,k} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \sigma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\sigma)_{ik} + (\beta\sigma)_{jk} + (\alpha\beta\sigma)_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$, avec μ l'intercept ; α_i l'effet facteur campagne cultural ; β_j l'effet facteur système de culture ; σ_k l'effet facteur fertilisation ; $(\alpha\beta\sigma)_{ijk}$ l'interaction des effets de ces trois facteurs et ε_{ijk} les résidus

L'AIC (critère d'information d'Akaike) a été considéré pour évaluer la qualité du modèle

Pour chacune des variables analysées, la normalité des résidus du modèle utilisé et l'égalité de variance ont été testés. Des transformations logarithmiques ou la mise en racine carré ont été effectuées pour une normalisation des données quand cela s'est avéré nécessaire. Les analyses des variations des moyennes ont été faites avec une ANOVA, utilisant des tests de comparaison multiple de Tukey HSD (High Significant Difference, $p < 0,05$) à un seuil de signification $\alpha = 0,05$ pour les variables dont la distribution est normale et respecte l'homoscédasticité ; sinon des tests non-paramétriques de Kruskal Wallis ($p < 0,05$) l'ont été dans le cas contraire (données dont la distribution n'est pas normale), en utilisant la procédure de Dunn.

3 Résultats

3.1 Production du riz

2.2.10 En milieu contrôlé

Le facteur « campagne agricole » a un effet significatif sur la plupart des composantes du rendement en riz, ainsi que des interactions avec les facteurs « fertilisation » et « système de culture ». Les analyses statistiques ont donc été menées séparément pour les trois campagnes agricoles (Tableau 10).

Les rendements en grains de riz des trois campagnes sont respectivement de 3,8 ; 2,2 et 3,4 t ha⁻¹, avec un harvest index (HI) c'est-à-dire le rapport quantité de grain sur la somme de quantité de paille + grain, de 0,49. Quel que soit l'année, le grain ou la paille de riz produit dans le système de culture R//A+V est le plus faible (Figure 17, Tableau 10). Ces différences entre les traitements sont significatives, ou non, suivant les campagnes agricoles. Les rendements des systèmes R//M+H et R//M+C ne diffèrent significativement qu'en 2015, il est supérieur de près d'une tonne dans R//M+C par rapport à R//M+H. Ce rendement plus élevé de R//M+C résulte des valeurs supérieures de toutes les composantes du rendement, à l'exception du poids des grains. Concernant

les différents types de fertilisation, les mêmes tendances de réponse de fertilisation sur la production de riz sont observées ($F0 < FuC < FuA < Fm$) pendant les trois campagnes mais les différences ne sont significatives qu'en 2016. Le rendement en grain est de $2,2 \text{ t ha}^{-1}$ sans l'apport de fertilisation, $3,1 \text{ t ha}^{-1}$ avec l'apport de FuC et augmente respectivement jusqu'à $4,2 \text{ t ha}^{-1}$ et $4,3 \text{ t ha}^{-1}$ avec l'apport de FuA et Fm. La réponse de la biomasse produite est semblable à celle de grain suivant les différents types de fertilisation. La production en biomasse est deux fois plus importante en utilisant le fumier amélioré ou la fumure minérale qu'en ne fertilisant pas (Figure 17, Tableau 10).

Tableau 10 : Composante de rendement et rendement en grain et paille de riz de 2014 à 2016, en milieu contrôlé suivant les systèmes de culture : riz//maïs+crotalaire (R//M+C), riz//maïs+haricot (R//M+H), riz//avoine+vesce (R//A+V), et des fertilisations : sans fertilisation (F0), fumier conventionnel (FuC), fumier amélioré (FuA), fumure minérale (Fm).

Traitements	Plants (/m ²)	Panicules par plante	Panicules par m ²	Epillets par panicule	Epillets par m ²	%GP	GP par m ²	PMG	Grain (t ha-1)	Paille (t ha-1)
2013-2016										
Effet des facteurs										
Année (A)	0,3607	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0011	< 0,0001	< 0,0001
Fertilisation (F)	0,5208	0,2735	0,0424	0,0467	0,0039	0,9275	0,0745	0,0592	< 0,0001	< 0,0001
Système de culture (SC)	0,3308	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0164	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
A : F	0,0043	0,8910	0,0985	0,8289	0,3621	0,7812	0,6070	0,1154	0,0054	0,0006
A : SC	0,0135	0,0016	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0001	0,0013
F : SC	0,3454	0,4092	0,6661	0,2695	0,6964	0,4909	0,3310	0,9590	0,6325	0,2630
A : F : SC	0,9498	0,7690	0,7452	0,2733	0,7594	0,4831	0,8020	0,0153	0,9708	0,7294
Variation des moyennes										
2013-2014	105,03	3,76 a	388,60 a	53,10 b	20774 a	88,68 a	18291 a	25,68 b	3,77 a	3,31 a
2014-2015	105,03	2,86 b	301,04 b	42,38 c	13883 b	80,67 b	11817 b	26,79 a	2,22 b	2,61 b
2015-2016	109,43	3,17 b	343,52 b	63,59 a	21895 a	74,62 c	16014 a	26,45 ab	3,45 a	3,77 a
2013-2014										
Effets des facteurs										
F	0,0407	0,807	0,1953	0,2990	0,3590	0,0984	0,5960	0,2010	0,2510	0,0965
SC	0,0828	0,747	0,0224	0,6410	0,3900	0,0542	0,7850	0,1180	0,0326*	0,0004
F : SC	0,9969	0,835	0,9587	0,1820	0,4370	0,0885	0,6770	0,1130	0,9526	0,6501
Variation des moyennes										
Système de culture	LSD ⁽¹⁾									
R//M+H	113,72 a	3,81	426,22 a	51,89	22192	89,65 a	18832	24,92	4,16 a	4,14 a
R//M+C	102,95 ab	3,83	384,55 ab	52,61	20425	90,46 a	18457	25,95	3,89 ab	3,41 a
R//A+V	98,44 b	3,63	355,03 b	54,79	19705	85,93 b	17583	26,17	3,26 b	2,39 b
Fertilisation										
F0	115,51 a	3,64	410,18	51,33	17003	87,53 ab	18285	26,61	3,48	2,85
FuC	93,05 b	3,78	351,16	52,40	17485	90,46 ab	16850	25,56	3,54	2,99
FuA	102,05 ab	3,90	395,60	51,25	20226	89,64 a	18250	25,43	3,86	3,50
Fm	109,49 ab	3,71	397,45	57,41	20691	87,12 b	19778	25,11	4,20	3,91

Traitements	Plants (/m ²)	Panicules par plante	Panicules par m ²	Epillets par panicule	Epillets par m ²	%GP	GP par m ²	PMG	Grain (t ha-1)	Paille (t ha- 1)
2014-2015										
Effets des facteurs										
F	0,1101	0,3120	0,1140	0,3870	0,0045	0,8665	0,0504	0,0163	0,2570	0,0488
SC	0,0174	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0001
F : SC	0,2635	0,2635	0,5540	0,2160	0,2787	0,0086	0,3873	0,4963	0,6800	0,6960
Variation des moyennes										
Système de culture										
R//M+H	98,78 b	3,05 a	304,34 b	43,52 b	13704 b	87,41 a	12160 b	25,82 b	2,47 b	2,43 b
R//M+C	114,58 a	3,53 a	402,43 a	54,63 a	22210 a	88,11 a	19501 a	25,10 b	3,40 a	3,30 a
R//A+V	101,74 b	1,99 b	196,35 c	28,99 c	5738 c	66,48 b	3789c	29,46 a	0,81 c	2,10 b
Fertilisation										
F0	96,99	2,78	273,38	39,36	12045 b	79,48	10348	27,14 ab	2,05	2,31 b
FuC	108,33	2,60	276,16	38,94	12093 b	82,07	10466	27,08 ab	3,55	2,40 b
FuA	112,27	3,02	339,35	46,37	16572 a	78,69	13739	27,33 a	4,22	2,63 ab
Fm	102,55	3,04	315,28	44,84	14825 ab	82,43	12713	25,63 b	4,18	3,11 a
2015-2016										
Effets des facteurs										
F	0,120	0,5420	0,0630	0,5910	0,1369	0,893	0,0532	0,674	< 0,0001	< 0,0001
SC	0,487	0,1980	0,1270	0,4120	0,0432	0,450	0,1425	0,288	< 0,0001	< 0,0001
F : SC	0,567	0,4270	0,4730	0,3980	0,9468	0,551	0,5543	0,143	0,6530	0,1800
Variation des moyennes										
Système de culture										
R//M+H	105,38	3,11	323,61	62,43	20314 b	72,97	14601	26,24	3,50 ab	3,73 ab
R//M+C	110,59	3,41	374,99	67,43	25665 a	72,62	17922	26,25	4,26 a	4,67 a
R//A+V	112,33	2,98	331,94	60,89	19707 b	78,28	15519	26,85	2,61 b	2,90 b
Fertilisation										
F0	100,46	2,95	291,66 b	60,34	17945	74,15	12834 b	26,11	2,23 b	2,22 b
FuC	112,50	3,19	357,41 a	61,10	21717	72,30	15762 ab	26,73	3,07 b	3,33 b
FuA	107,87	3,18	355,56 a	66,36	23495	76,55	17708 a	26,50	4,22 a	4,57 a
Fm	116,90	3,35	369,44 a	66,55	24422	75,50	17751 a	26,45	4,28 a	4,96 a

A l'intérieur de traitement, les moyennes suivies de lettre présentent de différence significative avec ANOVA, comparaison des moyennes avec Tukey HSD, $\alpha = 0,05$, ou avec Kruskal Wallis, LSD, $\alpha = 0,05$.

GP : Grains pleins ; PMG : poids de 1000 grains

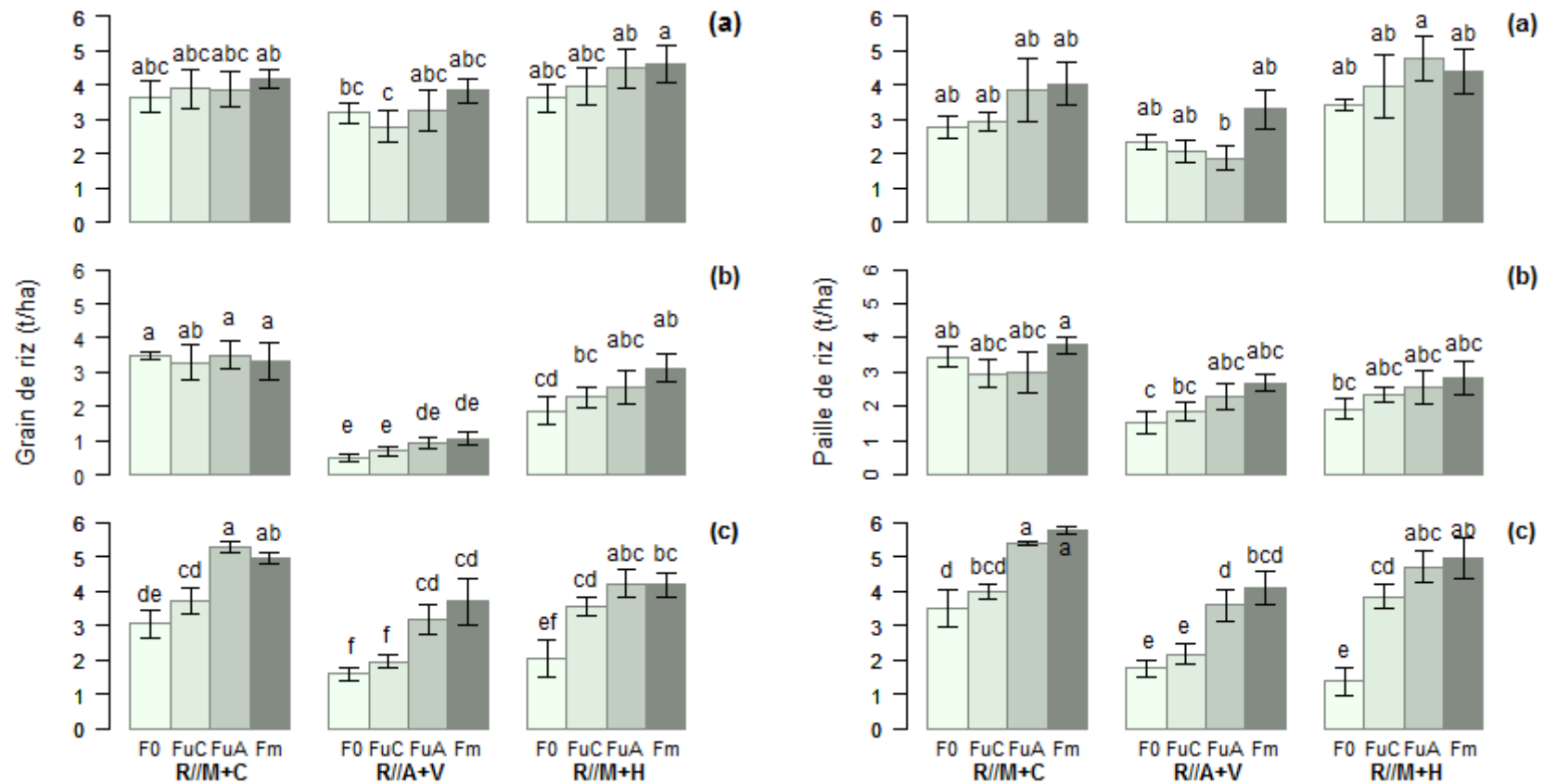


Figure 17 : Production en grain et paille de riz des rotations riz//maïs+crotalaire (R//M+C), riz//avoine+vesce (R//A+V) et riz//maïs+haricot (R//M+H), suivant les fertilisations : aucune (F0), fumier conventionnel (FuC), fumier amélioré (FuA), fumure minérale (Fm), durant les trois campagnes culturales (a) 2014, (b) 2015, (c) 2016, en milieu contrôlé. Les lettres correspondent à la différence des traitements (système de culture x fertilisations) à l'intérieur d'une année, Tukey HSD, $\alpha = 0,05$.

2.2.11 En milieu réel

Les rendements en riz en 2014 sont supérieurs d'environ 50% à ceux observés en 2015 (Figure 18, Tableau 11). Ce rendement est permis, malgré un nombre de plants par m² plus faible, par une forte compensation du nombre de panicules par plante et un nombre d'épillets par panicule. La production en paille est également significativement 28% plus élevée en 2014 qu'en 2015. Les rendements en grain ou en paille de riz sont similaires sur les deux zones étudiées l'année 2014, alors qu'en 2015 ils sont trois fois plus élevés sur les parcelles autour d'Andranomanelatra que sur les parcelles de Betafo (Tableau 11).

Concernant la fertilisation, l'utilisation du FuA a permis d'augmenter significativement les rendements en grain et paille de riz la première année de l'ordre de 26% et 34% respectifs par rapport à l'utilisation de FuC. Les nombres de grains pleins et de panicules par m² sont respectivement de 20 et 12% plus élevées avec FuA qu'avec FuC. Pendant la deuxième année, la même tendance est observée entre les deux fertilisations avec 2,3 et 2,8 t ha⁻¹ de grain et de paille avec FuA contre 1,7 et 1,9 t ha⁻¹ avec FuC, respectivement. Le nombre d'épillets par panicule est plus important en utilisant le fumier amélioré ($\alpha = 0,1$).

La comparaison des systèmes de culture n'a été faite que pour la deuxième campagne culturale pour pouvoir voir l'effet du précédent cultural par rapport au système testé. Elle a été faite sur la totalité des parcelles de R//M+H en labour et 28 des 38 parcelles de R//A+V car 10 parcelles ayant été re-labourées par les paysans. Les rendements ne sont pas significativement différents entre les deux systèmes, avec des moyennes respectives de 1,6 t ha⁻¹ et 2,3 t ha⁻¹ pour le grain de riz après avoine en AC et après M+H en labour.

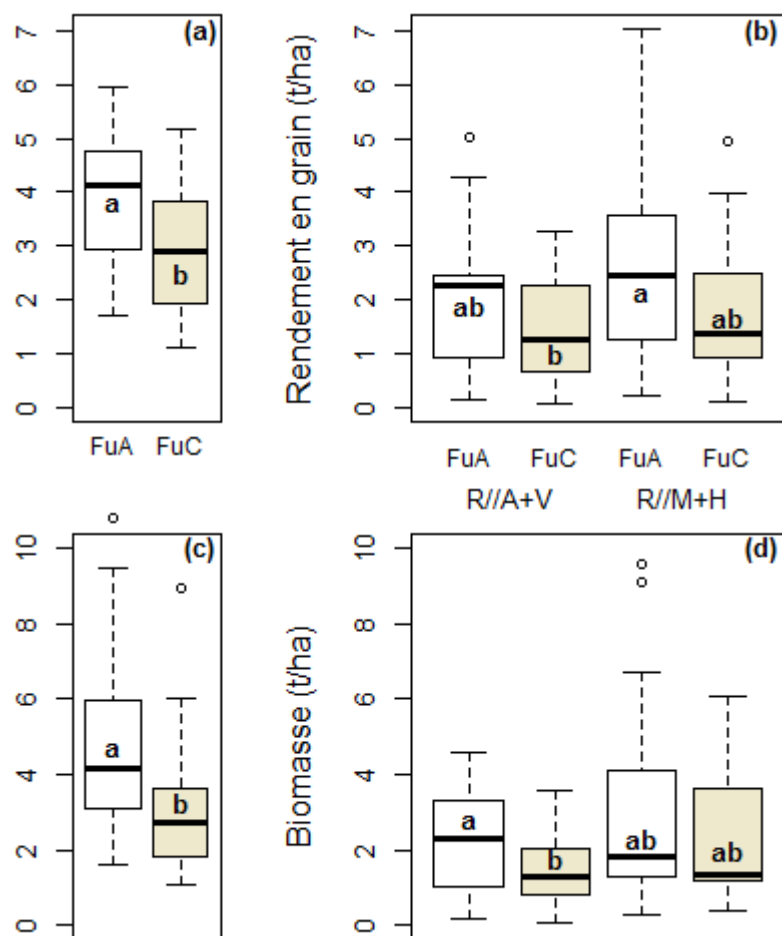


Figure 18 : Rendement en grain et paille de riz en rotation avec l'avoine+vesce (R//A+V) et maïs+haricot (R//M+H), en milieu paysan, suivant les fertilisations fumier conventionnel (FuC) et fumier amélioré (FuA), pendant les deux saisons de culture : (a et c) 2014, (b et d) 2015. Les lettres correspondent à la différence des traitements à l'intérieur d'une année, Tukey HSD, $\alpha = 0,05$.

Tableau 11 : Composante de rendement et rendement en grain et paille de riz de 2014 et 2015 des parcelles paysannes suivant les systèmes de culture : riz//M+H (R//M+H) et riz//avoine+vesce (R//A+V), et les fertilisations : fumier conventionnel (FuC) et fumier amélioré (FuA).

Traitements	Plants (/m ²)	Panicules par plante	Panicules par m ²	Epillets par panicule	Epillets par m ²	%GP	GP par m ²	PMG	Grain (t ha ⁻¹)	Paille (t ha ⁻¹)
2013-2015										
Effets des facteurs										
Année (A)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,9462	< 0,0001	0,0001	0,0001	< 0,0001
Fertilisation (F)	0,276	0,0201	0,1306	0,0311	0,0212	0,0619	0,0212	0,1033	0,0001	0,0011
Zone (Z)	0,521	< 0,0001	< 0,0001	0,0025	< 0,0001	0,5786	< 0,0001	0,0328	0,0002	0,0015
A : F	0,272	0,4890	0,1155	0,2068	0,9335	0,1840	0,9335	0,6726	0,3355	< 0,0001
A : Z	0,636	0,5565	0,0138	0,0292	0,0001	0,0547	0,0001	0,9818	0,0001	< 0,0001
F : Z	0,269	0,0552	0,5238	0,1351	0,1190	0,1613	0,1190	0,8612	0,5641	< 0,0001
A : F : Z	0,453	0,3017	0,5087	0,8750	0,7820	0,5878	0,7819	0,8690	0,7551	< 0,0001
Variation des moyennes										
2013-2014	159,16 b	3,42 a	522,84 a	47,36 a	25276 a	83,89	21079 a	25,03 b	3,40 a	3,83 a
2014-2015	206,29 a	1,69 b	337,56 b	30,01 b	10579 b	83,76	8798 b	26,44 a	2,01 b	2,36 b
2013-2014										
Effets des facteurs										
F	0,642	0,0850	0,0244	0,3398	0,0485	0,0211	0,0072	0,3190	0,0001	0,0002
Z	0,968	0,0377	0,0345	0,2292	0,0401	0,7178	0,0755	0,0746	0,9997	0,3707
F : Z	0,110	0,0925	0,9793	0,0948	0,2219	0,1400	0,1508	0,7907	0,8070	0,7472
Variation des moyennes										
Zone										
Andranomanelatra	159,93	3,61 a	552,65 a	48,98	27184 a	82,97	22502	25,36	3,40	3,99
Betafo	157,87	3,10 b	480,25 b	45,03	22096 b	85,21	18707	24,56	3,40	3,57
Fertilisation										
FuC	159,11	3,22 b	488,38 b	48,98	22946 b	80,86 b	18286 b	24,81	2,89 b	3,06 b
FuA	159,20	3,63 a	557,29 a	45,73	27606 a	86,92 a	23872 a	25,24	3,91 a	4,61 a

2014-2015

Effets des facteurs

F	0,207	0,0763	0,207	0,0536	0,1543	0,2089	0,0661	0,2120	0,0582	0,1181
Z	0,520	< 0,0001	< 0,0001	0,0036	< 0,0001	0,0556	< 0,0001	0,2190	0,0001	< 0,0001
SC	0,540	0,0558	0,268	0,1858	0,0763	0,1345	0,1361	0,9410	0,3352	0,4040
F : Z	0,853	0,3775	0,370	0,5035	0,2699	0,1215	0,2062	0,9910	0,8166	0,2329
F : SC	0,394	0,3080	0,954	0,3954	0,2888	0,2815	0,4537	0,4930	0,9419	0,8721
Z : SC	0,446	0,8874	0,271	0,4931	0,3090	0,1227	0,4021	0,9590	0,3050	0,3598
F : Z : SC	0,975	0,7182	0,906	0,6687	0,8518	0,3035	0,9250	0,6450	0,9866	0,7330

Variation des moyennes

Zone

Andranomanelatra	210,16	1,91 a	381,54 a	32,92 a	12725 a	85,32	10560 a	26,65	2,60 a	3,03 a
Betafo	197,78	1,22 b	240,80 b	22,01 b	4676 b	79,46	3955 b	25,84	0,79 b	0,94 b

Système de culture

R//A+V	211,85	1,57	318,23	27,91	9280	83,64	7927	26,40	1,75	2,72
R//M+H	201,39	1,81	354,62	31,84	11715	83,86	9560	26,47	2,30	1,91

Fertilisation

FuC	217,62	1,59	338,31	26,98 b	9277	83,31	7788	26,07	1,70 b	1,93
FuA	194,96	1,81	336,81	33,05 a	11880	84,21	9808	26,80	2,34 a	2,79

GP : grains pleins, PMG : poids des 1000 grains.

A l'intérieur de traitement, les moyennes suivies de lettre présentent de différence significative avec ANOVA, comparaison des moyennes avec Tukey HSD, $\alpha = 0,05$.

2.2.12 Comparaison de rendement en milieu paysan et en milieu contrôlé

En considérant les deux années de l'expérimentation et les deux types de fertilisation (FuC et FuA) communes aux essais en milieu paysan et contrôlé, les rendements moyens en grain et leur distribution en milieux paysan et contrôlé sont très similaires (Figure 19); ils sont respectivement de $2,6 \text{ t ha}^{-1}$ ($n=32$) et $2,8 \text{ t ha}^{-1}$ ($n=138$). En milieu contrôlé, les rendements en grain ou en paille sont compris entre les valeurs minimale et maximale de celui en milieu paysan, avec une moyenne de HI très proche 0,48 en milieu paysan et 0,49 en milieu contrôlé. Le grain produit varie respectivement de 0,1 à $7,0 \text{ t ha}^{-1}$ et 0,5 à $6,0 \text{ t ha}^{-1}$ en milieux paysan et contrôlé (Figure 19). La production de la biomasse aérienne (paille) de riz est de 0,2 à 11 t ha^{-1} sur des parcelles paysannes avec une moyenne de $3,2 \text{ t ha}^{-1}$ ($n = 138$) entre lesquelles la production des parcelles contrôlées comprises (1 à $6,7 \text{ t ha}^{-1}$, moyenne = $2,7 \text{ t ha}^{-1}$, $n = 32$).

Des rendements similaires en fonction des différentes fertilisations et systèmes de culture sont obtenus en milieu paysan et en milieu contrôlé. Le rendement est meilleur avec FuA, quel que soit les systèmes de culture, et avec les systèmes R//M+C ou R//M+H quel que soit les fumiers utilisés. Pourtant, la fertilisation présente plus d'effet sur le rendement en milieu paysan qu'en milieu contrôlé. Enfin, l'effet des systèmes de culture est plus prononcé sur les parcelles en milieu contrôlé qu'en milieu paysan.

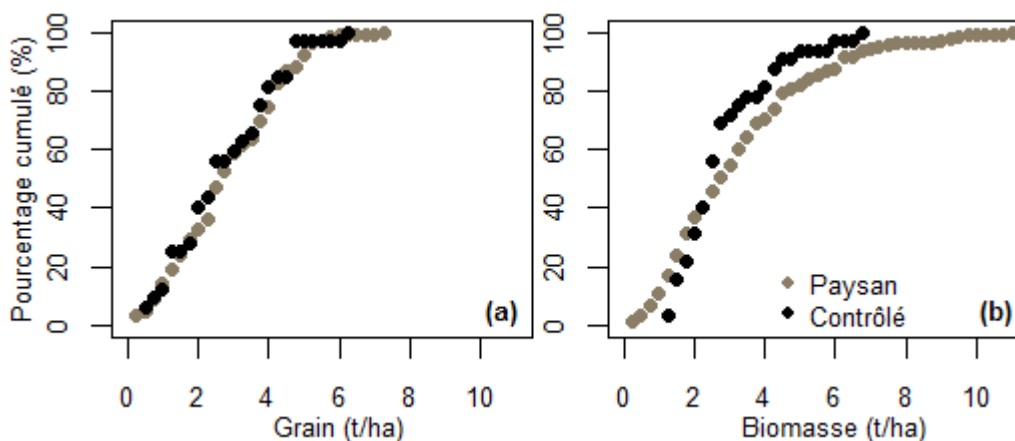


Figure 19 : Distribution de rendement en (a) grain et (b) paille de riz sur des parcelles paysannes ($n=137$) et parcelles en milieu contrôlé ($n=32$) en 2014 et 2015.

3.2 Production des cultures en rotation avec le riz

2.2.13 En milieu contrôlé

Comme pour le riz, les rendements du maïs et du haricot sont inférieurs en 2015 comparé aux deux autres campagnes. L'effet « campagne culturale » étant significatif

ainsi que ses interactions avec les autres facteurs, nous avons décidé de conduire une analyse séparée des trois campagnes (Tableau 12). Le rendement du maïs est généralement faible avec un maximum de $1,5 \text{ t ha}^{-1}$. Il est similaire entre les systèmes R//M+C et R//M+H les deux premières campagnes. Lors de la troisième campagne, il est significativement supérieur avec R//M+C, soit le double de celui de R//M+H. Le rendement en maïs est plus élevé avec FuA et la différence est significative durant les deux dernières campagnes. Les rendements en FuA et Fm sont supérieurs à ceux de FuC et F0. Pour le haricot, la seule différence observée est un rendement quatre fois plus important avec Fm qu'avec F0.

Concernant la production de biomasse aérienne végétative des cultures de maïs et haricot, elle suit la même tendance que la production de grain avec une quantité inférieure en 2015 par rapport aux deux autres campagnes. En opposition, la biomasse de crotalaire réagit de manière inverse. Elle est environ deux fois plus importante en 2015. La réponse de biomasse de crotalaire à la fertilisation n'est significative qu'en troisième année, la production est plus faible en ne fertilisant pas. L'avoine réagit différemment, la biomasse totale de fourrage vert et de la paille est équivalente en 2015 et 2016. En comparant la fertilisation, la biomasse de maïs produite est supérieure avec FuA, équivalente à la production avec Fm la deuxième année et à celle avec FuC et Fm la troisième année. Le fourrage vert d'avoine est significativement plus important en utilisant Fm la première campagne.

2.2.14 En milieu réel

Comme en milieu contrôlé, le rendement en grain et en biomasse aérienne est significativement supérieur en première année par rapport à la deuxième année, quel que soit les types des plantes cultivées. L'effet de la fertilisation a été étudié séparément pour chaque campagne. Il n'y a aucune différence significative entre le rendement du maïs, haricot et avoine avec le FuA et FuC (Tableau 13). Pour ce qui est des biomasses aériennes, elles sont en général supérieures avec le traitement FuA mais la différence n'est significative que pour la biomasse d'avoine en 2015. Face à la réponse à la fertilisation, la biomasse totale d'avoine est significativement supérieure en utilisant le fumier amélioré avec $3,1 \text{ t ha}^{-1}$, composé par 49% de fourrage vert et 51% de paille.

Tableau 12 : Rendement en grain et biomasse des cultures en rotation suivant les saisons culturales, systèmes de culture : riz//maïs+crotalaire (R//M+C), riz//maïs+haricot (R//M+H), riz//avoine+vesce (R//A+V), et fertilisations : sans fertilisation (F0), fumier conventionnel (FuC), fumier amélioré (FuA), fumure minérale (Fm), en milieu contrôlé.

Traitements	Grain (t ha ⁻¹)				Biomasse (t ha ⁻¹)					
	Maïs	Haricot	Avoine	Total	Maïs	Haricot	Avoine paille	Crotalaire	Avoine vert	Total
2013-2016										
Effets des facteurs										
Année (A)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0006	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fertilisation (F)	< 0,0001	< 0,0001	0,0087	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0158	0,4621	0,0650	< 0,0001
Système de culture (SC)	0,0060			0,1949	< 0,0001					< 0,0001
A : SC	0,0028			0,0002	< 0,0001					0,0029
A : F	0,4831	0,1771	0,0457	0,0717	0,0161	0,1240	0,5359	0,0016	0,3040	< 0,0001
F : SC	0,5916			0,0534	0,8851					0,0094
A : F : SC	0,8871			0,5352	0,1077					0,4633
Variation des moyennes										
2013-2014	1,09 a	0,19 a	1,38 a		1,87 a	0,17 a	0,92 b	5,21 c	0,03 c	
2014-2015	0,48 b	0,03 b	0,62 b		0,93 b	0,08 b	1,53 a	12,39 a	0,26 b	
2015-2016	0,73 b	0,24 a	0,52 b		1,51 a	0,24 a	1,04 b	6,49 b	0,80 a	
2013-2014										
Effets des facteurs										
F	0,2280	0,7020	0,0712	0,0640	0,5390	0,7250	0,8370	0,9780	0,0370	0,450
SC	0,8070			0,338	0,1400					< 0,0001
F : SC	0,8660			0,560	0,3460					0,9370
Variation des moyennes										
Fertilisation										
F0	0,86	0,14	1,48 ab		1,79	0,13	0,98	5,18	0,02 b	
FuC	0,80	0,18	0,84 b		1,60	0,16	0,75	5,07	0,03 b	
FuA	1,45	0,21	1,01 b		2,14	0,20	0,90	5,39	0,02 b	
Fm	1,28	0,22	2,17 a		1,94	0,19	1,04	5,22	0,06 a	
Système de culture										
R//M+C	1,06	-	-	1,06 A _{MC} *	1,71	-	-	5,21	-	6,93 a C _{MC} *
R//M+H	1,13	0,19	-	1,32 A _{MB} *	2,02	0,17	-	-	-	2,19 b A _{MB} *
R//A+V	-	-	1,38	1,38 A _{AV} *	-	-	0,92	-	0,03	0,95 c B _{AV} *

2014-2015**Effets des facteurs**

F	0,0009	0,1650	0,0207	< 0,0001		< 0,0001	0,0138	0,0594	0,8899	0,3480	< 0,0001
SC	0,1188			< 0,0001		0,0045					< 0,0001
F : SC	0,0738			0,0134		0,0245					0,0115

Variation des moyennes

Fertilisation

F0	0,16 b	0,01	0,48 b			0,40 c	0,02 b	1,18	11,08	0,19	
FuC	0,14 b	0,02	0,47 b			0,51 bc	0,05 ab	1,18	10,74	0,25	
FuA	0,94 a	0,05	0,86 a			1,62 a	0,15 a	1,86	14,50	0,35	
Fm	0,57 ab	0,03	0,67 ab			1,18 ab	0,09 ab	1,92	13,27	0,24	

Système de culture

R//M+C	0,55	-	-	0,55	B _{MC} *	1,16 a	-	-	12,39	-	13,57 a	A _{MC} *
R//M+H	0,40	0,03	-	0,35	B _{MB} *	0,69 b	0,08	-	-	-	0,77 c	B _{MB} *
R//A+V	-	-	0,62	0,62	B _{AV} *	-	-	1,53	-	0,26	1,81 b	A _{AV} *

2015-2016**Effets des facteurs**

F	0,0006	0,0132	0,1280	< 0,0001		0,0023	0,0359	0,0954	0,0064	0,2230	< 0,0001
SC	< 0,0001			0,0008		0,0001					0,0016
F : SC	0,9844			0,4810		0,9297					0,9673

Variation des moyennes

Fertilisation

F0	0,35 b	0,09 b	0,29			0,84 b	0,12 b	0,70	5,28 b	0,68	
FuC	0,39 b	0,19 ab	0,44			1,09 ab	0,17 ab	0,92	6,80 a	0,62	
FuA	1,19 a	0,31 ab	0,63			2,10 a	0,30 ab	1,27	6,94 a	0,86	
Fm	1,01 ab	0,38 a	0,69			2,00 a	0,38 a	1,28	6,94 a	1,06	

Système de culture

R//M+C	1,05 a	-	-	1,05	A _{MC} *	2,09 a	-	-	6,49	-	8,58 a	B _{MC} *
R//M+H	0,42 b	0,24	-	0,66	C _{MB} *	0,93 b	0,24	-	-	-	1,18 b	B _{MB} *
R//A+V	-	-	0,52	0,52	B _{AV} *	-	-	1,04	-	0,80	1,84 b	A _{AV} *

A l'intérieur de traitement, les moyennes suivies de lettre présentent de différence significative avec ANOVA, comparaison des moyennes avec Tukey HSD, $\alpha=0,05$, ou avec Kruskal Wallis, LSD, $\alpha=0,05$.

* : Comparaison des moyennes issues de trois années d'expérimentation en séparant les systèmes de culture, les indices après la lettre diffèrent les systèmes de culture : MC pour maïs + crotalaire, MH pour maïs + haricot, et AV pour avoine + vesce.

Tableau 13 : Rendement en grain et biomasse des cultures en rotation avec le riz: maïs+haricot (R//M+H), avoine (R//A+V) suivant les fertilisations : fumier conventionnel (FuC) et fumier amélioré (FuA), en milieu paysan en 2014 et 2015.

Traitements	Grain (t ha ⁻¹)				Biomasse aérienne (t ha ⁻¹)				
	Mais	Haricot	Avoine	Total	Mais	Haricot	Avoine paille	Avoine vert	Total
2013-2015									
Effets des facteurs									
Année (A)	< 0,0001	< 0,0001	0,0155	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0134	0,7018	< 0,0001
Fertilisation (F)	0,4990	0,6380	0,2079	0,1550	0,0727	0,5390	0,0803	0,0339	0,0126
Système de culture (SC)				0,0012					0,0868
A : F	0,5190	0,7840	0,6825	0,5040	0,4439	0,3860	0,6926	0,2419	0,5046
A : SC				0,0051					0,0025
F : SC				0,6484					0,9983
A : F : SC				0,9640					0,6235
Variation des moyennes									
2013-2014	1,50 a	0,60 a	1,03 a		3,15 a	0,44 a	1,94 a	1,18	
2014-2015	0,49 b	0,07 b	0,52 b		1,70 b	0,20 b	1,29 b	1,24	
2013-2014									
Effets des facteurs									
F	0,949	0,596	0,403	0,4485	0,1678	0,9580	0,3460	0,2898	0,0890
SC				0,0044					0,2070
F : SC				0,9316					0,7280
SC : F									
Variation des moyennes									
R//A+V - FuC	-	-	0,91	0,91 b	-	-	1,77	1,07	2,84
R//A+V - FuA	-	-	1,15	1,15 b	-	-	2,12	1,29	3,41
R//M+H - FuC	1,47	0,58		2,06 a	2,82	0,44	-	-	3,16
R//M+H - FuA	1,53	0,63		2,16 a	3,47	0,44	-	-	3,91
2014-2015									
Effets des facteurs									
F	0,176	0,903	0,219	0,143	0,1082	0,2490	0,1152	0,0290	0,0182
SC				0,611					0,0527
F : SC				0,825					0,8404
SC : F									

Variation des moyennes

R//A+V	-	FuC	-	-	0,39	0,39	-	-	1,02	1,00 b	2,02 b
R//A+V	-	FuA	-	-	0,63	0,63	-	-	1,57	1,48 a	3,05 a
R//M+H	-	FuC	0,38	0,07	-	0,45	1,26	0,16	-	-	1,42 b
R//M+H	-	FuA	0,60	0,07	-	0,67	2,13	0,25	-	-	2,38 ab

A l'intérieur de traitement, les moyennes suivies de lettre présentent de différence significative, ANOVA, Tukey HSD, $\alpha = 0,05$.

2.2.15 Comparaison de rendement en grain et en biomasse des deux sites expérimentaux

Le rendement de haricot est beaucoup plus élevé en milieu paysan qu'en milieu contrôlé, respectivement $0,4 \text{ t ha}^{-1}$ en moyenne contre $0,1 \text{ t ha}^{-1}$. Les rendements en maïs et avoine sont similaires en milieu contrôlé et paysan. Les rendements moyens du maïs sur des parcelles paysannes et contrôlées sont respectivement de $0,7$ et $1,0 \text{ t ha}^{-1}$. La production en canne de maïs varie de $0,04$ à $6,8 \text{ t ha}^{-1}$ ($n=56$) avec une moyenne de $2,5$ contre $1,4 \text{ t ha}^{-1}$ (variant de $0,2$ à $3,1 \text{ t ha}^{-1}$, $n = 16$) sur le site contrôlé. Le rendement d'avoine est de l'ordre de $0,8 \text{ t ha}^{-1}$ quel que soit le site expérimental, avec une distribution très variée de $0,02$ à $3,3 \text{ t ha}^{-1}$ en milieu paysan et une concentration de rendement entre $0,2$ à $2,0 \text{ t ha}^{-1}$ en milieu contrôlé (Figure 20). La paille d'avoine s'étale respectivement dans un intervalle de $0,04$ à $3,8 \text{ t ha}^{-1}$ ($n = 60$) et de $0,3$ à $2,4 \text{ t ha}^{-1}$ ($n = 16$) sur des parcelles paysannes et contrôlées (Figure 20).

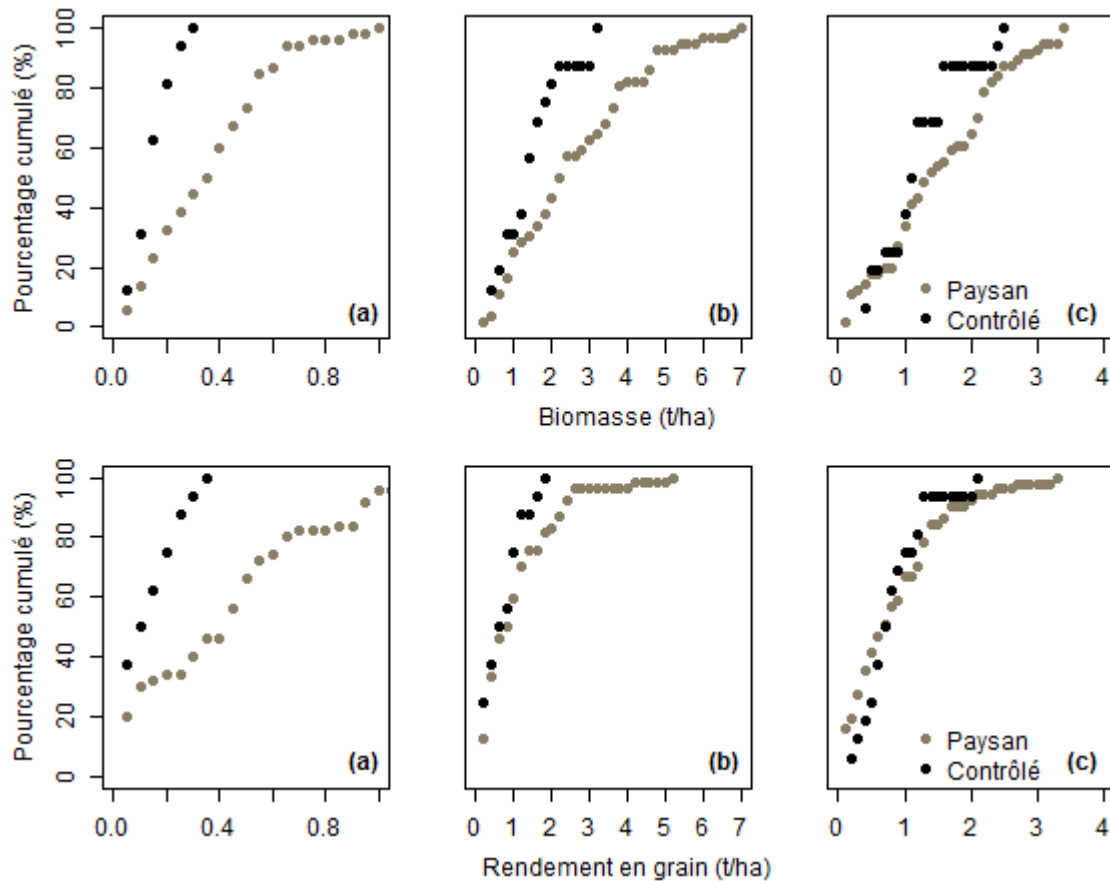


Figure 20 : Distribution des rendements de chaque parcelle individuelle de (a) haricot, (b) maïs et (c) avoine, en milieu contrôlé et en milieu paysan.

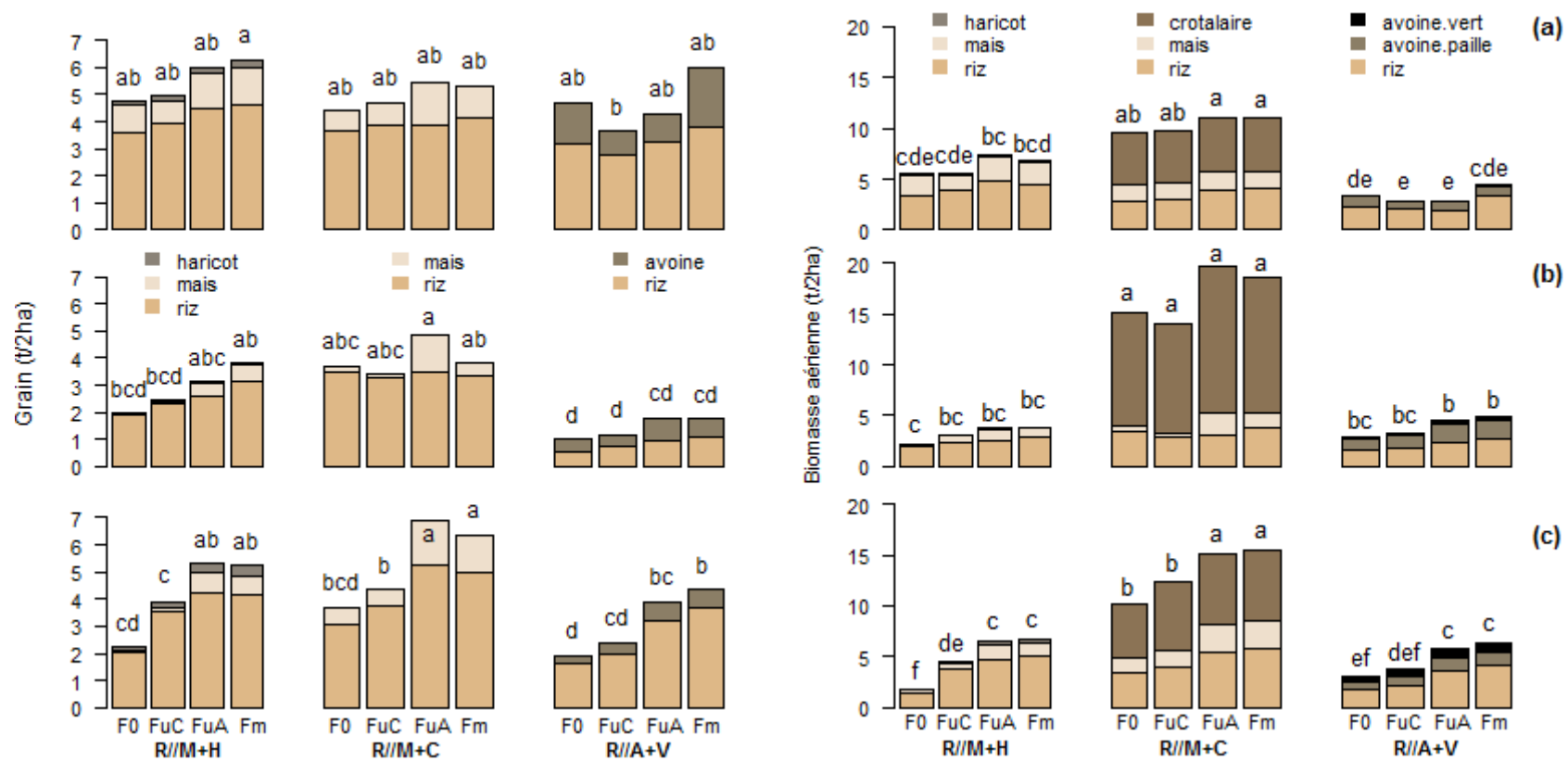
3.3 Production totale en grain et biomasse aérienne de chaque système de culture

La production totale en grain (Figure 21) du système R//A+V est significativement plus faible que celle des deux autres systèmes quel que soit les campagnes culturales ($3,6$, $0,5$ et $2,4 \text{ t ha}^{-1}$

sur deux rotations en 2014, 2015, 2016). Pour R//M+C ou R//M+H, elle est équivalente durant la première et troisième campagne avec une moyenne annuelle respective de 5,1 et 4,8 t ha⁻¹ sur deux rotations dont 80% de riz + 20% de maïs avec R//M+C, et 80% de riz + 15% de maïs + 5% de haricot avec R//M+H. En revanche, la production en grain du R//M+C est plus élevée la deuxième année avec 3,9 contre 2,8 t ha⁻¹ sur deux rotations pour R//M+H.

Quant à la production totale de biomasse (Figure 21), elle est plus importante avec R//M+C quel que soit les campagnes culturales avec une variation de 10,3 à 16,9 t ha⁻¹ sur 2 ans dont la crotalaire constitue les 50% pendant la première et troisième campagne et 73% la deuxième campagne (HSD, $\alpha = 0,05$). Le système R//M+H produit significativement plus de biomasse que R//A+V en 2014 (6,3 contre 3,3 t ha⁻¹/2 ans), et en 2015 c'est l'inverse avec 3,9 t ha⁻¹ sur 2 ans pour R//A+V et 3,2 t ha⁻¹ sur 2 ans pour R//M+H.

L'effet de la fertilisation sur la production totale en grain ou en biomasse n'est visible que pendant la troisième campagne culturale. Elle est significativement supérieure en utilisant FuA et Fm, quel que soit le système de culture et est équivalente avec FuC et F0 (Figure 21).



4 Discussions

4.1 Variation de rendement au cours des trois campagnes culturales

Le rendement en grain ou en biomasse aérienne le plus faible a été obtenu lors de la deuxième campagne culturale avec une moyenne de grain total de $2,7 \text{ t ha}^{-1}$, soit 45 et 35% inférieur que celui obtenu en première et troisième campagnes, respectivement. Ce faible rendement en deuxième année est très probablement lié à une pluviométrie mal répartie pendant le cycle cultural. Le semis a été effectué avec 60 mm de pluie suivie d'une période sèche d'environ quatre semaines (Figure 15) pendant lesquelles la reprise des plantes a été difficile. Par contre, la pluie a été très abondante pendant le tallage de riz, stade très sensible à l'excès d'eau prolongé (Morisset et al., 1982). Cet excès d'eau peut provoquer un arrêt de la croissance racinaire, une réduction de l'adsorption des éléments minéraux et une réduction de la photosynthèse (Legros, 2013).

4.2 Production végétale des sites contrôlé et en milieu réel

Les productions de riz, maïs, avoine sont similaires en milieu réel et en milieu contrôlé. En revanche, le rendement de haricot est trois fois supérieur en milieu paysan. Lors de la première année, le semis a été réalisé deux semaines plus tôt en milieu contrôlé par rapport au milieu paysan. En milieu contrôlé il semblerait que le haricot qui avait commencé à lever n'a pas bien supporté les fortes pluies, alors qu'en milieu paysan, il n'avait pas encore germé et a mieux supporté l'épisode pluvieux. Pendant la deuxième campagne, les pluies ont affecté de la même façon les deux types d'expérimentation.

Sur les parcelles paysannes, les productions en grain et en paille de riz sont nettement inférieures à Betafo par rapport à Andranomanelatra pendant la deuxième campagne. Cela est probablement lié au ruissellement en 2015 qui a d'une part arraché des poquets de riz et d'autre part recouvert d'autres poquets. L'autre phénomène observé a été un semis tardif de la moitié des parcelles de Betafo, induisant à un retard de la date de floraison qui a eu lieu pendant une période sèche (Figure 15). Cela est responsable d'une diminution du nombre de panicules et épillets par panicule.

4.3 Rendement en grain et en biomasse aérienne avec les différentes fertilisations

Le fumier amélioré, plus riche en azote, permet d'augmenter le nombre de panicules et le nombre des grains pleins par m^2 (Tableau 10, Tableau 11) par rapport au fumier conventionnel. Ces résultats correspondent bien à des périodes propices à l'utilisation d'azote : émergence des dernières talles fertiles afin d'augmenter le nombre de panicules ; au début de la phase reproductive afin de favoriser le nombre d'épillets ; en pleine épiaison afin

d'augmenter le pourcentage de graines pleines (Moreau, 1987). Ces composantes influent positivement sur le rendement en grain.

En milieu paysan, l'effet du FuA sur le rendement de riz a été observé dès la première année de l'expérimentation. Cet effet est moins significatif la deuxième année (seuil de 10%). Très probablement, la forte pluie a entraîné un ruissellement et un lessivage de l'azote. De plus, le peuplement de riz n'a pas pu bien valoriser cette fertilisation puisque la densité de poquets était beaucoup plus faible (observation personnelle) à cause des effets du ruissellement. En revanche, en milieu contrôlé, l'utilisation des fertilisations différentes n'a eu une influence significative que pendant la troisième campagne culturale. À l'inverse des parcelles en milieu paysan, les parcelles en milieu contrôlé ont été fertilisées tous les ans avant notre expérimentation et le sol était déjà riche en azote minéral (Rakotoarisoa et al., 2010).

D'un point de vue économique, l'utilisation de FuA permet un gain qui peut aller de 300 à 450 kAr ha⁻¹ (10³Ariary) pour le riz, 350 à 700 kAr ha⁻¹ pour le maïs et 95 à 120 kAr ha⁻¹ pour le haricot, suivant les prix, par rapport à l'utilisation de FuC. En comparant avec Fm, l'utilisation de FuA permet un gain d'environ 300 kAr ha⁻¹ avec le riz et 350 kAr ha⁻¹ avec le maïs + haricot. Toutefois ces calculs n'incluent pas le surcoût en travail nécessaire à la production de fumier amélioré.

En terme de production de biomasse totale, la biomasse produite avec FuA augmente de 29 à 71% par rapport à celle produite avec F0 et FuC pour R//M+H. Cette augmentation est de l'ordre de 18 à 33% pour R//M+C qui permet d'augmenter potentiellement la quantité de C et de N restituée sur la parcelle afin d'améliorer la fertilité du sol. Pour R//A+V, elle est de 35 à 45% qui par conséquent permet d'augmenter les biomasses disponibles pour l'alimentation animale.

4.4 Rendement en grain et en biomasse aérienne de différents systèmes de culture

En milieu réel, l'effet de système de culture n'était pas visible parce que toutes les parcelles ont été labourées pendant la première campagne et qu'une seule année de pratique de l'AC est très souvent insuffisante pour observer un effet sur le rendement (Zheng et al., 2014). En milieu contrôlé, l'effet des systèmes de culture sur le rendement en grain et en paille de riz est déjà observé dès la première campagne de notre étude parce que les parcelles sont en AC depuis plus de dix ans consécutifs. Les rendements en grain et en biomasse du riz de R//A+V en AC est faible pendant les trois campagnes, et ils sont inférieurs de 35 à 42% à ceux de R//M+H en labour et R//M+C en AC, respectivement. Avec R//A+V, étant donné que le riz et l'avoine sont des céréales, les deux plantes utilisent plus ou moins les mêmes éléments nutritifs du sol (Granier et Razafindratsita, 1970). En plus l'utilisation des pailles des céréales comme couverture du sol, avec C/N élevé, entraîne l'immobilisation de l'azote et l'adsorption de phosphore (Rice et Smith, 1984 ; Beri et al., 1995 ; Giller et al., 2009). Il y a eu également une exportation d'azote lors de la coupe de fourrage d'avoine vert. Le rendement de riz avec

R//A+V, en apportant de FuA ou de Fm, est similaire à celui de R//M+C et R//M+H avec F0 ou FuC. Ainsi, l'azote disponible pour le riz diminue d'année en année avec R//A+V si l'exportation n'est pas compensée par une fertilisation riche en azote.

En ce qui concerne la différence de rendement de riz entre R//M+C et R//M+H, la différence n'est observée que pendant l'année où la pluviométrie est mal répartie pendant le cycle cultural. R//M+C a produit 27% de plus de riz que R//M+H. L'utilisation de la crotalaire qui produit une importante quantité de biomasse, jusqu'à 16 t ha^{-1} , permet l'enrichissement en azote disponible pour les plantes en rotation ou en association avec elle. La crotalaire est une légumineuse très répandue sur les Hautes Terres du Vakinankaratra, elle est donc adaptée et fixe sans doute une part importante d'azote atmosphérique. Gathoumbi *et al.* cités par Giller (2001) ont montré par exemple qu'elle peut apporter 199 kgN ha^{-1} en six mois de culture et que $\frac{3}{4}$ de cet azote venait de la fixation atmosphérique.

Pour ce qui est de la production totale des systèmes de culture, le grain produit est au moins similaire pour les systèmes R//M+H et R//M+C, voir supérieur de 29% avec R//M+C la deuxième année. Ceci va à l'inverse des hypothèses de départ : *ie.* R//M+H produirait plus de grain que R//M+C. Le gain de production de grain apporté par le haricot resterait donc moins important que l'effet positif de la crotalaire sur la production de riz. La production de grain a été plus faible pour le système R//A+V avec une diminution de 15 à 50% par rapport aux deux autres systèmes suivant les conditions climatiques et les fertilisations.

La biomasse aérienne totale produite a été significativement plus élevée avec le système R//M+C, quel que soit les campagnes culturales et les fertilisations. La différence moyenne avec les deux autres systèmes R//M+H et R//A+V est de l'ordre de 53 et 63% la première et troisième année et augmente jusqu'à 79% la deuxième année. La biomasse totale produite par R//M+C, en AC a été très élevée la deuxième campagne, production inverse que celle de R//M+H et R//A+V. Cela s'explique par la forte production de biomasse de crotalaire, deux fois plus élevée que celle de la première et troisième campagnes. Cette forte production de crotalaire la deuxième année peut être liée à l'abondance des pluies à partir de décembre à mars (1353 mm) qui permet à un stock d'eau important dans le sol surtout avec l'effet du mulch à réduire le ruissellement et donc à améliorer l'infiltration d'eau dans le sol. En effet, la crotalaire a pu bénéficier de cette réserve d'eau dans le sol pour son alimentation hydrique pendant la période sèche de cinq mois jusqu'à sa coupe avant le semis suivant.

Du point de vue économique, R//M+C en AC permet de gagner en moyenne 120 à 230 kAr par ha et par an de plus avec les grains totaux produits par rapport à R//M+H en labour, tandis que le passage de R//M+H à R//A+V induit à une perte de 540 à 900 kAr ha^{-1} et par an si on compare les grains totaux produits par système de culture. Toutefois, ce manque de production de grain total de R//A+V peut être compensé par un impact positif de la production de fourrage d'avoine utilisé pour l'alimentation des vaches laitières et par conséquent sur la production laitière.

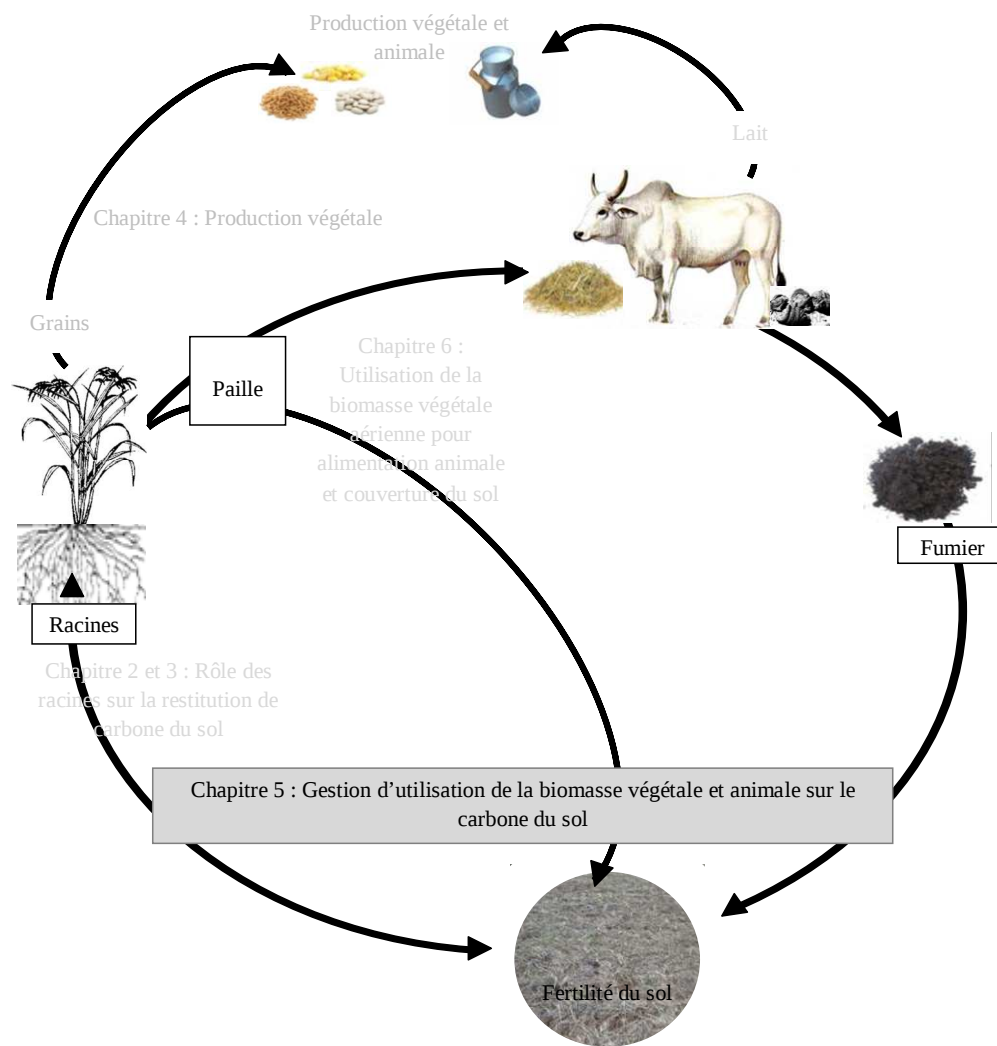
5 Conclusion

Les rendements de riz, maïs et avoine en milieu paysan varient beaucoup en fonction des conditions édaphiques des parcelles utilisées. Toutefois, cette gamme de variation est très similaire à celle obtenue en milieu contrôlé. Le rendement de riz avec FuA, que ce soit sur les parcelles paysannes ou contrôlées, a augmenté jusqu'à 27 et 50%, respectivement, par rapport à FuC ou F0. L'utilisation de FuA améliore également la production totale de grain et de biomasse de chaque système de culture. Cependant, la différence n'est significative qu'en troisième année de l'expérimentation avec une hausse de 22 à 27% du rendement total, suivant les systèmes de culture, par rapport à celui avec FuC. En ce qui concerne les systèmes de culture, le rendement en grain est plus faible avec R//A+V en AC qu'avec R//M+H en labour et R//M+C en AC pendant les trois campagnes culturales. Pendant l'année où la pluviométrie est mal répartie tout au long du cycle cultural, le système R//M+C en AC permet un meilleur rendement (3,4 t ha⁻¹ de riz). Ainsi, le rendement en AC varie d'un système à un autre et dépend également des conditions climatiques, nous ne pouvons donc pas affirmer complètement que les systèmes en AC améliorent toujours le rendement des cultures. Le système R//A+V produit moins de grains mais il peut être intéressant pour les paysans à exploitation mixte d'agriculture et élevage par la production de fourrage vert avec des valeurs nutritionnelles plus élevées que celles des pailles de riz ou de maïs (données non présentées). En ce qui concerne la biomasse totale produite, elle est significativement plus élevée avec R//M+C avec une moyenne de 13,5 t ha⁻¹ pendant les trois campagnes, soit un surplus jusqu'à 70% par rapport aux deux autres systèmes. Bref, le système R//M+C en AC est intéressant pour l'amélioration du rendement de riz par la capacité de la crotalaire à restituer beaucoup de C et de N dans le sol par sa biomasse et grâce à la fixation de N₂ atmosphérique. Le système R//A+V produit plus de fourrage vert pour l'alimentation animale que les autres systèmes mais moins de grain avec une biomasse totale équivalente à R//M+H. Il peut être intéressant pour les paysans à exploitation mixte d'agriculture et élevage par la production de fourrage vert avec des valeurs nutritionnelles plus élevées que celles des pailles de riz ou de maïs.

Dans ces travaux, nous n'avons étudiés que la quantité de rendement en grains ou en biomasse des cultures. Pour mener à une évaluation complète de ces systèmes de cultures et des options de fertilisation, il convient d'évaluer la quantité et qualité de biomasse aérienne produite, et le bénéfice potentiel en cas d'utilisation de cette biomasse pour alimenter les bovins. Il conviendrait également d'évaluer sur le moyen terme ces différentes options techniques en termes de recyclage des nutriments et de cycle du carbone. La combinaison de toutes ces études avec une analyse économique peut être utile afin d'avoir un bilan complet sur l'importance de l'utilisation des innovations agro-écologiques proposées dans cette étude, système en agriculture de conservation et fumier amélioré, dans une exploitation agricole.

Chapitre 5 :

Gestion de l'utilisation des biomasses végétale et animale : effets sur la restitution du carbone au sol



Résumé

L'agriculture de conservation (AC) est citée parmi les pratiques agricoles qui permettent de séquestrer du carbone grâce au non labour et à la restitution importante de résidus au sol. Cette partie a pour objectif de simuler différentes options d'utilisation de la biomasse végétale et leur effet sur le stockage de carbone au sol (30 cm). Trois systèmes de culture sont étudiés : (1) riz pluvial suivi d'une culture de maïs associée à la crotalaire (R//M+C), en AC en milieu contrôlé, (2) riz pluvial suivi d'une culture d'avoine associée à la vesce (R//A+V), en AC et (3) riz pluvial suivi d'une culture de maïs associée au haricot (R//M+H), en labour. L'évolution des stocks de carbone sur vingt ans a été simulée en utilisant le modèle Hénin&Dupuis en considérant des stocks de C initial allant de 60 à 160 t C ha⁻¹. Les résultats montrent que la différence des stocks en C au temps final et initial (delta C) diminue avec l'importance du stock en C du sol de départ. Le système R//M+C permet d'augmenter le stock en C du sol s'il est initialement inférieur à 150 t ha⁻¹, quel que soit le taux d'exportation de la biomasse végétale. Par contre le delta C sous les systèmes R//A+V et R//M+H peut devenir négatif même avec un stock en C initial 60 t C ha⁻¹ à partir d'une exportation de 90% de la biomasse végétale. Toutefois, au-delà d'un stock initial de 110 et 130 t C ha⁻¹, le delta C devient toujours négatif sous R//A+V et R//M+H, respectivement. Cette simulation pourrait être améliorée en prenant en compte le taux d'humification de chaque type d'apport et le taux de minéralisation de chaque mode de gestion du sol.

Mots clés : humification, minéralisation, culture pluviale, modélisation, Hautes Terres, Madagascar

1 Introduction

Le stockage de carbone (C) dans le sol est important dans la réduction des émissions des gaz à effet de serre via la séquestration du carbone (FAO 2016) et dans l'amélioration de la fertilité du sol via l'enrichissement du sol en matières organiques (Liu et al., 2006). Le protocole de Kyoto, accepté et ratifié par plusieurs pays dont Madagascar, a été proposé dans l'objectif de réduire l'émission du CO₂ et d'autre gaz à effet de serre. Lors de la COP 21 en 2015, le programme Quatre pour mille (ou 4PM) a été lancé afin de favoriser le stockage de carbone dans le sol par l'adoption de pratiques durables. En effet, le sol constitue un puits important de carbone, il peut contenir jusqu'à deux à trois fois plus de carbone que l'atmosphère (Minasny et al., 2017). Il a une forte capacité de stocker le carbone via l'agriculture par la séquestration de C effectuée par les plantes, par la restitution des résidus végétaux sur la parcelle (Turmel et al., 2015) et par l'apport de fumure organique pour fertiliser la culture (Gattinger et al., 2012 ; Triberti et al., 2016). L'agriculture de conservation (AC) basée sur les trois principes à l'échelle de la parcelle (FAO, 2015) : (1) travail minimal du sol, (2)

association et rotation culturales et (3) couverture permanente du sol, permet donc cette séquestration de C et l'amélioration du carbone organique du sol (Ussiri et Lal, 2009 ; Géraudeau et al., 2016).

L'AC a été initialement introduite et pratiquée à Madagascar en 1992 dans l'objectif de réduire l'érosion qui est une des menaces de l'agriculture et de maintenir les cultures pluviales (Séguy et al., 2009) face au problème de fertilité des sols. Dans la région de Vakinankaratra – Madagascar, cette technique est peu adoptée du fait de la présence d'autres voies d'utilisation de la biomasse végétale aérienne (dont principalement l'alimentation animale) comme dans d'autres pays (Erenstein et al., 2015 ; Naudin et al., 2015). Or les cultures pluviales sont fortement développées sur les Hautes Terres de Madagascar à cause notamment de l'augmentation des besoins alimentaires liée à l'insuffisance de bas-fonds exploitables pour l'agriculture. Il est primordial ainsi d'assurer la durabilité de ces cultures et de trouver de compromis d'utilisation de la biomasse végétale pour alimenter à la fois l'animal sans réduire le stock en C du sol. Par conséquent, par rapport aux différents avantages du stockage de C dans le sol (Lal et al., 2015) qui, d'une manière directe ou indirecte permet d'assurer la sécurité alimentaire, l'évaluation du stock en C du sol s'avère être importante. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour prédire la dynamique du carbone dans le sol à court, moyen ou long terme. Elles diffèrent par (1) le nombre de compartiments du C du sol : modèle monocompartimental comme le modèle Hénin&Dupuis (Mary et Guérif, 1994) et modèle multicompartimental considérant le carbone rapidement (annuel), moyennement (déca-annuel) et lentement décomposable (mille-annuel) (Skjemstad et al., 2004), par exemple ICBM, Century, Rothamsted C (Coleman et Jenkinson, 2014) ; et (2) les paramètres environnementaux intégrés dans le modèle lors de l'utilisation et la simulation du C du sol. Par exemple Rothamsted C intègre explicitement les données climatiques (Coleman et Jenkinson, 2014).

Cette étude a donc pour objectif de simuler l'effet des différentes options d'utilisation de la biomasse végétale aérienne des trois systèmes de cultures pluviales sur la dynamique du C dans le sol. Les trois systèmes de culture testés sont orientés vers trois utilités différentes. La simulation a été effectuée suivant plusieurs niveaux du stock en C du sol initial dont dépend l'évolution du carbone du sol (Campbell et al., 1991).

2 Matériels et méthodes

2.1 Sites et dispositifs expérimentaux

L'étude a été réalisée dans la région de Vakinankaratra – Madagascar, caractérisée par un climat tropical d'altitude avec une saison sèche et fraîche de cinq mois (mai à octobre) et une saison humide et chaude de sept mois (novembre à avril). La température moyenne mensuelle est de l'ordre de 19°C pendant la saison chaude et 15°C avec un minimum de 6°C pendant la

saison froide. Les pluviométries annuelles sont de 1307 mm en 2013-2014, 1563 mm en 2014-2015 avec une distribution irrégulière pendant le cycle cultural et 1511 mm en 2015-2016. Les sols sont du type ferrallitique humifère (Andranomanelatra) et andosols (Betafo) avec un stock de carbone relativement élevé en surface (Razafimbelo, 2005).

L'expérimentation agricole a été conduite sur trois ans (2013 à 2016) en milieu contrôlé, sur le dispositif FOFIFA/SCRiD, installé depuis 2002 ; et en milieu paysan sur deux ans (2013-2015), sur 19 parcelles paysannes de 800 m² chacune, situées autour d'Andranomanelatra, Antsirabe et de Betafo. Trois systèmes de culture ont été installés et comparés en milieu contrôlé : (1) riz pluvial, variété Chhomrong dhan, suivi de l'association de maïs, variété *Tombontsoa* et de *Crotalaria grahamiana* (R//M+C), en AC, (2) riz pluvial suivi de l'association de l'avoine, variété *Fanantenana*, et de la vesce, variété *Mahavokatra* (R//A+V), en AC ; et (3) riz pluvial suivi de l'association de maïs et de haricot, variété RI 5-2 (R//M+H), en labour. En milieu paysan, ces deux derniers systèmes ont été mis en place : R//A+V, en AC et R//M+H en labour. A l'intérieur de chaque système de culture, quatre types de fertilisation ont été appliqués mais nous n'avons utilisé comme support de l'étude que l'expérimentation fertilisée avec 5 t ha⁻¹ du fumier amélioré. La densité entre les plantes cultivées varie suivant le type d'association et le type des plantes (Figure 12), avec des densités respectives de 250 000, 200 000, 30 000, 25 000, 75 000 et 50 000 plants ha⁻¹ pour le riz, avoine, vesce, maïs, haricot, et crotalaire.

Pendant la campagne 2014-2015, des parcelles en culture pure de maïs, haricot et avoine ont été installées en milieu contrôlé afin de suivre la biomasse racinaire de chaque type de plantes et de comparer la biomasse racinaire entre la culture en pure et la culture associée. Les mêmes densités de semis que ceux en culture associée ont été appliquées (Chapitre 1).

Parmi les trois années d'essai, seules les données des deux premières années ont été traitées dans cette partie parce que les mesures des racines n'ont pas été effectuées sur toutes les plantes la troisième année. Chaque année, les deux cultures en rotation, *ie* le riz pluvial et les cultures associées (maïs + crotalaire, avoine + vesce et maïs + haricot) ont été installées sur des parcelles côté à côté de 100 m² chacune.

A partir de 2002, les systèmes de cultures testés en milieu contrôlé ont été changés trois fois avant notre essai (Tableau 1).

2.2 Mesures effectuées

2.2.16 Mesure de biomasse végétale

- Pour les deux années d'expérimentation 2013 à 2015

La biomasse aérienne a été mesurée à la récolte de riz, maïs, haricot et avoine, avant la remise en culture de crotalaire et la biomasse racinaire à la floraison de toutes les plantes sur toutes les parcelles en culture pure ou associée.

La biomasse aérienne a été mesurée dans un carré de 25 m² situé au centre de chaque parcelle en milieu contrôlé et dans cinq carrés de 1 m² situés sur les quatre côtés et au centre de chacune des parcelles élémentaires en milieu paysan. La moyenne des données mesurées sur ces cinq petites parcelles de 1 m² a été utilisée pour extrapoler la biomasse totale produite à l'hectare. La coupe a été effectuée au ras du sol et les résidus (feuille + tige) tombés sur la surface du sol ont été récupérés afin d'avoir la quantité totale de biomasse aérienne produite pour chaque plante.

Les racines de toutes les plantes, en culture pure ou associée, ont été prélevées avec une tarière à racines Eijkelkamp® de 8 cm de diamètre dans tous les 15 cm de profondeur. Les profondeurs maximales mesurées sont respectivement de 60, 105, 105, 150 et 180 cm pour le haricot, le riz, l'avoine, la crotalaire et le maïs ; mais seules les données dans les horizons 0 – 30 cm ont été analysées dans cette étude de dynamique de stock de carbone dans le sol (Chapitre 3). L'extraction des racines a été faite le même jour que le prélèvement racinaire, ou le jour suivant, et dans ce cas les échantillons prélevés ont été conservés dans un réfrigérateur à 8° afin de conserver les petites racines. Les mottes de terre contenant les racines prélevées ont été lavées dans un tamis de maille 1 mm.

Les échantillons, de biomasse aérienne et de racines, prélevés ont été par la suite séchés dans une étuve à 60°C pendant 72 h. Ces biomasses séchées ont été pesées avec une balance de précision 0,0001 g et un maximum de 220 g pour les racines, et une balance de 0,01 g de précision et de portée 500 g.

- Pour les huit ans d'essai avant notre expérimentation : 2002 à 2011

Sur chaque parcelle élémentaire, les mesures de la biomasse aérienne ont été réalisées à la récolte de toutes les plantes et avant la remise en culture pour les plantes de couverture, chaque année. La biomasse racinaire des mêmes plantes suivies pendant l'expérimentation menée en 2013 à 2015 (riz, maïs, haricot, avoine, crotalaire), a été estimée avec le rapport biomasse racinaire/biomasse aérienne (Chapitre 3). Celle des plantes qui n'ont pas été utilisées entre 2013-2015 a été estimée avec les données bibliographiques : soja dans (Santos et al., 2010), *Brachiaria sp.* (Hylander et Ae, 1999b), ray grass (Bolinder et al., 2002b).

2.2.17 Analyse des biomasses agricoles : fumier, biomasse aérienne et biomasse souterraine

La teneur en C dans le fumier utilisé sur la parcelle, pendant l'expérimentation de 2013 à 2016, a été déterminée chaque année à l'aide d'un appareil de Spectrométrie dans le proche infra-rouge (SPIR) LabSpec 4 ASD, mesurant les spectres dans 350 à 2500 nm (Chapitre 1). L'analyse a été faite sur des échantillons finement broyés et bien homogénéisés. La lecture avec une sonde, munie de fibres optiques permettant d'envoyer le rayonnement sur les échantillons, a été répétée cinq fois afin d'assurer que l'échantillon analysé soit bien

homogène, et le résultat est la moyenne des valeurs de C de ces cinq spectres. Une équation de prédiction de la teneur en carbone du fumier, établie sur des échantillons de fumier de Vakinankaratra lors d'une étude menée par les équipes CIRAD/FIFAMANOR, a été utilisée pour prédire la teneur en C de chaque échantillon.

Les teneurs en C des racines des plantes étudiées sont plus rares dans la littérature, nous avons donc décidé de réaliser des analyses pour déterminer cette teneur. Les analyses de C dans les racines ont été effectuées avec un microanalyseur CHN au laboratoire UMR Eco&Sols, Montpellier. Il s'agissait d'une combustion complète des échantillons à 1050 °C sous courant d'hélium. Après passage du gaz de combustion dans des catalyseurs, le N et le C sont transformés N₂ et CO₂, qui sont par la suite séparés sur une colonne chromatographique et le C et le N ont été mesurés en utilisant un détecteur à conductibilité thermique.

La teneur en C utilisée pour la biomasse aérienne pour calculer la quantité de C contenue dans la biomasse végétative aérienne provient de la littérature (Chapitre 3, 3.3) (Abiven et al., 2005 ; Ferreira et al., 2012 ; Gachengo et al., 2004).

2.2.18 Prélèvement et analyse des sols

En milieu contrôlé, des échantillons du sol de chaque parcelle ont été prélevés et analysés par les équipes de laboratoires des radio-isotopes (LRI) et l'IRD au début de l'installation du dispositif expérimental en 2002. Après le prélèvement et l'analyse des sols ont été répétés en 2008 et en 2011 sur les mêmes parcelles. En milieu paysan, ces mesures ont été réalisées au début de notre expérimentation, en 2013 par le LRI. Le prélèvement du sol sur toutes les parcelles paysannes utilisées, qui sont généralement en pente, a été effectué sur deux points situés en bas et en haut de la pente.

Les mesures ont été faites dans cinq horizons (0-5, 5-10, 10-20, 20-30 et 30-40 cm) et quatre horizons (0-10, 10-20, 20-30 et 30-40 cm) respectifs en milieu contrôlé et en milieu paysan. Les sols ont été prélevés à l'aide d'un cylindre métallique de 250 cm³ pour les profondeurs 0-5 et 5-10 cm (en 2002) et de 500 cm³ pour les profondeurs 10-20, 20-30 et 30-40 cm et d'un carottier de 295 cm³ sur les horizons de 0-5 et 5-10 cm et 590 cm³ sur 10-20, 20-30 et 30-40 cm (en 2011 et 2013). Une partie des échantillons a été mise en étuve à 105°C pendant 48 h afin de déterminer l'humidité du sol ; et les restes des échantillons ont été séchés à l'air libre et tamisé à 2 mm pour être utilisés dans des analyses.

La densité apparente a été mesurée sur des échantillons de sol prélevés avec un cylindre de 250 ou 500 cm³, où le poids sec a été mesuré après séchage à l'étuve de 105°C. Les analyses de C et de N ont été effectuées avec un microanalyseur CHN au laboratoire UMR Eco&Sols, Montpellier.

2.2.19 Equivalence en protéine (PDI) des biomasses végétales exportées

Les biomasses végétales produites et exportées pour l'alimentation animale peuvent être converties en protéine digestible dans l'intestin (PDI g kg⁻¹ MS). Le PDI a été calculé en fonction de la teneur en protéine, cellulose brute, cendre total et fibre des biomasses végétales, obtenu par leurs analyses spectrales (Chapitre 6). Les valeurs des PDI les plus faibles entre PDIE (PDI par l'énergie) et PDIN (PDI par l'azote) ont été considérées dans nos résultats.

2.3 Modélisation : simulation de la dynamique du carbone du sol

La simulation a été faite au début en utilisant un modèle Rothamsted Carbon ou Roth C, avec les données sur l'apport de carbone dans le sol chaque année et les résultats des analyses des sols sur des années bien précises. Mais malgré l'obtention de toutes ces données, nous avons rencontré des difficultés sur la calibration du modèle et cela nous a conduits à utiliser un autre modèle plus simple, celui de Hénin&Dupuis.

2.2.20 Modèle Rothamsted C (Roth C)

Le modèle Roth C peut être utilisé pour prédire la dynamique du carbone même à long terme. La prédiction du carbone du sol prend en compte cinq compartiments qui sont (1) la matière organique facilement ou rapidement décomposable (DPM), (2) la matière organique résistante, plus lentement décomposable que le DPM (RPM), (3) la biomasse microbienne (BIO), (4) la matière organique humifiée (HUM), et (5) la matière organique inerte qui ne pourra pas être dégradée (IOM) (Figure 22).

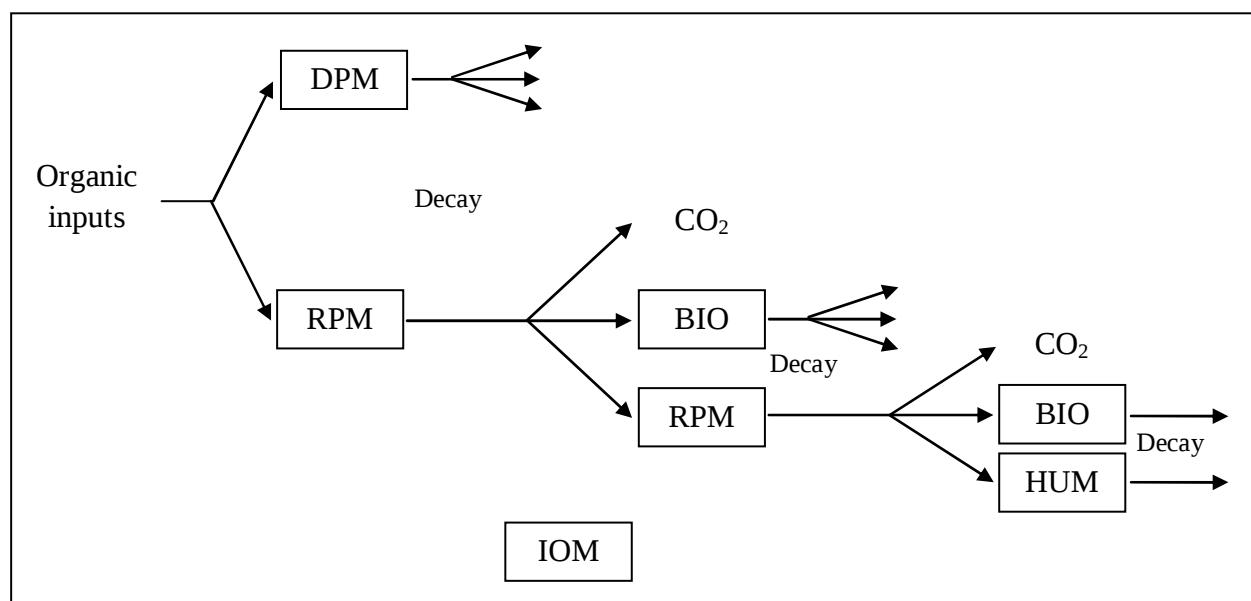


Figure 22 : Structure du modèle Rothamsted Carbon (Coleman et Jenkinson, 2014)

La simulation de l'évolution du stock de C avec Roth C nécessite :

- (1) des données climatiques mensuelles telles que la pluviométrie (mm), la température moyenne (°C), l'évapotranspiration (mm) ;
- (2) des données concernant le type de sol comme le taux d'argile dans le sol (%) et la profondeur du sol étudié ;
- (3) des données sur l'apport de carbone dans le sol, telles que l'absence ou la présence, et dans ce cas, la quantité de la couverture du sol et la teneur en carbone de chaque type de résidus apporté ($t\ C\ ha^{-1}$) ; l'apport de C par le fumier ($t\ C\ ha^{-1}$) ;
- (4) les valeurs de RPM, DPM, HUM, BIO, IOM estimées à l'état d'équilibre du stock de C dans le sol.

Les données nécessaires pour utiliser le modèle Roth C n'étaient que partiellement disponibles ; celles dont nous disposions concernaient les données climatiques, édaphiques et apport de C par les cultures. En revanche le modèle nécessitait une calibration de l'état d'équilibre pour connaître la part de minéralisation et humification sous le climat et avec le type de sol local. Classiquement, des données d'un écosystème naturel non perturbés sont utilisées, dans lequel la végétation actuelle est supposée n'être jamais perturbée, et qui correspond aux apports moyens au stock actuel du sol. N'ayant pas ces informations dans notre propre dispositif expérimental nous les avons cherchés dans la littérature, selon deux options :

- (1) Utiliser les apports de C de *bozaka* mesurés à Fianarantsoa (Razafimahatratra, 2011) et sur le site de Bemasoandro (Razafimbelo, 2005), à 5 km au sud d'Andranomanelatra, en séparant l'apport de carbone des biomasses aérienne et racinaire et en ajoutant le C de la rhizodéposition avec le C des racines, avec **$C_{rhizodéposition} = 0,43 * C_{dans\ les\ racines}$** (Balesdent et al., 2011). Il est alors important de bien considérer la différence du taux d'humification du carbone dans la partie racinaire qui est 2,3 fois plus élevé que celui de la partie aérienne (Kätterer et al., 2011).
- (2) Utiliser les mêmes apports de C par le *bozaka* mais en modifiant le taux d'humification (Hum) suivant la teneur en Al, Fe et Si dans le sol ((Yasuhito et al., 2004) :

$$H(f) = 2,47 + 2,74\ Alp - 2,91\ Sio - 1,01\ Feo \text{ et } Hum = 0,02/H(f)$$

2.2.21 Modèle Hénin & Dupuis

Le modèle Hénin&Dupuis, un modèle simple, détermine l'évolution des matières organiques humifiées (Figure 23). Il comporte deux coefficients :

- (1) un coefficient isohumique k_1 , qui permet d'augmenter le stock des matières organiques humifiées dans le sol après le processus d'humification ;
- (2) un coefficient de minéralisation k_2 qui réduit le stock de matières organiques dans le sol.

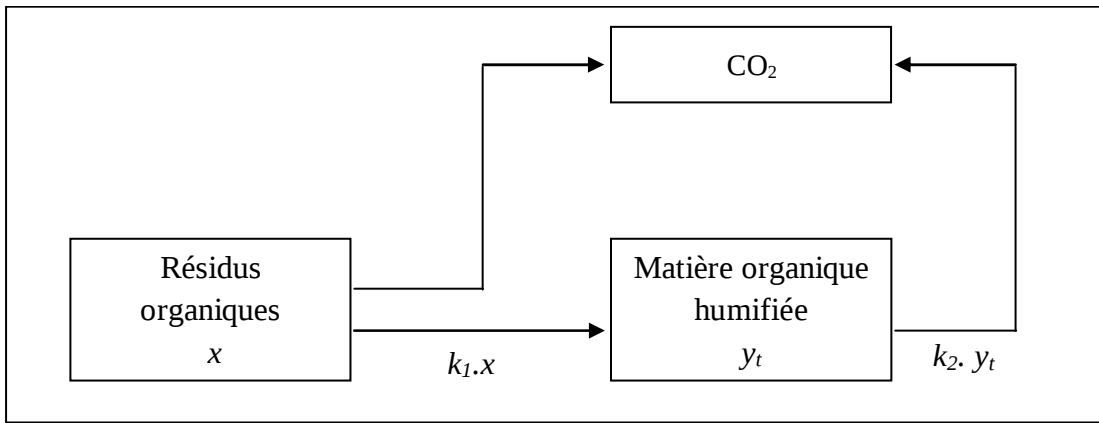


Figure 23 : Structure du modèle Hénin&Dupuis(ex. cité par (Mary et Guérif, 1994))

- **Optimisation des coefficients k_1 et k_2**

Calibration de Roth C

Les étapes suivies pour cette simulation et les résultats obtenus ont été résumés dans l'Annexe 2. Dans le modèle, le taux d'humification a été modifié suivant les caractéristiques du sol d'Andranomanelatra en utilisant la formule donnée par (Yasuhito et al., 2004) :

$$H(f) = 2,47 + 2,74 Alp - 2,91 Sio - 1,01 Feo \text{ et } Hum = 0,02/H(f)$$

Où $H(f)$ est un facteur permettant de modifier le taux d'humification de matière organique du sol suivant les propriétés du sol (cas des andosols) ; Alp, Sio et Feo correspondent respectivement à des teneurs en aluminium, fer et silicium dans le complexe argilo-humique du sol, et Hum est le taux d'humification des matières organiques du sol.

Les valeurs moyennes du stock de carbone du sol mesurées sur toutes les parcelles (tous traitements confondus) en 2002 et en 2011, les apports de carbone dans le sol par le fumier, les résidus de culture et les racines des plantes mesurées sur les parcelles contrôlées entre 2002 et 2011 (Annexe 3) ont été utilisées par la suite pour déterminer les coefficients d'humification k_1 et de minéralisation k_2 . Un k_1 moyen des différentes sources de matière organique (fumier, biomasse aérienne et biomasse racinaire) a été utilisé afin d'éviter l'incertitude des valeurs de ce coefficient, propres à nos types de matière organique apportée.

k_1 et k_2 ont été optimisés en fixant les valeurs minimale et maximale de k_1 et de k_2 par rapport à des valeurs trouvées dans la littérature (Tableau 14, Annexe 4). Les stocks de carbone mesurés sur les parcelles d'expérimentation en 2002 et en 2011 ont été utilisés pour cette optimisation des valeurs des paramètres k_1 et k_2 .

Tableau 14 : Valeurs minimale et maximale de coefficients d'humification k_1 de fumier, biomasse aérienne et biomasse racinaire et de minéralisation k_2 trouvées dans des bibliographies.

	Type de biomasse	Minimale	Maximale	Références
k_1	Fumier	0,30 ⁽¹⁾	0,60 ⁽²⁾	⁽¹⁾ (Kätterer et al., 2011; Mary et Guérif, 1994) ⁽²⁾ (Janssen, 1984)
	Biomasse aérienne	0,06 ⁽¹⁾	0,40 ⁽²⁾	⁽¹⁾ (Andriulo et Jérôme, 1999) ⁽²⁾ (Janssen, 1984)
	Racines	0,15 ⁽¹⁾	0,30 ⁽²⁾	⁽¹⁾ (Kätterer et al., 2011) ⁽²⁾ (Andriulo et Jérôme, 1999)
k_2	Parcelles confondues	0,008 ⁽¹⁾	0,20 ⁽²⁾	⁽¹⁾ (Mary et Guérif, 1994) ⁽²⁾ (Kintche, 2011)

3 Résultats et discussion

3.1 Simulation sur un stock moyen en carbone pour toute l'expérimentation

Les données disponibles ne nous ont pas permis d'estimer une situation d'équilibre crédible correspondant à la biomasse aérienne, biomasse souterraine et stock en C dans les conditions de climat et sol d'Andranomanelatra. Aucune étude n'était disponible rapportant les stocks en C dans ces trois compartiments dans une situation de végétation naturelle trouvée ayant les mêmes caractéristiques de sol et de climat que ceux d'Andranomanelatra. Ainsi, plutôt que d'utiliser des données provenant de climat identique mais sur des sols différents de sites éloignés d'Andranomanelatra, nous avons essayé d'utiliser les données qui avait été obtenues localement. Nous avons fait l'hypothèse que les systèmes de culture installés depuis dix ans sur le terrain expérimental d'Andranomanelatra étaient globalement proches en termes d'apport en C que ceux qui avaient été pratiqués depuis la mise en culture de ce terrain. La région d'Andranomanelatra étant habitée depuis plusieurs siècles, le terrain étant fertile, plat et bien drainé, nous pouvons supposer que le terrain a été mis en culture depuis des décennies. Le stock en C du sol actuel serait donc proche d'un état d'équilibre et l'apport moyen des systèmes de culture actuels permettrait de maintenir cet équilibre.

Le stock moyen en C des systèmes de culture conventionnel et AC, entre 2002 et 2011 sur le site expérimental a très peu évolué, soit 0,93 t C ha⁻¹ en neuf ans (Figure 24), ce qui est inférieur aux erreurs que l'on peut faire en termes d'échantillonnage et de mesure.

Cette simplification peut paraître abusive mais au-delà des différences du taux de minéralisation entre techniques AC et labour et du taux de minéralisation entre les biomasses aériennes, racinaires et fumier, c'est la quantité de carbone apportée qui est déterminante dans

la dynamique du carbone à moyen terme. Nous connaissons avec précision les quantités de biomasses aériennes produites et laissées sur la parcelle (Chapitre 4) et les quantités de fumier apportées et leur teneur moyenne en C. Nous avons pu également estimer avec une bonne précision l'apport en C par les racines dans les 30 premiers cm du sol à partir des équations calibrées dans le Chapitre 3. De plus comme expliqué dans la partie matériels et méthode, la particularité du sol andique sur la protection de la matière organique (Yasuhito et al., 2004) a bien été prise en compte. Le résultat de simulation du stock en C du sol est satisfaisant, parce que par rapport au stock en C initial de $105,5 \text{ t C ha}^{-1}$ en 2002, Roth C prédit une diminution du stock en C du sol à $103,8 \text{ t C ha}^{-1}$ après 8 ans, ce qui est très proche de la valeur mesurée en 2011 ($104,7 \text{ t C ha}^{-1}$).

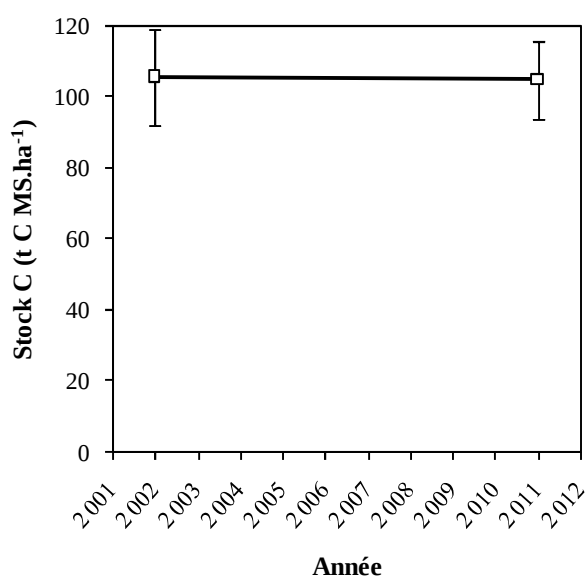


Figure 24 : Stock moyen de carbone du sol entre 2002 à 2011

3.2 Différence d'évolution du stock en fonction des systèmes de culture et des apports

La simulation étant satisfaisante avec le système de culture moyen appliqué sur 9 ans. Nous avons cherché si nous pouvions distinguer de manière plus précise l'effet des systèmes de culture (AC ou labour) et les différentes sources de matière organique (biomasse aérienne, racinaire et fumier) en termes d'apport de carbone.

Pourtant, il est difficile de distinguer un effet clair du système de culture (ie travail du sol ou AC x type de plante installée x quantité de biomasse apportée) ou de la fertilisation sur l'évolution du stock en C du sol entre 2002 et 2011 (Figure 25). En effet, le delta stock en C du sol mesuré entre 2002 et 2011 varie de -19 à $+15 \text{ t C ha}^{-1}$ sur des parcelles labourées et entre -15 et $+17 \text{ t C ha}^{-1}$ sur des parcelles en AC. Aucune différence du stock en C du sol n'a été trouvée entre les systèmes en AC et en labour. Cela peut être dû à : (1) la teneur très élevée en argile du sol étudié, ce qui entraîne une très forte protection de la matière organique

du sol contre la minéralisation, grâce à son adsorption sur les fractions fines du sol (Mathew et al., 2016; Ouédraogo et al., 2006; Six et al., 2002). Les parcelles expérimentales utilisées sont de texture argileuse avec une teneur en argile élevée qui atteint 62% à 70% dans les profondeurs 0-10 et 20-30 cm (Razafimbelo et al., 2006). (Barbera et al., 2012) ont également présenté des stocks en C du sol très proches sous systèmes en AC et en labour en Italie ; (2) de forte quantité de carbone dans le sol à état initial, en effet lorsque le stock de C du sol est élevé, la restitution de résidus sur la parcelle n'affecte plus le stock de C du sol (Hooker et al., 2005). De même en considérant la quantité de carbone apportée dans le sol par le fumier et la biomasse aérienne qui ont été mesurés et par la biomasse racinaire qui a été estimée, nous ne retrouvons pas la relation à laquelle nous nous attendions (Figure 26). Il n'y a pas de relation nette entre l'apport en C par les biomasses végétale et animale et le stock de C du sol, les R^2 sont très faibles 0,07 et 0,09 respectivement pour les parcelles en AC et en labour. Cette faible relation peut être induite par la saturation du sol à stocker le carbone (Six et al., 2002). (Campbell et al., 1991) ont considéré par exemple qu'un stock en C du sol de l'ordre de 64 t C ha⁻¹ dans les horizons 0-15 cm est élevé. Or, le stock de C mesuré sur nos parcelles d'expérimentation est en moyenne 75 t C ha⁻¹ (n = 288) dans les 20 premiers cm de profondeur.

Sur la base des mesures à 8 ans d'intervalle (2002 à 2011) et du nombre de parcelles échantillonnées (n = 85), nous n'avons pas les éléments qui nous permettaient de distinguer un taux d'humification et de minéralisation suivant les types d'apports de matière organique et les différentes gestions du sol. Nous avons décidé ainsi de calculer un taux d'humification et de minéralisation moyen pour tous les systèmes de culture. En regroupant ces différentes sources de carbone du sol, il n'est plus vraiment nécessaire d'utiliser un modèle comme Roth C, qui considère plusieurs compartiments de carbone dans le sol et plusieurs coefficients d'humification en fonction de ces types d'apport de C. Nous avons poursuivi la simulation de l'évolution du carbone du sol en utilisant le modèle Hénin&Dupuis et en déterminant les coefficients d'humification k_1 et de minéralisation k_2 (Tableau 15).

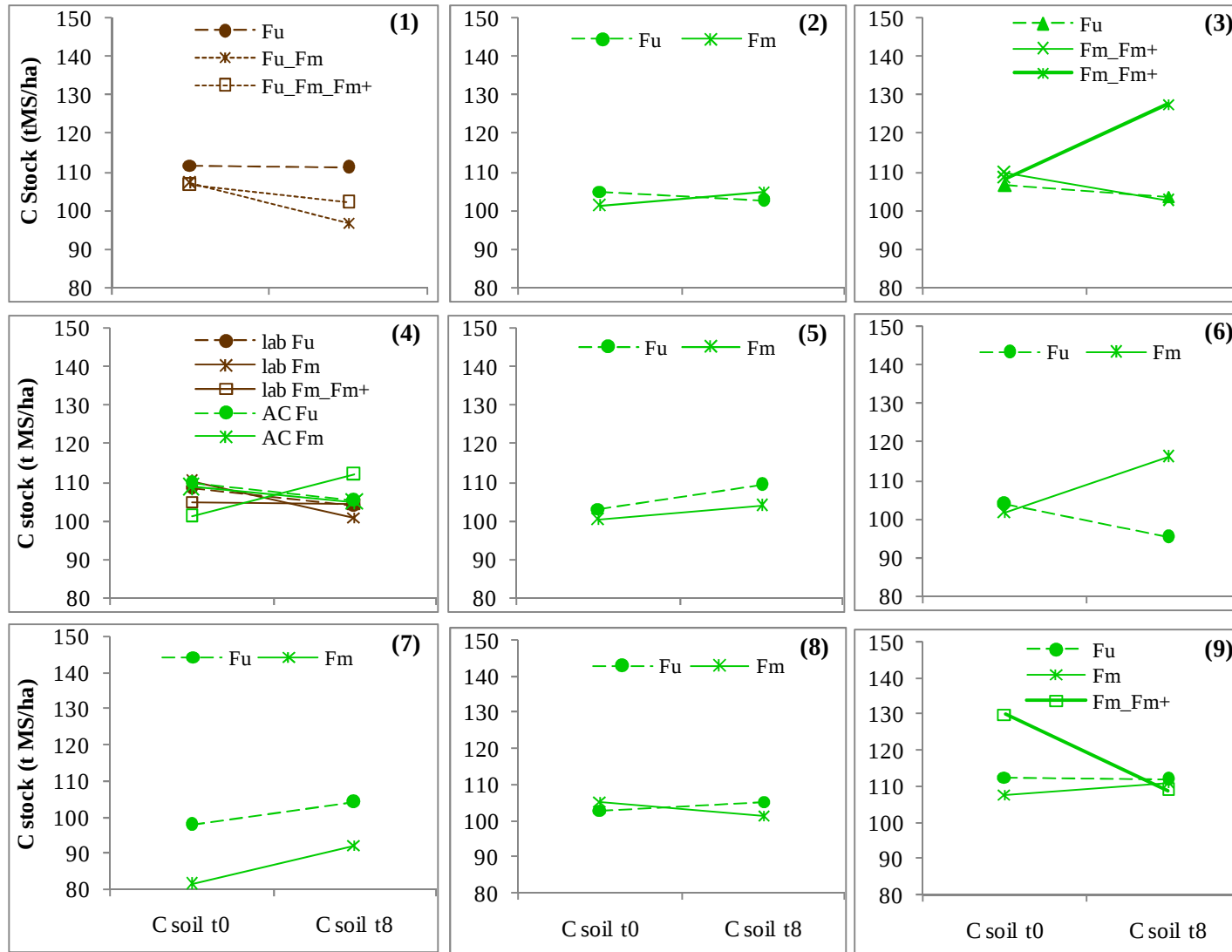


Figure 25 : Stock de carbone du sol dans 0-30 cm en 2002 et en 2011, en milieu contrôlé sous système de culture : (1) Rp//S3, (2) R1, (3) R1//S2, (4) T1//S1, (5) R2, (6) R2//S3, (7) R3, (8) R3//S3, (9) R4//S3, avec Rp = riz//maïs+haricot, R1 = riz//avoine/haricot+ray grass, R2 = riz//haricot/eleusine+vesce, R3 = riz//maïs+brachiaria, R4 = riz//maïs+soja/vesce et T1 = riz//haricot/avoine+vesce sont les systèmes en 2002 à 2008 ; et S1 = riz//maïs+haricot/avoine, S2 = riz//maïs+eleusine et S3 = riz//maïs+soja/radis sont les systèmes utilisées à partir de 2009 à 2011.

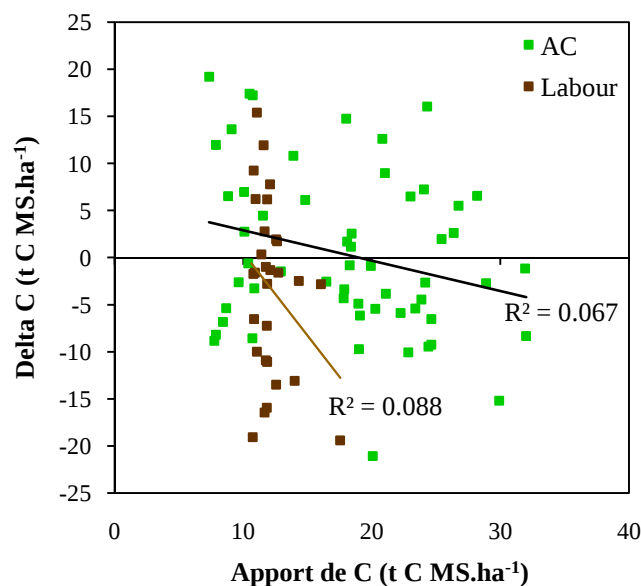


Figure 26 : Relation entre l’apport de carbone par les biomasses agricoles et le stock de carbone du sol dans 0-30 cm à partir de 2002 jusqu’en 2011

Tableau 15 : Valeurs de coefficient d’humification k_1 et de minéralisation k_2 utilisé dans le modèle Hénin&Dupuis et les caractéristiques statistiques *Nash efficiency* (NE) et erreurs (RMSE) du modèle obtenu avec ces coefficients

	Coefficients		Analyses statistiques	
	k_1	k_2	NE	RMSE (%)
Biomasses aérienne et racinaire, Fumier	0,437	0,009	-	-
Cross validation des paramètres de modélisation				
AC et labour confondus	-	-	0,58	5,64

L’utilisation de ce coefficient de minéralisation k_2 moyen obtenu en moyennant les systèmes de culture AC et labour sur-estime et sous-estime la minéralisation des matières organiques en AC et en labour, respectivement. Le carbone réellement stocké est donc supérieur en AC et est inférieur en labour à celui obtenu avec la simulation. En effet, le taux de minéralisation de carbone du sol est plus faible en AC qu’en labour ; (Balesdent et al., 1990) ont trouvé par exemple une valeur de k_2 0,008 en semis direct ou AC. La teneur en macro-agrégats est plus élevée sous AC que sous labour (Razafimbelo et al., 2006) et le C dans ces agrégats est protégé contre la minéralisation par des activités limitées des micro-organismes (Jia et al., 2015 ; Kong et al., 2005).

Il en est de même également pour l’utilisation du coefficient d’humification k_1 moyen pour les trois sources de matière organique. Le k_1 moyen obtenu (0,44) est plus élevé que celui trouvé pour les biomasses aériennes seulement. Kintche (2011) a trouvé par exemple un k_1 0,24 au Togo sous culture de coton/sorgho/maïs-dolique ; une valeur proche de celle de 0,23 sous culture de maïs/soja trouvée par Razafimbelo (2005) sur les Hautes Terres à Madagascar. Par

contre, la biomasse racinaire et le fumier ont un taux d'humification plus important que la biomasse végétale aérienne (Mazzilli et al. 2015). A titre d'exemple, Kätterer et al. (2011) ont montré que l'humification des racines est 2,3 fois plus importante que celle de la biomasse aérienne ; Janssen (1984) a trouvé un k_l de fumier de 0,60, qui est supérieur également au k_l moyen obtenu (0,44). Par conséquent, l'apport en carbone des traitements dont la source de matière organique du sol est constituée par des racines et du fumier (cas d'une exportation totale de la biomasse végétale aérienne pour les animaux) est sous estimé en simulant le carbone du sol avec ce coefficient k_l moyen. A l'inverse, il est sur estimé dans le cas de système de culture basé sur un apport important de carbone par les biomasses aériennes.

3.3 Simulation de l'évolution du stock de C du sol des parcelles paysannes

2.2.22 Fréquence du stock de C des parcelles paysannes

Le stock en C du sol des parcelles paysannes est très varié (Figure 27), allant de 30 à 220 t C ha⁻¹, avec une moyenne de $96,3 \pm 56$ t C ha⁻¹ dans les 30 premiers cm de profondeur. Ce stock moyen est de l'ordre de 70,8 t C ha⁻¹ (51 à 96 t C ha⁻¹, n = 12) sur les parcelles autour d'Andranomanelatra et d'Antsirabe ; et est significativement élevé dans la zone de Betafo, soit 168,9 t C ha⁻¹ (n = 5). Ces parcelles à Betafo sont situées sur des bas-fonds, de texture argileuse et de propriété andique (observation personnelle). Ces caractéristiques du sol peuvent être l'origine du stock en C du sol plus important (Razafimbelo et al. 2006) dans la zone de Betafo que dans la zone d'Andranomanelatra-Antsirabe. A l'exception de deux des parcelles situées à Betafo qui ont un stock en C du sol très faible, de l'ordre de 30 t C ha⁻¹ sur 0-30 cm. Ces parcelles sont de texture sableuse (observation personnelle) et Blanchart et al. (2005) ont montré que les sols sableux sont pauvres en carbone organique du sol. De plus, ces parcelles sont vulnérables à l'érosion de par leur texture et leur position sur le terroir agricole (communication et observation personnelle).

Dans l'objectif de mieux considérer cette variation du stock en C du sol des parcelles paysannes, la simulation de l'évolution du stock en C du sol sera effectuée avec un stock initial allant de 60 à 160 t C ha⁻¹.

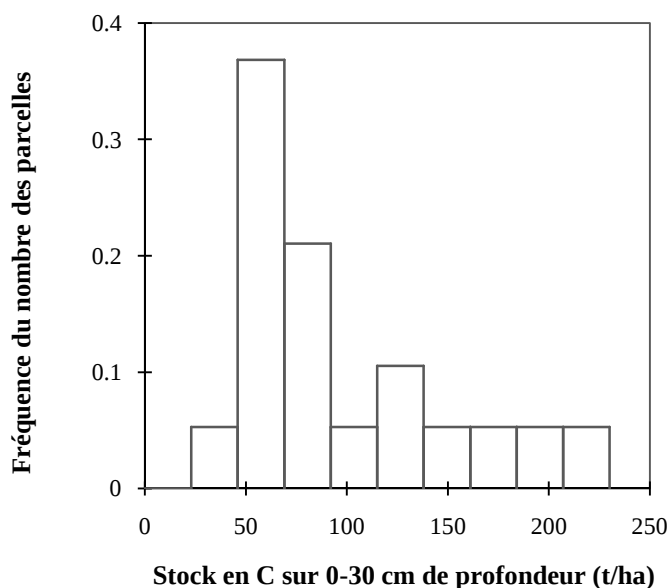


Figure 27 : Variation du stock de carbone initial dans le sol sur des parcelles paysannes (n=19)

2.2.23 Simulation de l'évolution du stock de C sur 20 ans

Le stock en C du sol varie suivant la quantité du carbone dans le sol à l'état initial et la quantité de carbone restituée dans le sol (Kong et al., 2005) (Figure 28).

Avec le système R/M+C, le stock en C du sol augmente quel que soit la quantité de biomasse végétale exportée de la parcelle, si le stock en C du sol initial ne dépasse pas 150 t C ha^{-1} (Figure 28.1). Cette augmentation peut atteindre jusqu'à 25 t C ha^{-1} en 20 ans avec un stock initial de 60 t C ha^{-1} et aucune exportation de la biomasse végétale, soit un stockage annuel de $1,25 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Cette valeur est plus élevée que d'autres rapportées dans différentes études (Schuman et al., 2002 ; Zhang et al., 2016). Razafimbelo et al. (2006) ont obtenu par exemple un stockage annuel de C de $1,01 \text{ t C ha}^{-1}$ en AC. Ce stockage annuel élevé trouvé avec ce système peut être le résultat d'une sur-estimation de carbone humifié provenant des biomasses végétales aériennes, en effet le système R/M+C est un système à forte production de biomasse végétale (crotalaire) atteignant $9,9 \text{ t C ha}^{-1}$ (Chapitre 4). Le stock en C est maintenu à l'équilibre si le stock initial est à 160 t C ha^{-1} et que 89% des biomasses végétales servant dans l'alimentation animale sont exportées pour les animaux (Figure 29.1). Au-delà de cette quantité de biomasse aérienne exportée, le stock en C du sol diminue et peut aller jusqu'à -1 t C ha^{-1} si la totalité de cette biomasse exportable pour les animaux est enlevée de la parcelle, ce qui est l'équivalent de $2,7 \text{ t MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ en terme de quantité ou de $114 \text{ kg PDI ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ en terme de protéine.

Avec le système R/A+V, une augmentation du stock en C du sol de $8,8 \text{ t C ha}^{-1}$ a été enregistrée avec un stock initial de 60 t C ha^{-1} et sans exportation de la biomasse végétale aérienne (Figure 28.2). Mais à partir d'un stock initial de 120 t C ha^{-1} , il diminue même si la totalité des résidus de récolte est restituée sur la parcelle. Cette diminution peut atteindre de -

17,6 t C ha⁻¹ si le stock initial est de 160 t C ha⁻¹ et si toute la biomasse aérienne obtenue à la récolte, de 3,4 t MS ha⁻¹ an⁻¹, est exportée pour fournir 189 kg PDI ha⁻¹ an⁻¹ pour l'alimentation animale. Si les stocks en C initiaux sont de 110 à 60 t C ha⁻¹, il y a également une diminution du stock en C du sol après 20 ans de culture de R//A+V, si les taux d'exportation de la biomasse aérienne augmentent respectivement de 10 à 90%. Pourtant, le système peut à la fois maintenir ce stock à l'équilibre au bout de 20 ans avec un stock initial de 60 t C ha⁻¹ et alimenter les animaux avec 3,1 t MS ha⁻¹ an⁻¹ ou 177 kg PDI ha⁻¹ an⁻¹ (90% des biomasses aériennes exportées). Mais à partir de ce stock initial de 60 t C ha⁻¹, il faut diminuer le taux d'exportation de la biomasse végétale de 17% à chaque augmentation de 10 t C ha⁻¹ du stock initial, jusqu'à une limite de 110 t C ha⁻¹, pour que le stock en C du sol soit maintenu en équilibre en 20 ans (Figure 29.2).

Avec le système R//M+H, avec une restitution maximale de biomasse végétale sur la parcelle et un faible stock initial en C du sol (60 t C ha⁻¹), le stock en C du sol augmente de 11,7 t C ha⁻¹ en 20 ans (Figure 28.3). Il diminue toujours si ce stock initial dépasse 140 t C ha⁻¹ et cette diminution peut aller jusqu'à -17,7 t C ha⁻¹ dans le cas où le stock de C initial atteint 160 t C ha⁻¹ et 100% de biomasse végétale est exportée pour les animaux, ce qui équivaut à une quantité de 3,6 t MS ha⁻¹ an⁻¹ ou en protéine de 157 kg PDI ha⁻¹ an⁻¹. Le stock de C initial dans le sol est maintenu en 20 ans si la quantité de C initial dans le sol est de 60 t C ha⁻¹ et la biomasse végétale exportée ne dépasse pas 91%, *ie* avec ce taux de C initial on peut exporter au maximum 3,3 t MS ha⁻¹ an⁻¹ ou 142 kg PDI ha⁻¹ an⁻¹ pour les animaux sans diminuer le stock de C dans le sol (Figure 29.3). Pour maintenir cet équilibre avec un stock initial supérieur à 60 t C ha⁻¹, à chaque augmentation de 10 t C ha⁻¹ du stock de C initial, il faut diminuer le taux d'exportation de biomasse végétale aérienne de 13%. Ce stock de C initial peut être maintenu 20 ans seulement s'il ne dépasse pas 130 t C ha⁻¹.

Dans les conditions de faible stock en C initial (60 t C ha⁻¹) et forte restitution de la biomasse sur la parcelle (0% exportation de la biomasse végétale), l'augmentation du stock en C du sol après 20 ans de culture riz//maïs+crotalaire est 54% et 65% plus élevée que celle sous culture riz//maïs+haricot et riz//avoine, respectivement. Ce résultat est dû au fait que la crotalaire fortement produite avec le système R//M+C, est utilisée seulement comme couverture du sol et non pour l'alimentation des animaux, donc comme une source de matière organique pour le sol. De plus, les biomasses racinaires avec le système R//M+C sont plus importantes (2,1 t MS ha⁻¹ et sur 2 ans) que celles produites avec les systèmes R//A+V et R//M+H (Chapitre 3). Par conséquent une exportation totale de la biomasse végétale pour l'alimentation animale diffère par la quantité et la qualité de biomasse exportée suivant les systèmes de culture utilisés. Pour un taux de 100% de biomasse végétale exportée, la quantité est de l'ordre de 2,7, 3,4 et 3,6 t MS ha⁻¹ pour R//M+C, R//A+V et R//M+H, respectivement. En terme d'équivalence en protéine, le système R//M+C produit moins en comparaison avec R//M+H,

qui fournit une quantité de protéine plus faible que le système R//A+V, même si la quantité de biomasse végétale produite est très proche pour ces deux derniers systèmes. Cela est expliqué par la teneur plus élevée en protéine de l'avoine vert, soit deux fois plus que celle mesurée sur la paille, dans le système R//A+V (Chapitre 6, résultat d'analyse spectrale).

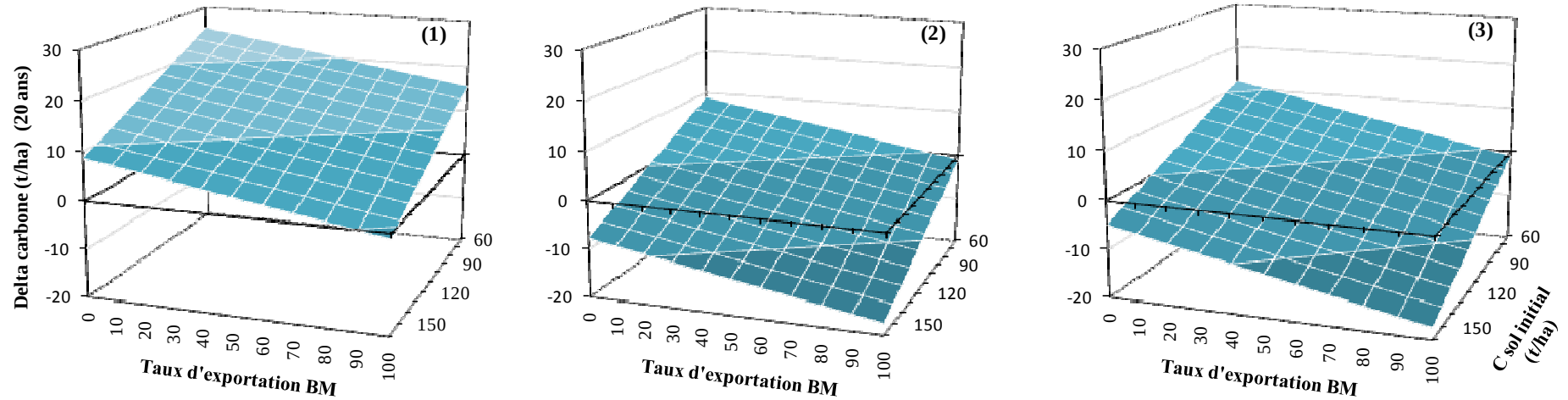


Figure 28 : Différence du stock de carbone du sol pendant 20 ans de culture de (1) riz//maïs+ crotalaire, en milieu contrôlé ; (2) riz//avoine+vesce et (3) riz//maïs + haricot, en milieu paysan, suivant les taux de couverture du sol et la variation du stock de carbone au temps initial

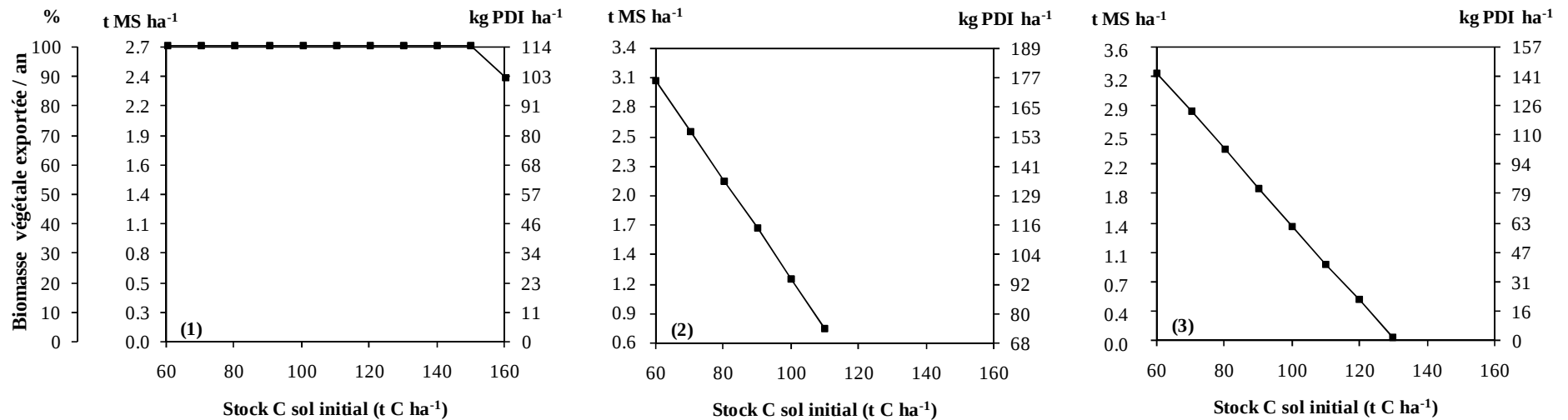


Figure 29 : Quantité et qualité des biomasses végétales annuellement exportables pour maintenir le stock C du sol initial à l'équilibre pendant 20 ans de culture de (1) riz//maïs+ crotalaire en milieu contrôlé, (2) riz//avoine+vesce et (3) riz//maïs+haricot en milieu paysan

4 Conclusion

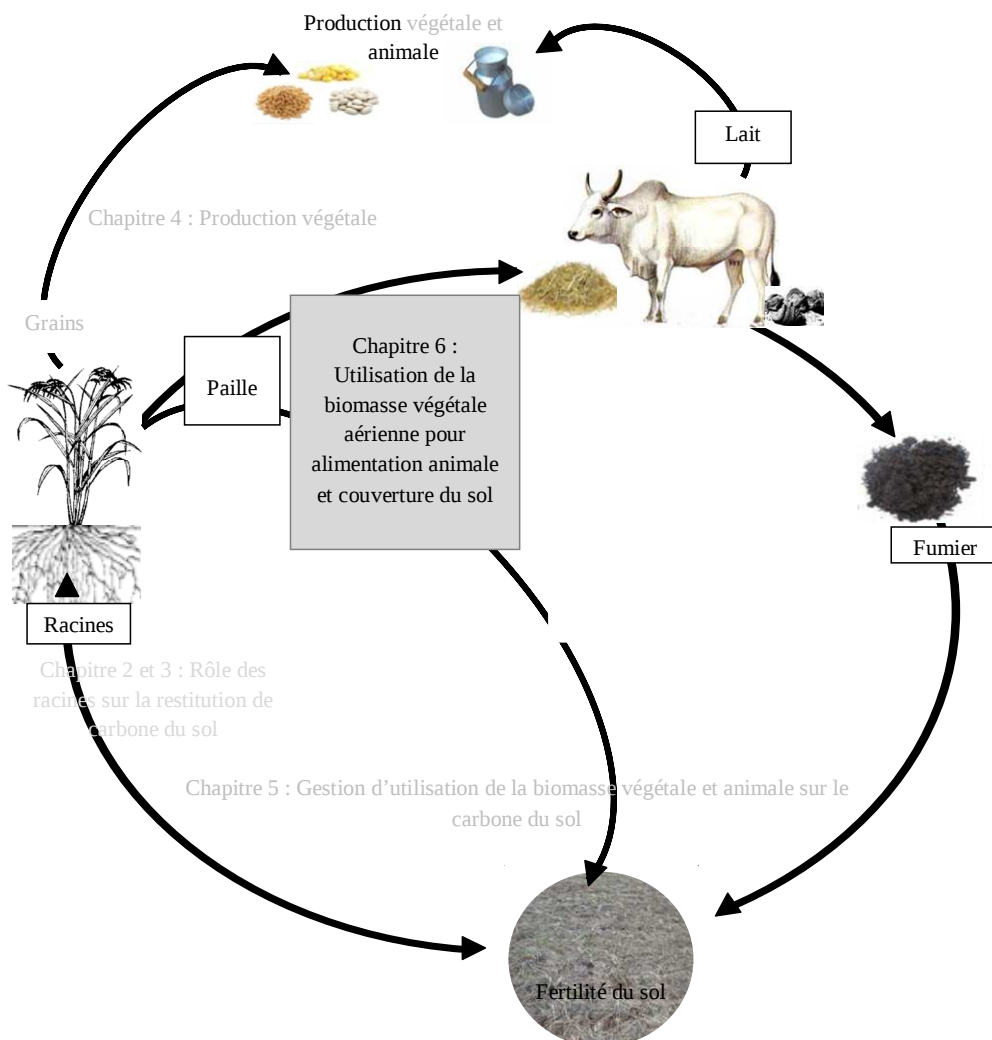
Les stocks en C du sol mesurés pendant 8 ans sur des cultures en AC et en labour ne diffèrent pas significativement, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'effet net du système de culture sur le carbone dans le sol. De même, il n'y a pas de relation claire entre la différence du stock en C du sol entre 2002 et 2011 et l'apport en carbone dans le sol pendant ces huit ans par les biomasses végétales (biomasse aérienne et racinaire) et biomasses animales (fumier). Il en est de même également pour les différentes sources de matière organique du sol, les données collectées pendant les huit ans d'essai ($n = 85$) ne nous ont pas permis de distinguer le taux d'humification suivant ces trois sources de C du sol. Par conséquent, la simulation de la dynamique de C du sol a été effectuée sur des systèmes de culture confondus en regroupant les différents types d'apport de C dans le sol, avec l'utilisation d'un modèle monocompartimental Hénin&Dupuis. Elle a été faite suivant différents niveaux de stock initial de C, qui jouent également sur le stock final de C. Le stock de C simulé avec le coefficient de minéralisation 0,009 obtenu, est probablement inférieur en labour, et supérieur en AC, car le taux de minéralisation de C en labour est plus fort que celui en AC. Le coefficient d'humification moyen qui est égal à 0,44 est sûrement supérieur à celui de la biomasse aérienne et inférieur à celui de la biomasse racinaire et du fumier. Le stock de C simulé avec ce coefficient k_1 moyen est alors sous-estimé dans le cas de traitements dont les sources de C du sol sont basées majoritairement sur les racines et le fumier. A l'inverse, il est sur-estimé si le système produit beaucoup plus de biomasse aérienne utilisée comme apport de C (cas de système R//M+C). Le stock en C simulé avec un stock initial de 60 t C ha^{-1} et sans exportation de la biomasse végétale aérienne en 20 ans sous culture de R//M+C, augmente de 25 t C ha^{-1} , soit 2 et 3 fois plus respectivement que l'augmentation du stock en C du sol avec R//M+H et R//A+V dans les mêmes conditions. Le système R//M+C permet de maintenir le C stocké dans le sol en équilibre sauf si le stock initial est supérieur à 160 t C ha^{-1} et le taux d'exportation de la biomasse végétale pour l'alimentation animale dépasse les 89%. Les systèmes R//A+V et R//M+H peuvent maintenir également l'équilibre avec un stock en C initial de 60 t C ha^{-1} et des taux d'exportation de la biomasse exportable pour les animaux de l'ordre de 90 et 91 % respectivement. A partir de cette valeur de stock en C initial (60 t C ha^{-1}) et à chaque augmentation de 10 t C ha^{-1} de ce stock, l'équilibre du stock en C du sol peut être aussi maintenue si la quantité de la biomasse aérienne exportée pour l'animal diminue de 17% de celle produite avec R//A+V et de 13% de celle produite avec R//M+H jusqu'à des limites respectives de 110 et 130 t C ha^{-1} du stock en C initial.

Une exportation totale de la biomasse végétale consommable par l'animal correspond à des quantités respectivement différentes : 2,7, 3,4 et $3,6 \text{ t MS ha}^{-1}$ pour R//M+C, R//A+V et R//M+H. L'équivalence en protéine de ces quantités totales exportées est plus élevée avec R//A+V ($189 \text{ kg PDI ha}^{-1}$), diminue à $157 \text{ kg PDI ha}^{-1}$ avec R//M+H et est encore plus faible

avec R/M+C (114 kg PDI ha⁻¹). La détermination de la qualité de la biomasse végétale aérienne produite nécessite d'être développée afin de mieux évaluer chaque système de culture suivant les options d'utilisation de cette biomasse dans la production animale et dans l'amélioration de la fertilité du sol via la restitution de l'azote et l'amélioration du stock en carbone organique dans le sol. Des mesures complémentaires de biomasse aérienne, racinaire de végétation naturelle située à côté de la parcelle d'expérimentation et qui n'a pas encore été exploitée, ainsi qu'une autre mesure spectrale de la teneur en C du sol des parcelles d'expérimentation pourraient enrichir nos données, dans l'objectif de prendre en compte la différence des taux d'humification de chaque type d'apport de C (biomasse aérienne, racines et fumure organique) et celle des taux de minéralisation des deux différents systèmes de culture qui influencent le stock en C du sol. L'étude de la saturation de carbone du sol sur notre parcelle d'expérimentation pourrait être également intéressante pour mieux comprendre la dynamique de carbone du sol.

Chapitre 6 :

Gestion de l'utilisation des biomasses végétale et animale : effets sur les flux d'azote dans une exploitation agricole



Résumé

L'une des raisons de faible adoption de l'agriculture de conservation (AC) est l'utilisation de la biomasse végétale aérienne comme fourrage pour nourrir les animaux. Cette partie vise à simuler le flux partiel d'azote dans une exploitation et estimer le lait produit suivant l'utilisation croissante de la biomasse végétale pour l'alimentation animale. Trois systèmes de culture pluviaux à différentes orientations ont été comparés : (1) riz suivi de l'association de maïs et crotalaire en AC (R//M+C), conduit en milieu contrôlé, (2) riz suivi de l'association de l'avoine et vesce en AC (R//A+V) et (3) riz suivi de l'association de maïs et haricot en labour (R//M+H), installés en milieu paysan. Toutes les cultures ont été fertilisées avec du fumier amélioré (27 g N kg⁻¹ MS, 5,5 g P kg⁻¹ MS). Nous avons pris comme hypothèse que l'alimentation des animaux n'est pas limitée en énergie. L'azote restituée au sol est plus élevée avec le système R//M+C (164 kg N ha⁻¹ an⁻¹) en comparant avec les systèmes R//A+V (42 kg N ha⁻¹ an⁻¹) et R//M+H (46 kg N ha⁻¹ an⁻¹). En équivalent d'urée, R//M+C permet un surplus économique de 530 kAr et 510 kAr ha⁻¹ an⁻¹ par rapport au R//A+V et R//M+H, respectivement. En contrepartie, le système R//A+V permet une production de lait plus importante, allant jusqu'à 3 640 l ha⁻¹ an⁻¹ en exportant la totalité de toutes les biomasses végétales consommable par les animaux. Cette production est respectivement 20% et 42% supérieure que celle obtenue avec R//M+H et R//M+C. Le système R//A+V est donc plus bénéfique que les deux autres systèmes avec un gain 620 kAr ha⁻¹ an⁻¹ que R//M+H et 1 350 kAr ha⁻¹ an⁻¹ que R//M+C. L'utilisation de la biomasse végétale pour l'alimentation animale est alors plus économique qu'en restituant l'azote au sol par la couverture du sol. Cependant, la considération de tous les avantages agronomiques (restitution d'azote au sol, maintien de carbone au sol, production en grain) et zootechniques (lait, fumier) est indispensable dans la décision sur l'utilisation de la biomasse végétale.

Mots clés : alimentation animale, restitution d'azote, lait, Hautes Terres, Madagascar

3 Introduction

L'agriculture de conservation (AC) telle que définie par la FAO (2015) peut présenter plusieurs avantages : (i) amélioration de la fertilité des sols par l'enrichissement en carbone organique (Scopel et al., 2005 ; Ussiri et Lal, 2009), (ii) infiltration d'eau dans le sol (Thierfelder et al., 2013), (iii) atténuation de l'érosion (Ghosh et al., 2015 ; Scopel et al., 2005) et par conséquent amélioration de la qualité physique et chimique du sol (Busari et al., 2015), (iv) augmentation des rendements agricoles (Bruelle et al., 2015 ; Naudin et al., 2010 ; Zheng et al., 2014) et (v) réduction de l'émission des gaz à effet de serre (Ussiri et Lal, 2009). L'introduction de ce système d'agriculture à Madagascar date des années 1990. Les premiers essais ont été réalisés dans la région de Vakinankaratra par l'ONG TAFA (Tany sy

Fampandrosoana). Pourtant, l'adoption des systèmes en AC sur les Hautes Terres de Vakinankaratra reste faible (communication personnelle, Penot et Gaelle, 2011). Dans cette région l'élevage de vaches laitières constitue l'une des sources de revenu importante des exploitants (Rasambainarivo et Ranaivoarivelo, 2006). Une des raisons qui pourrait justifier cette faible adoption serait l'utilisation importante de la biomasse aérienne des cultures et des plantes de couvertures comme fourrage pour nourrir le troupeau laitier. En effet cette valorisation de la biomasse via l'animal permet un retour économique plus rapide et plus visible que via l'amélioration de la fertilité du sol (Andriarimalala et al., 2013).

Divers travaux ont étudié les compromis qui peuvent exister entre les activités d'agriculture et d'élevage au sein des exploitations mixtes (Andriarimalala et al., 2013 ; Castellanos-Navarrete et al., 2015 ; Baudron et al., 2015 ; Erenstein et al., 2015 ; Naudin et al., 2015 ; Dugué, 2017). Andriarimalala et al. (2013) ont trouvé par exemple des intérêts économiques dans l'intégration de l'agriculture en AC et l'élevage bovin dans la région d'Alaotra à Madagascar. Les animaux bénéficient de la biomasse végétale produite par l'agriculture (Naudin et al., 2015) mais ils fournissent également des engrais organiques. Le fumier représente la source fertilisante la plus utilisée par les paysans malgaches à cause du prix élevé des engrais minéraux. Toutefois, la qualité de 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 ; Smith et al., 2009 ; Andriarimalala et al., 2013 ; Salgado et al., 2014).

Dans le cadre de cette thèse nous avons quantifié les compromis entre l'utilisation de la biomasse aérienne végétative des systèmes de culture pour couvrir le sol en AC ou pour nourrir les animaux et produire du fumier. Les objectifs de cette étude sont donc de : (1) simuler les flux d'azote allant de la parcelle des cultures à l'étable des animaux, puis au fumier avant de retourner à la parcelle, et (2) estimer la production de lait potentiellement obtenue en utilisant une quantité croissante de la biomasse végétale pour alimenter des vaches laitières. La comparaison a été effectuée sur trois systèmes de culture à base de riz pluvial qui diffèrent par les cultures en rotation. Cette étude s'est focalisée sur l'azote, élément indispensable pour l'agriculture, qui contribue au développement des plantes (Singh et al., 2016), améliore le rendement et la qualité de la production agricole (Malhi et al., 2006 ; Haque et al., 2007 ; Amin, 2011 ; Singh et al., 2016) mais qui est également indispensable pour la production laitière (Van der Hoek, 1998).

4 Matériel et méthodes

4.1 Site et étude expérimentaux

L'expérimentation a été menée pendant deux ans (2013 à 2015) sur un dispositif expérimental situé à Andranomanelatra, au nord-est d'Antsirabe (19°47'S, 47°06'E, 1 640 m) et sur des parcelles paysannes autour d'Andranomanelatra et de Betafo, au sud-ouest d'Antsirabe (19°53'S, 46°54'E, 1 542 m). La région est caractérisée par un climat tropical d'altitude avec deux saisons distinctes : une saison chaude et humide, de novembre à avril, avec une température moyenne de 19°C et une saison sèche et fraîche de mai à octobre avec une température moyenne de 14°C et qui peut descendre à 6°C. Les pluviométries annuelles ont été respectivement de 1 307 mm et 1 563 mm en 2013-2014 et 2014-2015 avec des périodes pluvieuses fortement concentrées pendant les mois de décembre à février (Station CIMEL FOFIFA/CIRAD Andranomanelatra).

En milieu contrôlé, trois systèmes de culture ont été installés : (1) riz pluvial (*Oryza sativa*), variété Chhomrong dhan, suivi de l'association maïs (*Zea mays*), variété Tombontsoa et crotalaire (*Crotalaria grahamiana*) (R//M+C), en AC, (2) riz pluvial suivi de l'association d'avoine (*Avena sativa*), variété Fanantenana, et vesce (*Vicia vilosa*), variété Mahavokatra (R//A+V), en AC ; et (3) riz pluvial suivi de l'association maïs et haricot (*Phaseolus vulgaris*), variété RI 5-2 (R//M+H), en labour. Pour cette partie de l'étude sur les flux d'azote, les données du système de culture R//M+C en AC installé en milieu contrôlé, et celles des deux systèmes de culture installés en milieu paysan : R//A+V en AC et R//M+H en labour, ont été utilisées. En fait, le système de culture R//M+C n'avait pas été conduit en milieu paysan. Cependant, le chapitre 4 du document de thèse a montré que les deux systèmes en commun entre milieu contrôlé et milieu paysan les rendements des cultures des systèmes R//A+V et R//M+H se répartissaient dans la même gamme de variabilité. Nous faisons donc l'hypothèse qu'il en aurait été de même pour le système R//M+C.

Quatre types de fertilisation ont été comparés à l'intérieur de chaque système de culture mais seules les données issues des parcelles fertilisées avec 5 t ha⁻¹ du fumier amélioré sont traitées dans ce chapitre. Le fumier amélioré (FuA) correspond à un type de fumier qui contient plus de nutriments que le fumier de ferme traditionnel (FuC) : 27 g N kg⁻¹ MS et 5,5 g P kg⁻¹ MS dans FuA contre 13 g N kg⁻¹ MS et 3,6 g P kg⁻¹ MS dans FuC. Cette teneur plus élevée d'éléments fertilisants dans le FuA est obtenue grâce à l'amélioration des pratiques de gestion et de conservation du fumier, depuis l'étable des animaux jusqu'au lieu de stockage du fumier, de manière à limiter les pertes de nutriments par volatilisation, lessivage et/ou lixiviation.

Les densités de semis théoriques ont été respectivement de 25 000, 30 000, 50 000, 75 000, 200 000 et 250 000 plants ha⁻¹ pour le maïs, la vesce, crotalaire, le haricot, l'avoine et le riz. Il

faut toutefois signaler que la vesce ne s'est jamais développée dans nos conditions expérimentales, dans aucune des deux années, ni en milieu paysan ni en milieu contrôlé.

4.2 Calcul de flux d'azote

Le flux d'azote pour chaque système de culture a été simulé suivant trois options d'utilisation de la biomasse végétale aérienne consommable par les animaux : (i) en restituant toutes les biomasses sur la parcelle comme couverture du sol, (ii) en restituant 50% des biomasses sur la parcelle et en exportant l'autre moitié pour l'alimentation animale, et (iii) en exportant la totalité de ces biomasses pour l'alimentation animale. Pour le système R//A+V, la biomasse d'avoine à la première coupe est toujours exportée pour les animaux parce qu'il s'agit d'un fourrage destinée exclusivement à l'alimentation animale. La simulation a été faite sur 1 ha de système de culture, c'est-à-dire avec un ½ ha de riz et ½ ha des cultures en rotation (cultures associées) suivant les systèmes considérés.

Les mesures effectuées concernent le rendement en grain, biomasse végétale aérienne (Chapitre 4) et racinaire (Chapitre 3) de chaque culture étudiée (§2.2.1) suivi des analyses spectrales (dans le proche infrarouge) des échantillons de chaque type de biomasse aérienne et grain avec un spectromètre (LabSpec 4, ASD Inc.) (§2.2.2) et des analyses CHN pour les racines (Chapitre 3). Ces analyses permettent de déterminer la teneur en N de chaque type de biomasse afin de déterminer le flux de N obtenu par chaque système de culture et par type de biomasse (grain, paille et fourrage vert, racines) (Figure 30). Les teneurs en protéine, fibre, lignine, cendres et cellulose brute des fourrages ont permis de calculer la teneur en protéine digestible dans l'intestin (PDI) utilisé pour estimer la quantité de lait produit par les vaches laitières (§2.2.3) en fonction du système de culture. Puis, en fonction des niveaux d'exportation de biomasse végétale aérienne pour les animaux et des quantités d'azote exportée par les grains produits, la quantité d'azote retournée sur la parcelle par la restitution de toutes les racines, de la biomasse aérienne non utilisée par les animaux et par l'apport du fumier (Figure 30.1, Figure 30.2, Figure 30.3, Figure 30.4) a été obtenue.

Pour ce qui concerne l'utilisation des biomasses par les animaux, nous avons pris comme hypothèse que :

- 10% des biomasses distribuées aux animaux sont rejetées et considérées comme refus alimentaires (Figure 30.2a) et ne sont donc pas consommées par les animaux. En revanche ces refus alimentaires se retrouvent dans la litière, ils sont donc recyclés au niveau du système de production via l'utilisation du fumier.
- l'alimentation des animaux n'était pas limitée par la quantité d'énergie et que les animaux étaient en période de lactation. Cependant, une partie de l'azote ingéré par les

animaux est excrétée via les fèces et les urines et ne se retrouve pas dans le lait (Figure 30.2c). Les excréments animaux (fèces et urines) mélangés avec les refus alimentaires constituent le fumier. Ce fumier subit en général des pertes en azote par volatilisation et lessivage pendant le stockage et entre la sortie de l'étape de stockage et l'utilisation sur la parcelle (Figure 30.2ac. 1, Figure 30.2ac. 2) (§2.2.4). Le N conservé dans le fumier est finalement restitué sur la parcelle (Figure 30.2ac.3). Les pourcentages de perte en azote lors des étapes de conservation et d'utilisation du fumier proviennent de mesures effectuées précédemment (Salgado et al., 2014).

Les calculs de la production laitière ont été réalisés en utilisant la quantité de protéine prédite par l'analyse SPIR (Figure 30.2b).

Nous avons pris comme hypothèse que l'alimentation des animaux n'était pas limitée par la quantité d'énergie et que les animaux étaient en période de lactation. Cependant, une partie de l'azote ingéré par les animaux est excrétée via les fèces et les urines et ne se retrouve pas dans le lait (Figure 30.2c). Les excréments animaux (fèces et urines) mélangés avec les refus alimentaires constituent le fumier. Ce fumier subit en général des pertes en azote par volatilisation et lessivage pendant le stockage et entre la sortie de l'étape de stockage et l'utilisation sur la parcelle (Figure 30.2ac. 1, Figure 30.2ac. 2) (§2.2.4). Le N conservé dans le fumier est finalement restitué sur la parcelle (Figure 30.2ac.3). Les pourcentages de perte en azote lors des étapes de conservation et d'utilisation du fumier proviennent de mesures effectuées précédemment (Salgado et al., 2014).

Le Tableau 16 synthétise les données utilisées pour le calcul des flux de N au sein de l'exploitation agriculture-élevage (vaches laitières).

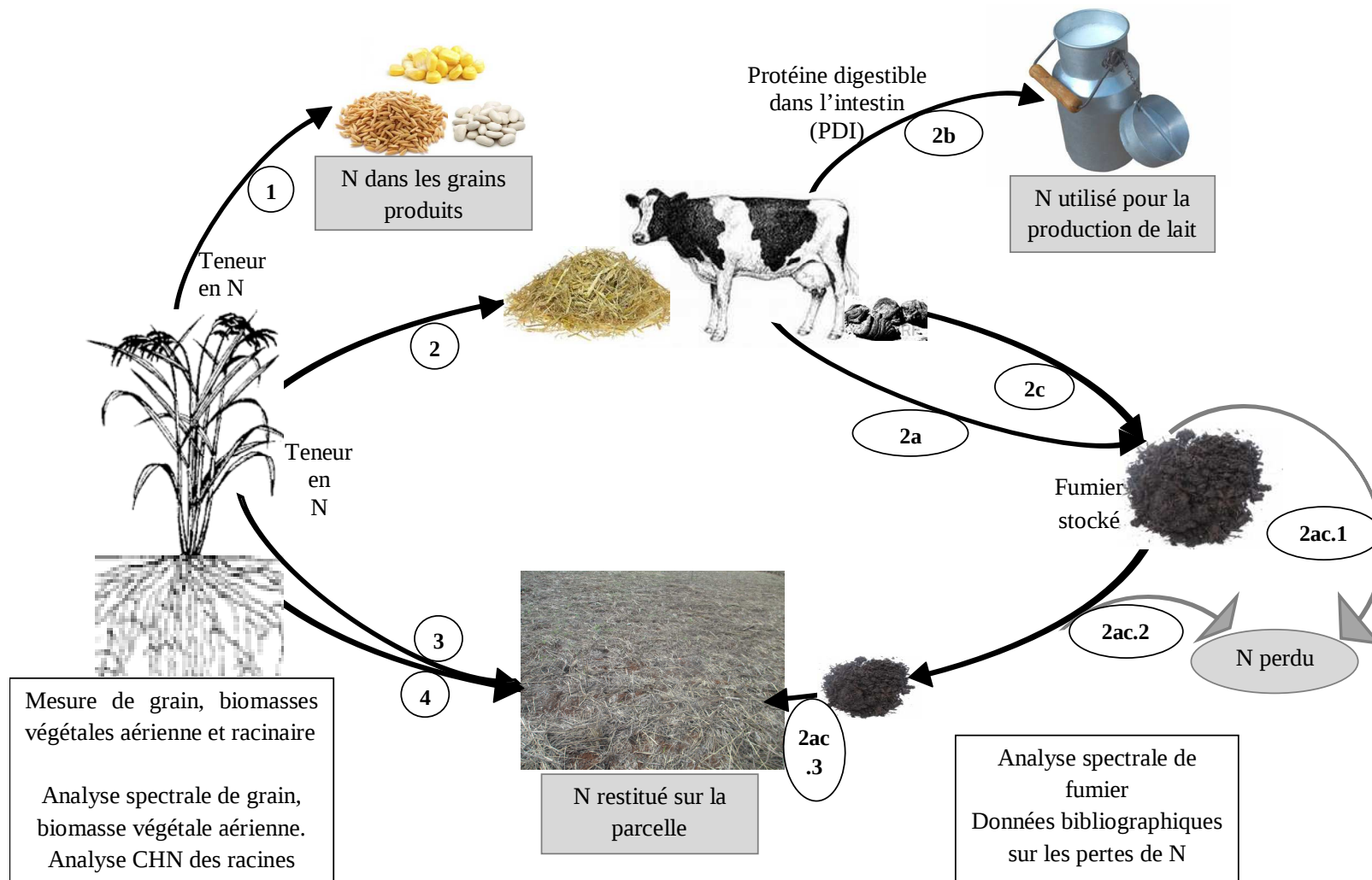


Figure 30 : Flux partiels d'azote dans une exploitation mixte agriculture et élevage : de la parcelle vers (1) la production en grain, (2) l'alimentation animale par la biomasse végétale aérienne, (3) le sol par la couverture et (4) par les racines ; de l'animal vers (2a) le refus alimentaire (RA), (2b) le lait produit, (2c) l'excrétion animale (EA) ; (2ac.1) perte d'azote lors du stockage du fumier ; (2ac.2) perte d'azote à la sortie de stockage de fumier jusqu'à l'utilisation sur la parcelle ; (2ac.3) restitution d'azote sur la parcelle par le fumier (Fum).

Tableau 16 : Quantité et qualité des grains, des biomasses aérienne et racinaire de chaque culture étudiée par système de culture riz//maïs+crotalaire (R//M+C) en milieu contrôlé, riz//avoine+vesce (R//A+V) et riz//maïs+haricot (R//M+H), en milieu paysan.

Système de culture	Culture	Biomasse	Rendement		N		PDI	
			t ha ⁻¹ an ⁻¹	n	g N kg ⁻¹ MS	n	g PDI kg ⁻¹ MS	n
R//M+C	Riz	Grain	3,68 ± 0,9	8	13,2 ± 1,5 ⁽¹⁾	244	43 ± 6,9 ⁽¹⁾	204
		Paille	3,40 ± 1,5	8	10,8 ± 1,7 ⁽¹⁾	204		
		Racines	0,87 ± 0,3	12	10,1 ± 1,6 ⁽²⁾	18		
	Maïs	Grain	1,48 ± 1,1	8	10,9 ± 3,4 ⁽¹⁾	50	41 ± 15,0 ⁽¹⁾	126
		Paille	2,01 ± 1,1	8	10,4 ± 3,8 ⁽¹⁾	126		
		Racines	0,34 ± 0,3	36	11,3 ± 2,1 ⁽²⁾	36		
	Crotalaire	Paille	9,94 ± 5,0	8	24,4 ± 5,2 ⁽¹⁾	37		
		Racines	0,95 ± 0,5	24	14,4 ± 2,2 ⁽²⁾	9		
R//A+V	Riz	Grain	3,08 ± 1,5	33	13,2 ± 1,5 ⁽¹⁾	244	43 ± 6,9 ⁽¹⁾	204
		Paille	3,62 ± 2,1	33	10,8 ± 1,7 ⁽¹⁾	204		
		Racines	0,65 ± 0,2	38	10,1 ± 1,6 ⁽²⁾	18		
	Avoine	Grain	0,95 ± 0,7	26	16,2 ± 1,8 ⁽¹⁾	106	109 ± 9,3 ⁽¹⁾	27
		Fourrage vert	1,25 ± 0,9	38	32,5 ± 4,5 ⁽¹⁾	27		
		Paille	1,85 ± 1,0	30	11,9 ± 2,7 ⁽¹⁾	92		
		Racines	0,62 ± 0,2	114	8,6 ± 1,2 ⁽²⁾	27		
R//M+H	Riz	Grain	3,37 ± 1,6	36	13,2 ± 1,5 ⁽¹⁾	244	43 ± 6,9 ⁽¹⁾	204
		Paille	3,95 ± 2,6	36	10,8 ± 1,7 ⁽¹⁾	204		
		Racines	0,68 ± 0,2	34	10,1 ± 1,6 ⁽²⁾	18		
	Maïs	Grain	1,08 ± 1,0	28	10,9 ± 3,4 ⁽¹⁾	50	41 ± 15,0 ⁽¹⁾	126
		Paille	2,90 ± 1,9	28	10,4 ± 3,8 ⁽¹⁾	126		
		Racines	0,36 ± 0,2	180	11,3 ± 2,1 ⁽²⁾	36		
	Haricot	Grain	0,43 ± 0,3	25	39,2 ± 1,3 ⁽¹⁾	52	72 ± 8,0 ⁽¹⁾	100
		Paille	0,37 ± 0,2	26	21,5 ± 2,9 ⁽¹⁾	100		
		Racines	0,23 ± 0,1	180	11,4 ± 1,1 ⁽²⁾	27		

Moyenne ± écart-type ; n correspond au nombre d'échantillons utilisé pour calculer la moyenne.

Les données sur la teneur en N et en PDI ont été obtenus par ⁽¹⁾ des analyses spectrales et ⁽²⁾ des analyses CHN.

4.2.1 Mesure de la biomasse végétale

En milieu contrôlé, les rendements en grain et en biomasse aérienne ont été mesurés dans un carré de 5m x 5m situé au milieu de chaque parcelle d'une surface totale de 10m x 10m. En milieu paysan, ils ont été estimés à partir du rendement total de la parcelle cultivée pour le haricot et à partir de la moyenne de ceux obtenus dans cinq carrés de 1m x 1m pour le riz et l'avoine et dans cinq placettes de 2m linéaires de la double ligne pour le maïs, situés au centre et aux quatre côtés de la parcelle de 10m x 10m. Les cinq parcelles élémentaires sont situés au centre, nord, sud, est et ouest de la parcelle. Les biomasses aériennes, c'est-à-dire les tiges ou les pailles, ont été coupées au ras du sol et toutes les feuilles ou tiges tombés sur le sol ont été pesées pour avoir le poids total de la biomasse produite.

Les biomasses racinaires ont été mesurées à la floraison des plantes, en utilisant une tarière à racines de 8cm de diamètre et 15cm de hauteur (750 cm³) jusqu'à de profondeurs maximales de 60, 105, 105, 150, 180 cm pour le haricot, avoine, riz, crotalaire et maïs, respectivement.

Les racines ont été séparées du sol en lavant et tamisant les mottes de terre prélevées avec une maille quadrangulaire de 1mm. Cette extraction des racines a été faite le jour du prélèvement racinaire ou le jour suivant mais en conservant les échantillons dans un réfrigérateur à 4°C afin de préserver les petites racines (Chapitre 3).

Les échantillons de grains, biomasse aérienne et racines prélevés ont été séchés à l'étuve à 60°C pendant 72 h avant l'opération de pesage pour obtenir la teneur en matière sèche de chaque type de biomasse.

4.2.2 Analyse spectrale des biomasses : grain, pailles, fumier

Les analyses spectrales ont été effectuées sur des échantillons séchés et finement broyés en utilisant l'spectromètre dans le proche infrarouge (SPIR ; modèle LabSpec4 ASD Inc.) (Chapitre 1). Un aliquote pris dans chaque échantillon broyé et bien homogénéisé a été scanné en faisant cinq lectures avec une sonde muni de fibre optique. Avant de faire la première lecture des échantillons, un spectre de référence avec le spectralon (blanc) a été enregistré et une lecture de contrôle a été effectuée après le premier « blanc » et toutes les trois heures pour vérifier le bon fonctionnement de l'appareil. Un ordinateur portable permet d'enregistrer les spectres mesurés et le logiciel Indico Pro affiche les résultats sous forme d'une courbe d'absorption de la lumière. Les spectres obtenues ont été transformés en réflectance et prédits pour obtenir les teneurs en matière azotée totale (MAT), lignine (acide detergent lignin ou ADL), cendre total (CT), cellulose brute (CB), fibre (acid detergent fibre ou NDF), en utilisant des équations de prédiction spécifiques déjà développées par le laboratoire de nutrition animale de FIFAMANOR et par le CIRAD à l'île de la Réunion pour chaque type de biomasse analysé. Les résultats obtenus permettent de calculer la teneur en protéine digestible dans l'intestin (gPDI kg⁻¹ MS) suivant la formule suivante :

$$\text{PDIN (g PDI kg}^{-1}\text{ MS)} = 0,807 - 0,726 \text{ Idtemp} + 6,43 \text{ Prot} + \text{NDF (Eq.1a)}$$

$$\text{PDIE (g PDI kg}^{-1}\text{ MS)} = 84,7 - 8,01 \text{ Idtemp} - 0,58 \text{ CT} + 3,15 \text{ MAT} - 0,71 \text{ CB (Eq.1b)}$$

PDI représente les protéines digestibles dans l'intestin, Id temp décrit les caractéristiques du fourrage ou de la paille (tropical ou tempéré) obtenu lors de la prédiction des spectres avec l'utilisation des équations pour tous les types de fourrage tropical ou tempéré, Prot et NDF correspondent à la teneur en protéine et en fibre, respectivement, pour chaque type de biomasse analysé.

Comme dans le chapitre 5, les valeurs des PDI les plus faibles entre PDIE (PDI permi par l'énergie) et PDIN (PDI permi par l'azote) ont été considérées dans nos résultats.

4.2.3 Calcul de nombre d'animaux nourris

Le nombre d'animaux (Nb A) qui peut être nourri avec la biomasse végétale produite a été calculé en fonction de la capacité de charge des parcelles pour chaque système de culture.

Nous avons considéré un animal moyen de 400 kg de Poids Vif (PV) et dont sa capacité d'ingestion (CI) a été estimée à 2,85 kg MS par 100 kg PV. Nous avons estimé que dans la ration alimentaire journalière de l'animal, seulement 60% de la matière sèche est assurée par l'utilisation de la biomasse végétale. Les 40% restants sont apportées par les aliments concentrés ou d'autres sous-produits agro-industriels comme les drèches de brasserie. Donc, la capacité d'ingestion de l'animal sera rempli à 60% par les biomasses végétales, noté CIB (%).

$$\text{Nb A} = \text{PV (kg)} \times \text{CI (kg MS/100kg PV/jour)} \times \text{CIB (\%)} \times 365 \text{ (jours)} \text{ (Eq.2)}$$

4.2.4 Production du lait

La production de lait potentielle à partir de la biomasse produite par les systèmes de cultures a été calculée en faisant l'hypothèse que l'énergie nécessaire pour équilibrer les besoins de l'animal (entretien et production) est assurée par l'ensemble des ressources alimentaires (fourrages, concentrés et sous-produits). Ainsi, la production de lait théorique a été obtenue à partir de l'alimentation de l'animal avec la biomasse végétale produite par chaque système de culture et en déduisant dans cette quantité de biomasse la part considérée comme refus alimentaire (BA kg MS ha⁻¹ an⁻¹). Cette quantité de biomasse végétale a été multipliée par la teneur en PDI propre à chaque plante pour calculer la quantité de lait produit (Rasamizafimanantsoa et al., 2008). Le résultat donne la quantité de lait théoriquement produite, en considérant que le facteur limitant est l'azote et non l'énergie, avec la biomasse aérienne produite et exportée de 1ha de chaque système de culture (0,5 ha de riz + 0,5 ha des plantes en rotation).

$$\text{Lait (l)} = \text{PDI (g PDI kg}^{-1} \text{ MS)} \times \text{BA (kg MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}) / 48 \text{ (Eq.3)}$$

4.2.5 Teneur en azote du fumier produit

L'azote du fumier au niveau de l'étable (FE en kg N ha⁻¹ an⁻¹) provient de l'excrétion animale (EA en kg N ha⁻¹ an⁻¹) et des refus alimentaires (RA en kg N ha⁻¹ an⁻¹). Il correspond donc à l'azote total présent dans la biomasse végétale distribué aux animaux moins l'azote digéré et métabolisé par l'animal pour produire du lait (et pour son entretien). Cette valeur de N du fumier est par la suite multipliée par les valeurs de l'efficacité de conservation de N durant l'étape de stockage qui est de 0,81 (Salgado et al., 2014) et entre la sortie du fumier de l'étable et l'utilisation sur la parcelle 0,73 (Salgado et al., 2014) afin de déterminer la teneur en N dans le fumier produit (Fum) par chaque système de culture et chaque option d'utilisation de la biomasse végétale.

$$\text{Fum (kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}) = 0,81 \times 0,73 \times \text{FE (kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}) \text{ (Eq. 4)}$$

$$\text{avec FE (kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}) = \text{EA (kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}) + \text{RA (kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}) \text{ (Eq.5)}$$

5 Résultats et discussion

5.1 Flux partiel d'azote dans une exploitation mixte d'agriculture-élevage

L'azote total contenu dans la biomasse du système R//M+C, qui correspond à la somme de l'azote contenu dans les grains, dans la biomasse aérienne et dans les racines des trois cultures utilisées dans le système est de $196 \text{ N kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ dont 66%, 24% et 10% sont apportés respectivement par la crotalaire, le riz et le maïs (Figure 31.1). Cette quantité totale de N du système R//M+C peut varier entre 125 et $261 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ suivant la production de biomasse végétale. Ce système permet une restitution importante de N dans le sol (en moyenne $163 \text{ N kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) dont 91% par la couverture du sol et 9% par les racines. Il ne s'agit toutefois pas d'un apport net car une partie de cet azote ayant auparavant été prélevé dans ce sol. Même avec une exportation complète de toutes les biomasses végétales pour l'alimentation des animaux, à l'exception de la crotalaire qui n'est pas consommée par les animaux, et tous les grains, 72% de l'azote total produit par ce système est restitué au sol. Si la quantité de biomasse exportée pour les animaux est réduite de moitié, la quantité de N restituée au sol est d'environ 78% par rapport à la quantité d'azote produite. En revanche, le N utilisé pour la production laitière et le N obtenu dans le fumier sont également diminués de moitié.

Le système de culture R//M+H représente $82 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (allant de 58 à $106 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) de N total par les pailles, racines et grains des trois cultures, avec respectivement 56%, 28% et 16% dans le riz, maïs et haricot (Figure 31.3). Si 100% de la biomasse végétale aérienne est exportée pour l'alimentation des animaux, la plus grande partie de N est contenu dans les grains (44%) et un tiers de l'azote produit est contenu dans le lait (27%). Par rapport à ce scénario, une exportation de 50% et 0% de cette biomasse permet à une augmentation respective de 32% et 65% de N restitué au sol.

L'azote dans la totalité des biomasses du système R//A+V est de $85 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, allant de 61 à $110 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, dont le riz et l'avoine contiennent presque les mêmes quantités (Figure 31.2). En exportant la totalité de toutes les biomasses végétales aériennes, 33% de N est utilisé dans la production de lait, 33% dans les grains, 23% retourne au sol et 12% est perdu lors du stockage et de l'utilisation de fumier sur la parcelle. Les taux d'exportation de la biomasse végétale aérienne de 0% et 50% pour les systèmes R//M+C et R//M+H correspondent respectivement à des taux d'exportation de 19% et 59% pour le système R//A+V. En fait, le fourrage d'avoine destiné et exporté intégralement pour l'alimentation animale fait augmenter ces taux d'exportation par rapport aux deux autres systèmes. Si l'exportation de la biomasse végétale est réduite à 50% et à 0%, le N restitué au sol est augmenté de 24% et 31%, respectivement ; et par contre le N utilisé dans la production laitière est diminuée respectivement de 29% et 61%.

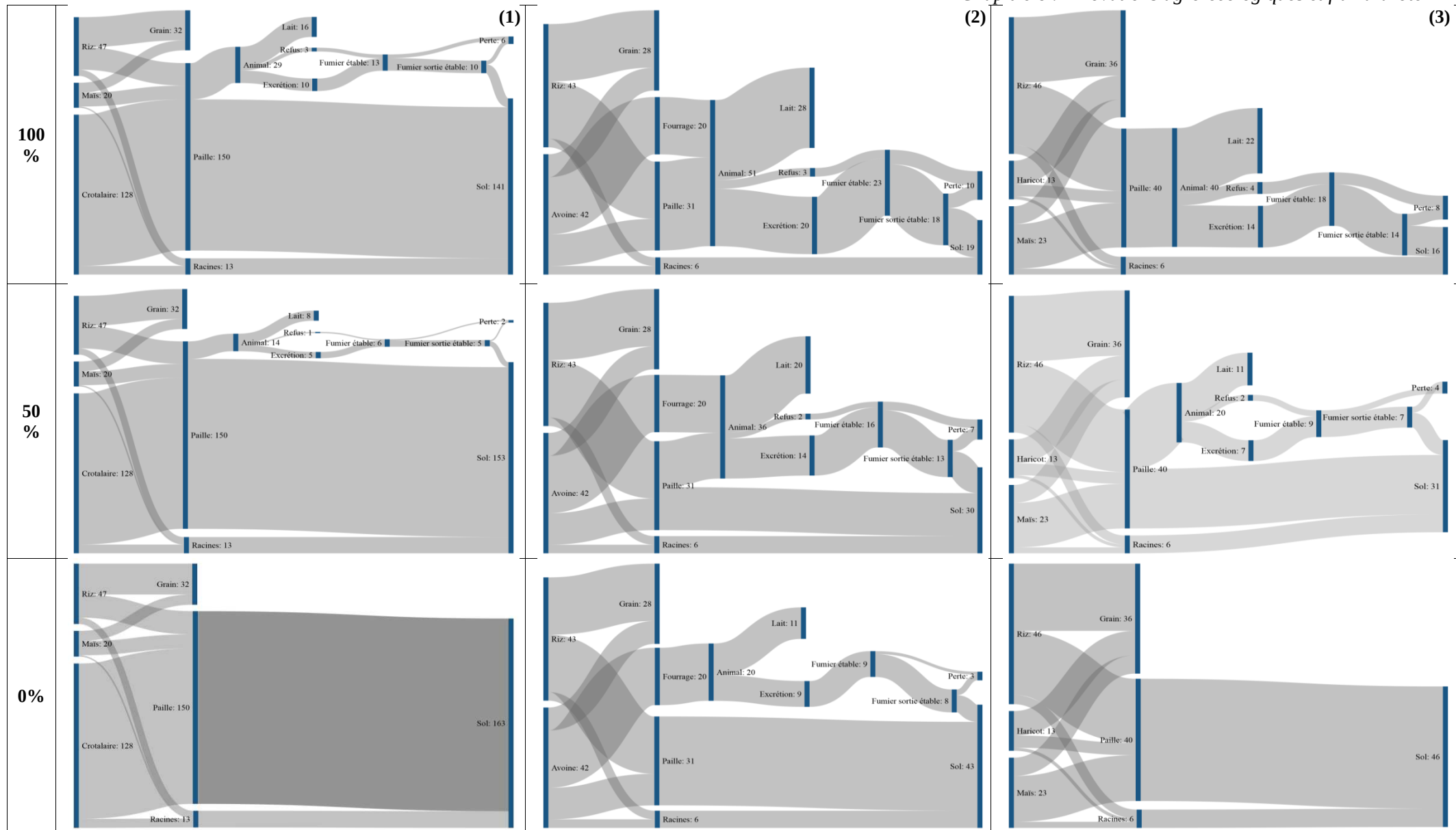


Figure 31 : Flux d'azote dans les systèmes de culture pluviale de (1) riz//maïs+crotalaire, (2) riz//avoine+vesce, (3) riz//maïs+haricotet l'élevage bovin en exportant 100%, 50% et 0% de la biomasse végétale de la parcelle.

L'azote contenu dans la totalité de la biomasse du système R//M+C ($196 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) est 2,2 et 2,4 fois plus élevé que celle des systèmes R//A+V et R//M+H (Figure 31). Dans R//M+C la biomasse est majoritairement restituée au sol grâce à la production en biomasse très importante de la crotalaire (10 t MS ha^{-1}) (Chapitre 4) utilisée seulement comme couverture du sol et qui permet d'apporter $126 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Cette quantité de N restituée au sol est encore faible par rapport à celle mesurée par Gathumbi et al. (2002) qui a observé une production de crotalaire de l'ordre des 200 kg N ha^{-1} pendant six mois au Kenya. Toutefois, l'azote restitué par le système R//M+C est quatre fois plus élevé que celui restitué au sol par les deux autres systèmes (avec 0% exportation de la biomasse végétale). En contrepartie, l'azote du système R//A+V utilisé pour la production du lait est 21% et 43% plus élevé que celui observé dans les systèmes R//M+H et R//M+C, respectivement (avec 100% exportation de la biomasse végétale). Le système R//M+C est un système intermédiaire comparé aux deux autres systèmes face à la restitution de N au sol et à l'utilisation de N dans la production du lait mais la quantité de N dans les grains est supérieure que celle des systèmes R//M+C et R//A+V. La teneur en protéines dans les grains pour la consommation humaine est plus importante dans le système R//M+H.

5.2 Restitution d'azote au sol

L'azote restitué au sol est plus important avec le système R//M+C ($164 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) en comparant avec les systèmes R//A+V ($42 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) ou R//M+H ($46 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) et en considérant une restitution totale de toutes les biomasses végétales produites. En équivalent d'urée, le système R//M+C permet de gagner 530 kAr (10^3 Ariary) $\text{ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ de plus par rapport au système R//A+V et $511 \text{ kAr ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ par rapport au système R//M+H (Tableau 17).

Avec 50% d'exportation de la biomasse végétale consommable par les animaux, le système R//M+C permet une restitution de $153 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ au sol dont la plus grande partie (89%) provient de la couverture du sol, 8% et 3% proviennent respectivement de racines et de fumier. Les systèmes R//A+V et R//M+H retournent 1/5 du N restitué au sol par le système R//M+C en exportant 50% des biomasses végétales pour alimentation animale (Figure 31).

L'azote restitué au sol via le paillage (couverture du sol) est toujours supérieur à celui apporté par le fumier dans R//M+C parce que la crotalaire n'est pas appréciée par les animaux et est utilisée exclusivement pour la couverture du sol. Dans les systèmes R//A+V et R//M+H, la restitution d'azote par la couverture du sol est également plus importante quand les taux des biomasses exportées pour l'alimentation animale sont inférieurs à 67% ($2,3 \text{ t MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) et 70% ($2,5 \text{ t MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$).

Cependant, le fumier permet de concentrer les apports fertilisants au bon endroit, c'est-à-dire au poquet, en même temps que les semences et au bon moment, c'est-à-dire pendant le semis. En plus le N disponible pour les plantes dans le fumier est supérieur à celui contenu dans les

résidus végétaux (Equiterre, 2009). Huijsmans et al. (2001) ont analysé le fumier bovin et porcin et ont trouvé 2,2 et 5,6 g kg⁻¹ de N ammoniacal, respectivement, disponible tout de suite pour les plantes alors que le N dans les résidus doivent être minéralisé avant de devenir assimilable par les plantes. Sakala et al. (2000) ont montré par exemple que la minéralisation de N dans les résidus de maïs est de 1,8 g kg⁻¹. Par contre, une partie de l'azote disponible dans le fumier est facilement volatilisé. L'efficacité de conservation de l'azote durant le stockage et lors de son utilisation sur la parcelle peut diminuer respectivement jusqu'à 30% et 6% (Rufino et al., 2006) c'est-à-dire que les pertes peuvent aller respectivement jusqu'à 70% et 94% si la conservation et les pratiques d'épandage ne sont pas optimales. Cette perte dépend de plusieurs facteurs comme la température, le vent, la pluie (Huijsmans et al., 2001), les pratiques d'épandage sur la parcelle (Smith et al., 2009). Andriarimalala et al. (2013) ont montré que la qualité azotée de fumier dépend aussi du type d'infrastructures utilisé pour les animaux et les lieux de stockage du fumier.

Parmi les quantités d'azote restitué au sol, une partie vient de l'azote atmosphérique. Gathumbi et al. (2002) ont montré par exemple que la fixation d'azote atmosphérique de crotalaire est de l'ordre de 75 à 83% de l'azote total dans la plante entière. Toutefois, cette quantité de N restitué sur la parcelle n'ira pas entièrement à la culture suivante à cause des pertes par minéralisation, dénitrification et lessivages de l'azote. Di et Cameron (2002) ont trouvé par exemple qu'avec l'incorporation des pailles dans le sol, 15% de N apporté au sol est perdu par dénitrification et lessivage.

5.3 Production du lait

La production de lait est plus élevée avec le système de culture R//A+V (Figure 32.2), soit 1 380 l ha⁻¹ an⁻¹, même dans les conditions de 0% exportation de biomasses aériennes fourragères. En fait, et comme nous avons détaillé dans la partie matériel et méthodes, dans le cas spécifique du système R//A+V les fourrages d'avoine produits lors de la première coupe, ont été utilisés pour l'alimentation animale, même dans le cas d'exportation considéré à 0% des résidus en fin de campagne. L'azote contenu dans ce fourrage d'avoine représente 14% (20 kg N ha⁻¹ an⁻¹) de biomasse végétale aérienne totale du système. La production de lait augmente à environ 3 640 l ha⁻¹ an⁻¹ en exportant la totalité des fourrages et résidus pour nourrir les animaux. L'équivalent économique de cette quantité de lait produite par hectare est estimé à 3 275 kAr ha⁻¹ an⁻¹ (Tableau 17), avec 900 Ar par litre de lait. La production laitière permise par les fourrages des systèmes R//M+H et R//M+C est respectivement 20% et 42% plus faible (Figure 32). L'utilisation du système de culture R//A+V avec exportation totale de la biomasse permet un gain de 621 kAr et 1 353 kAr ha⁻¹ an⁻¹, respectivement par rapport aux systèmes R//M+H et R//M+C (Tableau 16). Il est à rappeler que le calcul a été effectué en supposant que les besoins en énergie de l'animal sont assurés par l'apport d'aliments

concentrés et sous-produits. Pour produire 1 l de lait, il faudra apporter à l'animal 0,44 UFL, 48 PDI, 3,5 Ca et 1,7 P (minéraux) (Rasamizafimanantsoa et al., 2008).

Parallèlement à cette production laitière, le N contenu dans le fumier, et obtenu par les systèmes R//M+C et R//M+H est inférieur de 45% et 21%, respectivement, par rapport à celui obtenu par le système R//A+V (13 kg N ha⁻¹ an⁻¹). À chaque augmentation de 10% de l'intensité d'exportation de la biomasse végétale consommable par les animaux dans les systèmes R//M+C, R//A+V et R//M+H, il y a une augmentation de 214, 226, 295 l de lait ha⁻¹ an⁻¹, respectivement ; une augmentation de 0,7, 0,8 et 1,1 kg N ha⁻¹ an⁻¹ d'azote restitué au sol sous forme de fumier, respectivement et une diminution de 2,9, 3,1 et 4,0 kg N ha⁻¹ an⁻¹ d'azote restitué au sol par l'utilisation des biomasses végétales comme couverture du sol (Figure 32).

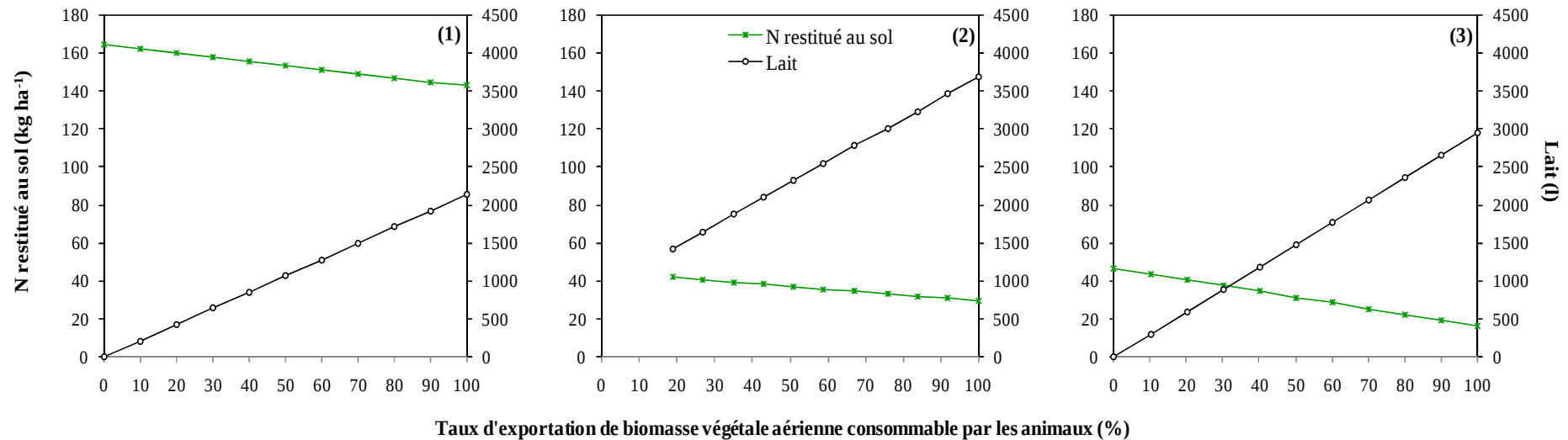


Figure 32 : Lait produit et azote restitué dans le sol suivant les options d'utilisation de la biomasse végétale aérienne dans les systèmes (1) riz//maïs+crotalaire, (2) riz//avoine+vesce, (3) riz//maïs+haricot

Tableau 17 : Equivalence économique en kAr ha⁻¹ an⁻¹ (10³ Ariary) de la quantité d'azote restitué au sol et du lait produit par système de culture riz//maïs+crotalaire (R//M+C noté MC), riz//avoine (R//A+V noté AV), riz//maïs+haricot (R//M+H noté MH)

Exportation de la biomasse végétale aérienne pour l'animal				N restitué au sol par la couverture du sol			N restitué au sol par les racines			N restitué au sol par le fumier			Lait produit		
%				kAr			kAr			kAr			kAr		
t MS ha ⁻¹ an ⁻¹															
MC	AV	MH		MC	AV	MH	MC	AV	MH	MC	AV	MH	MC	AV	MH
0	0	0,63	0	652	133	176				0	24	0	0	1 278	0
50	1,35	1,99	1,81	590	66	88	61	26	26	16	41	23	960	2 296	1 326
100	2,71	3,36	3,61	527	0	0				32	58	46	1 921	3 316	2 653

5.4 Compromis d'utilisation des biomasses végétales dans la restitution de N au sol et dans la production de lait

Les compromis d'utilisation des biomasses végétales aériennes dans une exploitation mixte d'agriculture-élevage concerne notamment l'utilisation plus au moins importante de biomasse pour la couverture du sol, permettant de restituer le N au sol, et/ou par une exportation plus importante de biomasse pour l'alimentation animale privilégiant la production laitière et permettant également la production de fumier, source de N qui retourne au sol.

Le système R//M+C est le plus avantageux par rapport aux deux autres systèmes en termes de restitution d'azote au sol ; par contre R//A+V est le plus intéressant en termes de production de lait. Le système R//M+H exporte la moitié de l'azote produit dans les grains (36 sur 82 kg N ha⁻¹ an⁻¹) et représente un système intermédiaire par rapport à la production laitière et à la restitution de N au sol comparé avec les deux premiers systèmes. Cependant, si ces avantages agronomiques et zootechniques (restitution de N au sol ou production laitière) sont convertis en termes économique, le système R//A+V est de loin le plus bénéfique avec un surplus de 748 à 901 kAr ha⁻¹ an⁻¹ par rapport au système R//M+C en exportant 0% ou 100%, respectivement, de biomasse végétale pour l'animal. À l'inverse, le gain économique obtenu avec R//A+V, comparé avec R//M+H, diminue avec l'augmentation du taux d'exportation de la biomasse végétale (718 kAr à 1 259 kAr ha⁻¹ an⁻¹ avec 100% à 0% d'exportation). Cette différence peut encore augmenter si le prix de lait augmente et cela motive sans doute les paysans à exporter de la biomasse végétale produite. Naudin et al. (2015) ont aussi montré que le prix du litre de lait pourrait influencer l'adoption de l'AC dans la région du Lac Alaotra.

Si nous souhaitons maintenir à l'équilibre du stock de C initial du sol, avec un stock moyen en C de 75 t C ha⁻¹ (horizon 0-30 cm) dans les zones d'Andranomanelatra, Antsirabe, la totalité (100%) de toutes les biomasses végétales consommables par les animaux peut être encore exportée en pratiquant R//M+C ; mais cette exportation ne peut pas dépasser que 65% et 71%, respectivement, en utilisant les systèmes R//A+V et R//M+H (Chapitre 5). Ces taux d'exportation de la biomasse végétale pour l'animal correspondent économiquement à 2 541 kAr, 2 650 kAr, 1 968 kAr pour R//M+C, R//A+V et R//M+H, respectivement. Avec les taux d'exportation de la biomasse végétale pour maintenir à l'équilibre le stock en C du sol, un ha cultivé de R//M+C permet d'alimenter une vache au maximum et restituer au sol 84 % (126 sur 196 kg N ha⁻¹ an⁻¹) de N produit par le système ; un ha de R//A+V permet de restituer seulement 31% (26 sur 85 kg N ha⁻¹ an⁻¹) de N produit mais ne permet pas d'alimenter une vache pendant une année ; un ha de R//M+H permet de restituer 30% (25 sur 82 kg N ha⁻¹ an⁻¹) de N produit mais l'alimentation d'une vache pendant une année entière n'est pas assurée par la biomasses exportée (maximum 71%). En effet, avec notre hypothèse d'apporter 60% de matière sèche dans la ration journalière d'une vache laitière de 400 kg, il faut au moins 71%

et 73% de biomasse végétale produit par R//A+V et R//M+H, respectivement pour l'alimentation d'une vache pendant une année.

Par contre dans la zone de Betafo, avec un stock moyen en C de l'ordre de 130 t C ha⁻¹ (horizon 0-30 cm), seul le système R//M+C peut maintenir l'équilibre de stock de C dans le sol. Cependant, il ne faut pas oublier que le bénéfice économique obtenu avec la vente du lait dans le cas du système R//A+V permettrait d'acheter plusieurs tonnes de matières organiques à utiliser sur la parcelle pour stabiliser, au moins, le carbone du sol ou des engrais minéraux pour combler la perte de N sur la parcelle.

6 Conclusion

La biomasse végétale peut être utilisée pour la couverture du sol dans le cas de l'agriculture de conservation (AC) et pour alimentation animale, surtout dans les zones où l'élevage est important. Le système riz//maïs+crotalaire (R//M+C) permet de restituer une importante quantité d'azote au sol (142 à 164 kg N ha⁻¹ an⁻¹), soit environ quatre fois plus que celle restituée par les deux autres systèmes riz//maïs+haricot (R//M+H) et riz//avoine+vesce (R//A+V). La couverture du sol constitue une grande source de cette restitution avec plus de 85% de N total retourné sur la parcelle dans R//M+C, et plus de 43% et 57% de N total restitué par R//A+V et R//M+H, respectivement si les taux d'exportation de la biomasse végétale pour l'animal ne dépassent pas 67% et 70%. Mais le N apporté par le fumier est concentré au bon endroit et au bon moment par rapport à l'utilisation par la plante. Le système R//A+V permet une forte production de lait (1 380 l à 3 640 l) grâce à la production relativement importante de fourrage d'avoine (1,2 t ha⁻¹). La production laitière avec ce système de culture à vocation fourragère est 20% et 42% supérieur à celle obtenue en pratiquant les systèmes R//M+H et R//M+C, respectivement. L'adoption de l'AC et le choix de système de culture utilisé dépendent donc de l'objectif de chaque paysan, et en fonction aussi de la taille de son exploitation (surface disponible pour l'agriculture et nombre de bovins laitiers).

D'un point de vue économique, le système R//A+V est le plus bénéfique, en ne considérant que l'équivalence en quantité d'urée de l'azote restitué au sol et le lait produit, avec des surplus économiques de 706 à 816 kAr et 633 à 1 218 kAr ha⁻¹ an⁻¹ respectifs par rapport aux systèmes de R//M+C et R//M+H. Cependant, il faut rappeler également que les systèmes R//M+C et R//M+H permettent une production en grains consommables plus élevée (Chapitre 4). Il est donc intéressant de tenir en compte tous les avantages et inconvénients de chaque système de culture proposé afin que chaque exploitant puisse justifier son choix selon ses besoins. Un élargissement de cette étude dans un ensemble d'exploitations réelles, en considérant les autres parcelles de production (rizière, agroforesterie) et les autres types

d'élevage (porcin, volailles) serait souhaitable avec l'objectif de confirmer le compromis d'utilisation des biomasses végétales. Ces autres types d'élevage, couramment pratiqués à Madagascar, influent également sur la fertilisation de la parcelle et donc sur la production agricole.

Conclusion générale

1 Synthèse générale

Le riz pluvial est la base des systèmes de culture étudiés dans cette thèse. Ce travail de thèse a permis de montrer, dans la première partie, l'importance des racines sur le stock en carbone du sol. La deuxième partie a porté sur l'évaluation des effets des différents niveaux d'utilisation de la biomasse végétale comme couverture du sol, sur le carbone du sol. Dans la troisième partie, l'élevage bovin, un autre « utilisateur » de la biomasse végétale, a été intégré dans l'étude. L'effet de l'exportation croissante de la biomasse végétale pour l'alimentation des animaux sur le flux partiel d'azote dans une exploitation a été déterminé. Cela a mené par la suite à l'évaluation de la quantité d'azote restituée au sol et de la production laitière permise par chaque système de culture, tout en valorisant le fumier amélioré (fumier conservé pour limiter les pertes d'azote) issu des activités d'élevage. L'ensemble des trois parties ont montré l'impact des innovations agro-écologiques menées (agriculture de conservation et conservation du fumier) sur le flux d'azote et de carbone des cultures pluviales des Hautes Terres de Madagascar. Ceci pour atteindre l'objectif d'améliorer la production agricole *ie* la production animale (lait) et végétale (grain et biomasse aérienne) tout en réduisant les pertes en nutriments dans une exploitation agricole.

1.1 Racines des plantes – carbone du sol

La majorité des racines des cultures pluviales se développent dans les premiers 30 cm de profondeur dont 90% pour le riz et le haricot, 80% pour l'avoine et 70% pour le maïs et la crotalaire. Le stock en carbone du sol est donc plus important au niveau des couches superficielles que dans les couches plus profondes. Les racines permettent de restituer respectivement 18%, 27% et 28% de carbone total de l'ensemble de la biomasse végétale des rotations riz//maïs+crotalaire ou riz//avoine et riz//maïs+haricot. Le système riz//maïs+crotalaire peut restituer au sol jusqu'à 10 t C ha⁻¹ sur deux ans via la totalité de la biomasse végétale produite. Cette quantité est trois fois plus élevée que celle obtenue avec la biomasse végétale totale des deux autres systèmes de culture. Mais au-delà de la quantité, le carbone de la biomasse végétale contribuant au C stable est sans doute plus important car nous n'avons pas mesuré la rhizodéposition. Ces résultats répondent à la première hypothèse de nos travaux de thèse : « *Les racines contribuent d'une manière importante à la restitution de matière organique au sol* ». De plus, par rapport à des études limitées sur le rôle des racines dans le stockage du C au sol, cette thèse montre dans un chapitre méthodologique une bonne relation entre la longueur et le poids des racines de riz pluvial. Cette relation varie suivant la taille des racines : une fonction puissance pour les petites racines (diamètre $d < 1$ mm) et toutes les racines (mélange de petites et grosses racines) et une fonction linéaire pour les grosses racines ($d > 1$ mm). Ce résultat facilitera les futurs travaux comme par exemple l'étude combinant la nutrition des plantes et le stock de carbone organique du sol dans un but

d'étudier l'adaptation au changement climatique et le stockage de carbone grâce aux différents systèmes de culture.

1.2 Options d'utilisation de la biomasse végétale consommable par l'animal – le carbone du sol

Le carbone des sols agricoles n'est pas uniquement apporté par les racines des plantes, d'autres sources sont également considérées, comme les biomasses végétales aériennes utilisées comme couverture du sol (cas de l'agriculture de conservation) et les biomasses d'origine animale apportées lors de la fertilisation de la parcelle avec la fumure organique. Toutefois, l'apport en C au sol par les biomasses végétales dépend notamment de la disponibilité de ces biomasses c'est-à-dire de la production sur la parcelle et des autres utilisations de la biomasse produite. Alors, avant de jouer sur la proportion d'utilisation de la biomasse végétale pour la couverture du sol et pour l'alimentation animale, il faut d'abord évaluer la production des biomasses végétales de chaque système de culture.

La comparaison du rendement en grain et en biomasse de chaque système de culture étudié a été combinée avec les différents traitements de fertilisation. La fertilisation a un effet significatif sur le rendement en grain et en paille dès la première année de l'expérimentation en milieu paysan mais seulement en troisième année en milieu contrôlé. Cette observation peut être liée à l'éventuel arrière effet de la fertilisation apportée chaque année sur les parcelles contrôlées (essai mis en place avant les expérimentations de la thèse) et à l'insuffisance des apports fertilisants sur la plupart des parcelles paysannes avant notre expérimentation. Le fumier amélioré et la fumure minérale améliorent les productions en grain et en biomasse de riz et de l'ensemble des cultures dans chaque rotation. En 2016, lors des essais en milieu contrôlé, le rendement en grain de riz est de l'ordre de 4 t ha^{-1} pour la moyenne des trois systèmes de culture, en utilisant le fumier amélioré. Il est 27% et 48% supérieur par rapport aux rendements respectifs en fertilisant les cultures avec le fumier conventionnel et en absence de fertilisation. En ce qui concerne le système de culture, les rendements en grain (riz et autres cultures de la rotation) sont significativement plus élevés avec les rotations riz//maïs+crotalaire et riz//maïs+haricot par rapport à la rotation riz//avoine. La production totale en biomasse végétale aérienne est toujours plus importante avec la rotation riz//maïs+crotalaire par rapport à celle obtenue avec les deux autres rotations. Elle peut atteindre jusqu'à 17 t MS ha^{-1} sur 2 ans grâce à la forte production de biomasse de crotalaire qui peut aller jusqu'à plus de $10 \text{ t MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. En général les productions (grain et paille) sont similaires en milieu paysan et contrôlé, sauf pour celles de haricot grain et de fourrage vert d'avoine qui sont plus élevées sur les parcelles paysannes. Les résultats obtenus dans cette partie de la thèse confirment partiellement la troisième hypothèse : « *La pratique des innovations agro-écologiques (fumier amélioré et agriculture de conservation) améliorent la production végétale* ». Cette hypothèse est partiellement vérifiée car certains systèmes en

agriculture de conservation ne permettent pas toujours d'améliorer le rendement des cultures. Le rendement est significativement meilleur en AC lorsque les pluies ont un caractère irrégulier. Face aux différences de production en biomasse végétale aérienne des trois systèmes de culture étudiés, que pouvons-nous maintenant en déduire sur le stock en C du sol de chaque système ?

L'effet des diverses options d'utilisation de la biomasse végétale aérienne a été évalué sur les parcelles fertilisées en fumier amélioré, considéré comme étant une innovation agro-écologique. La simulation du stock en C a été faite pour des exportations de la biomasse végétale consommable par les animaux variant de 0 à 100%, et un stock en C du sol de départ variant de 60 à 160 t C ha⁻¹. La simulation du stock en C du sol en 2011, en utilisant et en regroupant tous les apports en C durant neuf ans (depuis 2002) et en prenant en compte les particularités des sols andiques, avec le modèle Roth C est satisfaisante. Mais les données disponibles n'ont pas permis de distinguer les différents types d'apport en C *ie* le fumier, la biomasse végétale aérienne et racinaire. Un modèle plus simple comme le modèle Hénin&Dupuis a donc été utilisé. Le delta carbone sur vingt ans c'est-à-dire la différence entre les stocks en C au temps final et initial, diminue avec l'augmentation du stock en C de départ. Il est toujours positif sous la rotation riz//maïs+crotalaire, quel que soit la quantité de biomasse végétale exportée pour l'alimentation animale (Figure 33), sauf si le stock en C initial est supérieur à 160 t C ha⁻¹. Le stock en C peut être maintenu à l'équilibre sous les cultures riz//maïs+haricot et riz//avoine si le stock en C initial ne dépasse pas 60 t C ha⁻¹ et que le taux d'exportation de la biomasse végétale est inférieur à 90%. Ce maintien d'équilibre du stock en C est encore possible si le stock en C initial est inférieur à 110 t C ha⁻¹ pour la rotation riz//avoine et à 130 t C ha⁻¹ pour la rotation riz//maïs+haricot. Dans ce cas, à chaque augmentation de 10 t C ha⁻¹ du stock en C initial, il faudrait réduire les taux d'exportation de la biomasse des cultures riz//avoine et riz//maïs+haricot de 17% et 13%, respectivement. Suivant la variabilité des rendements, le delta C sous riz//avoine+vesce peut devenir négatif même si toutes les biomasses végétales produites sont laissées sur la parcelle, mais il peut également être en équilibre jusqu'à l'exportation de 84% de la biomasse végétale (Figure 33). Sous riz//maïs+haricot, le delta C peut devenir négatif aussi si le taux d'exportation est supérieur à seulement 10%, mais il peut également être toujours positif en exportant la totalité de la biomasse végétale (Figure 33). Ces résultats obtenus permettent ainsi de vérifier la deuxième hypothèse : « *La gestion d'utilisation de la biomasse végétale influe beaucoup dans l'amélioration ou le maintien du stock en carbone du sol* ».

Le système de culture riz//maïs+crotalaire est considéré comme un système intéressant pour le stockage de C dans le sol ; le système riz//maïs+haricot est moyennement intéressant, et le système riz//avoine est le moins efficace pour le stockage de C au sol et pour la production de grain. L'objectif principal est d'évaluer l'impact de ces trois systèmes de culture sur le flux de nutriment et de carbone et par conséquent leurs impacts sur la production agricole (animale et

végétale). Qu'en est-il alors pour l'effet d'utilisation de la biomasse végétale aérienne pour le sol et pour les animaux de ces trois systèmes de culture sur le flux d'azote et la production animale ?

1.3 Utilisation de la biomasse végétale aérienne pour le sol et pour l'animal : impact sur la restitution d'azote au sol et la production du lait

L'azote (N) total dans toutes les biomasses végétales de la rotation riz//maïs+ crotalaire est de l'ordre de $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ce qui est deux fois plus important qu'avec riz//maïs+haricot et riz//avoine. La quantité d'azote restituée au sol est donc plus élevée sous riz//maïs+crotalaire, surtout parce que la crotalaire n'est pas appréciée par les bovins et est utilisée complètement pour la couverture du sol. D'un point de vue économique, cette quantité d'azote est d'environ 520 kAr ha^{-1} plus élevée avec ce système par rapport aux deux autres systèmes de culture, en équivalent d'urée. En revanche, la rotation riz//avoine permet une mobilisation de l'azote pour la production de lait qui peut atteindre jusqu'à $3\,640 \text{ l ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ avec 100% d'exportation de la biomasse végétale pour l'alimentation animale. Cette production de lait est 19% et 41% plus importante que celle obtenue respectivement avec riz//maïs+haricot et riz//maïs+crotalaire. La production en lait obtenue avec le système riz//avoine permet de gagner économiquement jusqu'à $1\,230 \text{ kAr}$ et $1\,350 \text{ kAr ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ par rapport à des rotations de riz avec le maïs+haricot et maïs+crotalaire, respectivement. En prenant en compte toutes les productions (grain, lait) et la restitution de N au sol (converti en urée), la rotation riz//maïs+crotalaire permet de gagner jusqu'à $330 \text{ kAr ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ par rapport à la rotation riz//avoine. En considérant la variabilité probable de la production végétale, la rotation riz//maïs+crotalaire permet de gagner jusqu'à 480 kAr ha^{-1} de plus que riz//avoine mais qui peut être aussi moins bénéfique (-98 kAr ha^{-1}) (Figure 31). Par contre, en comparant l'équivalence économique de toutes les productions moyennes des cultures riz//maïs+crotalaire moins celle de riz//maïs+haricot, la différence est de -80 à 620 kAr ha^{-1} en exportant de 100% à 0% de la biomasse végétale consommable par les animaux. Mais avec la variation probable de la production végétale, la rotation riz//maïs+crotalaire permet un gain jusqu'à 919 kAr ha^{-1} mais elle peut être également moins bénéfique avec une différence jusqu'à -320 kAr ha^{-1} , par rapport à la rotation riz//maïs+haricot (Figure 33). Toutefois, l'argent assuré par la vente du lait avec 100% d'exportation des biomasses végétales est plus important que l'argent gagné comme équivalent d'urée de l'azote restituée au sol avec 0% d'exportation de ces biomasses. En fait la vente du lait permet de gagner $1\,200 \text{ kAr}$, $2\,400 \text{ kAr}$ et $3\,000 \text{ kAr ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ de plus que le prix d'urée, équivalent de l'azote restituée au sol par les rotations de riz avec maïs+crotalaire, avoine et maïs+haricot, respectivement.

Si nous souhaitons maintenir le stock en C du sol sur 20 ans, les rotations de riz avec maïs+crotalaire, avoine et maïs+haricot permettent d'exporter respectivement 2,7, 1,6 et 1,8 t MS $\text{ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ de biomasse végétale pour les animaux. Ces quantités de biomasse permettent de nourrir une vache pendant une année entière pour la culture riz//maïs+crotalaire mais en

ajoutant d'autres aliments qui assurent les besoins en énergie de l'animal. Par contre celles des rotations de riz avec avoine et maïs+haricot ne suffisent plus à nourrir une vache pendant une année.

Les résultats obtenus répondent à la troisième hypothèse : « *La pratique des innovations agro-écologiques et la bonne gestion d'utilisation de la biomasse végétale favorisent le recyclage de nutriments dans une exploitation et améliorent la production agricole (animale et végétale)* ».

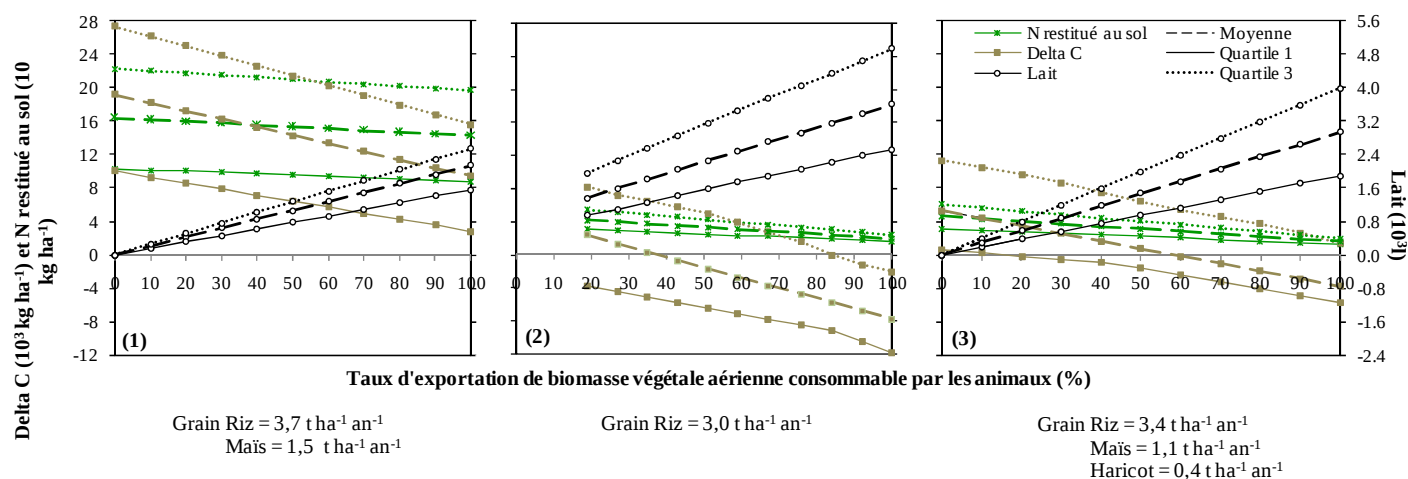


Figure 33 : Restitution d'azote au sol, delta carbone du sol (20 ans), production laitière, rendement en grain de chaque système de culture (1) riz//maïs+crotalaire, (2) riz//avoine+vesce, (3) riz//maïs+haricot en fonction du taux d'exportation de la biomasse végétale consommable par les animaux. Les quartiles 1 et 3 montrent la variabilité des résultats ie les données du premier et troisième quartile de toutes les données.

2 Perspectives

Les mesures sur les racines des cultures sont des travaux assez lourds pour des opérations de routine ce qui limite les études sur le rôle des racines dans le stockage du C au sol. Ainsi, l'étude méthodologique montrant la relation entre la longueur et le poids des racines de riz pluvial, présentée dans cette thèse, mérite encore d'être développée. La considération d'autres variétés de riz pluvial ou la conduite des cultures sur d'autres conditions climatiques et édaphiques pourront certainement améliorer les corrélations déjà obtenues. Cela rendra possible l'utilisation des fonctions déjà établies dans diverses conditions. Suite à l'évaluation de l'importance des racines dans le stock en C du sol, la détermination de leur qualité, la considération de C libéré lors de la rhizodéposition aideront à distinguer la part de C organique stocké au sol par les apports. Dans cette thèse, la simulation du stock en C du sol a été effectuée en utilisant un coefficient d'humification moyen (0,44) pour les trois différents apports de C au sol. Cela pourrait certainement surestimer l'humification des biomasses végétales aériennes ou sous-estimer celle des parties racinaires. Par conséquent, le stock en C du sol est également surestimé dans le cas où les apports en C sont constitués en majorité par

la biomasse végétale aérienne ou sous-estimé dans le cas où les apports sont seulement constitués par les parties racinaires et par la fumure organique. Dans ce contexte, il serait intéressant de trouver des éléments qui permettront de séparer les coefficients d'humification de ces trois types d'apport. Il nous a également manqué des données de teneur en carbone et de production de biomasse sous végétation naturelle pour vérifier les coefficients d'humification et de minéralisation à l'état d'équilibre. L'évaluation distincte de toutes ces parties de matières organique est importante afin de voir l'impact du carbone stocké sur la fertilité des sols agricoles. Pour cela, des mesures de la quantité de biomasse végétale (aérienne et racinaire) d'une végétation en milieu naturel et du stock en C sous cette végétation sont indispensables pour finaliser le paramétrage du modèle Roth C. Son utilisation ultérieure permettrait de valoriser également les données recueillies sur une dizaine d'années d'expérimentation sur les mêmes parcelles dans la région de Vakinankaratra. Ce modèle permet de distinguer les matières organiques facilement et lentement décomposable et les matières organiques humifiées et inertes.

Pour ce qui concerne du flux d'azote dans l'exploitation mixte d'agriculture et d'élevage, l'élargissement des travaux aux cultures de bas-fonds et à l'intégration d'autres espèces animales comme les volailles ou les porcins, permettrait de présenter de façon plus compétente les flux à l'échelle de l'exploitation. En effet, ces cultures couramment pratiquées à Madagascar influent significativement sur l'apport de fertilisation des cultures pluviales. De même, les élevages porcins et de volailles, courant dans les exploitations à Madagascar contribuent significativement, non seulement à la quantité de fumier produit, mais aussi à sa qualité (teneur en éléments fertilisants).

Suite à cette étude sur la qualité du fumier, des études économiques pourront compléter l'évaluation de l'importance de l'utilisation de fumier amélioré sur la production agricole. Les résultats ont montré des améliorations de la production végétale en termes de quantité en utilisant un fumier amélioré et/ou de la fumure minérale mais il faudra aussi considérer le coût de production de ce type de fumier.

Références bibliographiques

- Abiven, S., Recous, S., Reyes, V., Oliver, R., 2005. Mineralisation of C and N from root, stem and leaf residues in soil and role of their biochemical quality. *Biol. Fertil. Soils* 42, 119–128. doi: 10.1007/s00374-005-0006-0
- Andrews, M., Sprent, J. I., Raven, J. A., Eady, P. E., 1999. Relationships between shoot to root ratio, growth and leaf soluble protein concentration of *Pisum sativum*, *Phaseolus vulgaris* and *Triticum aestivum* under different nutrient deficiencies. *Plant Cell Environ.* 949–958.
- Andriarimalala, J. H., Rakotozandriny, J. N., Andriamandroso, A. L. H., Penot, E., Naudin, K., Dugué, P., Tillard, E., Decruyenaere, V., Salgado, P., 2013. Creating synergies between conservation agriculture and cattle production in crop–livestock farms: a study case in the Lake Alaotra Region of Madagascar. *Exp. Agric.* 49, 352–365.
- Andriulo, A., Jérôme, M., 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping.
- Baker, J. M., Ochsner, T. E., Venterea, R. T., Griffis, T. J., 2007. Tillage and soil carbon sequestration—What do we really know? *Agric. Ecosyst. Environ.* 118, 1–5. doi: 10.1016/j.agee.2006.05.014
- Balesdent, J., Derrien, D., Fontaine, S., Kirman, S., Klumpp, K., Loiseau, P., Marol, C., Nguyen, C., Pén, M., Personeni, E., Robin, C., 2011. Contribution de la rhizodéposition aux matières organiques du sol, quelques implications pour la modélisation de la dynamique du carbone. *Etude Gest. Sols* 18, 201–216.
- Balesdent, J., Mariotti, A., Boisgontier, D., 1990. Effect of tillage on soil organic carbon mineralization estimated from ¹³C abundance in maize fields. *J. Soil Sci.* 41, 587–596. doi: 10.1111/j.1365-2389.1990.tb00228.x
- Barbera, V., Poma, I., Gristina, L., Novara, A., Egli, M., 2012. Long-term cropping systems and tillage management effects on soil organic carbon stock and steady state level of C sequestration rates in a semiarid environment. *Land Degrad. Dev.* 23, 82–91. doi: 10.1002/ldr.1055
- Beri, V., Sidhu, B. S., Bahl, G. S., Bhat, A. K., 1995. Nitrogen and phosphorus transformations as affected by crop residue management practices and their influence on crop yield. *Soil Use Manag.* 11, 51–54. doi: 10.1111/j.1475-2743.1995.tb00496.x
- Blanchard, M., Vayssieres, J., Dugué, P., Vall, E., 2013. Local Technical Knowledge and Efficiency of Organic Fertilizer Production in South Mali: Diversity of Practices. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* 37, 672–699. doi: 10.1080/21683565.2013.775687
- Blanchart, E., Albrecht, A., Bernoux, M., Brauman, A., Chotte, C., Feller, C., Ganry, F., Hien, E., Manlay, R. J., Masse, D., others, 2005. Organic matter and biofunctioning in tropical sandy soils and implications for its management, in: *Management of Tropical Sandy Soils for Sustainable Agriculture. A Holistic Approach for Sustainable Development of Problem Soils in the Tropics*. pp. 224–241.
- Bolinder, M. A., Angers, D. A., Bélanger, G., Michaud, R., Laverdière, M. R., 2002a. Root biomass and shoot to root ratios of perennial forage crops in eastern Canada. *Can. J. Plant Sci.* 3, 731–737.
- Bolinder, M. A., Angers, D. A., Bélanger, G., Michaud, R., Laverdière, M. R., 2002b. Root biomass and shoot to root ratios of perennial forage crops in eastern Canada. *Can. J. Plant Sci.* 3.
- Bolinder, M. A., Angers, D. A., Dubuc, J. P., 1997. Estimating shoot to root ratios and annual carbon inputs in soils for cereal crops. *Crops* 9.
- Bolinder, M. A., Angers, D. A., Giroux, M., Laverdi, M. R., 1999. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea Mays* L.). *Plant Soil* 85–91.
- Bolinder, M. A., Janzen, H. H., Gregorich, E. G., Angers, D. A., VandenBygaart, A. J., 2007. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agric. Ecosyst. Environ.* 118, 29–42. doi:10.1016/j.agee.2006.05.013
- Bridgit, T. ., Potty, N. ., 2002. Effect of cultural management on root characteristics and productivity of rice in laterite soil. *Trop. Agric.* 59–62.
- Bruelle, G., Naudin, K., Scopel, E., Domas, R., Rabeharisoa, L., Tittonell, P., 2015. Short- to mid-term impact of Conservation Agriculture on yield variability of upland rice: evidence from farmer's fields in Madagascar. *Exp. Agric.* 51, 66–84. doi:10.1017/S0014479714000155

- Busari, M. A., Kukal, S. S., Kaur, A., Bhatt, R., Dulazi, A. A., 2015. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 3, 119–129. doi: 10.1016/j.iswcr.2015.05.002
- Campbell, C. A., Bowren, K. E., Schnitzer, M., Zentner, R. P., Townley-Smith, L., 1991. Effect of crop rotations and fertilization on soil organic matter and some biochemical properties of a thick Black Chernozem. *Can. J. Soil Sci.* 71, 377–387.
- Castellanos-Navarrete, A., Tittonell, P., Rufino, M. C., Giller, K. E., 2015. Feeding, crop residue and manure management for integrated soil fertility management – A case study from Kenya. *Agric. Syst., Biomass use trade-offs in cereal cropping systems: Lessons and implications from the developing world* 134, 24–35. doi: 10.1016/j.agry.2014.03.001
- Chopart, J. L., Azevedo, M. C. B., Le Mézo, L., Marion, D., 2010. Functional Relationship Between Sugarcane Root Biomass and Length for Cropping System Applications. *Sugar Tech* 12, 317–321. doi: 10.1007/s12355-010-0044-2
- Chopart, J. L., Le Mézo, L., Vauclin, M., 2012. Modelling the Potential Root Water Extraction Ratio in soil: application to sugarcane on the island of Reunion. Presented at the proceedings of 8th Symposium Int. Society Root Research, Dundee (GB) ISRR Edit, p.1.
- Coleman, K., Jenkinson, D. S., 2014. RothC - A model for the turnover of carbon in soil.
- Corbeels, M., de Graaff, J., Ndah, T. H., Penot, E., Baudron, F., Naudin, K., Andrieu, N., Chirat, G., Schuler, J., Nyagumbo, I., Rusinamhodzi, L., Traore, K., Mzoba, H. D., Adolwa, I. S., 2014. Understanding the impact and adoption of conservation agriculture in Africa: A multi-scale analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 187, 155–170. doi: 10.1016/j.agee.2013.10.011
- Dabat, M. -H., Jenn-Treyer, O., Razafimandimby, S., Bockel, L., 2008. L’histoire inachevée de la régulation du marché du riz à Madagascar. *Économie Rurale* 75–89. doi: 10.4000/economierurale.535
- Di, H. J., Cameron, K. C., 2002. Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies. *Agroecosystems* 46, 237–256.
- Diogo, R. V. C., Schlecht, E., Buerkert, A., Rufino, M. C., van Wijk, M. T., 2013. Increasing nutrient use efficiency through improved feeding and manure management in urban and peri-urban livestock units of a West African city: A scenario analysis. *Agric. Syst.* 114, 64–72. doi: 10.1016/j.agry.2012.09.001
- Doris, M. S., 2010. Influence of *Crotalaria laburnifolia* L. on microflora for increasing soil fertility. *Int. J. Plant Sci.* 5, 439–441.
- Douzet, J. -M., Scopel, E., Muller, B., Rakotoarisoa, J., Albrecht, A., Razafindramanana, N. C., 2010. Effets des systèmes de cultures en semis direct avec couverture végétale sur le ruissellement et l’érosion des cultures pluviales des Hautes Terres de Madagascar. *Etude Gest. Sols* 17, 131–142.
- Dugué, P., 2017. L’intégration de l’agriculture et de l’élevage.
- Dugué, P., Kettela, V., Michel, I., Simon, S., 2017. Diversité des processus d’innovation dans les systèmes maraîchers des Niayes (Sénégal): entre intensification conventionnelle et transition agroécologique. *Technol. Innov.* 17.
- Dusserre, J., Chopart, J. -L., Douzet, J. -M., Rakotoarisoa, J., Scopel, E., 2012. Upland rice production under conservation agriculture cropping systems in cold conditions of tropical highlands. *Field Crops Res.* 138, 33–41. doi: 10.1016/j.fcr.2012.09.011
- Dusserre, J., Raveloson, H., Michellon, R., Gozé, E., Auzoux, S., Sester, M., 2017. Conservation agriculture cropping systems reduce blast disease in upland rice by affecting plant nitrogen nutrition. *Field Crops Res.* 204, 208–221. doi: 10.1016/j.fcr.2017.01.024
- Equiterre, 2009. Amendements et Fertilisation. Chapitre 12, “Les amendements organiques : fumiers et composts”, manuscrit du Guide de gestion globale de la ferme maraîchère biologique et diversifiée.
- Erenstein, O., Gérard, B., Tittonell, P., 2015. Biomass use trade-offs in cereal cropping systems in the developing world: Overview. *Agric. Syst.* 134, 1–5. doi: 10.1016/j.agry.2014.12.001
- Fan, J., McConkey, B., Wang, H., Janzen, H., 2016. Root distribution by depth for temperate agricultural crops. *Field Crops Res.* 189, 68–74. doi: 10.1016/j.fcr.2016.02.013
- FAO, 2015. Conservation agriculture. URL <http://www.fao.org/ag/ca/1a.html> (accessed 11.8.16).
- Fenni, M., Machane, Y., 2010. Changement climatique et agriculture de conservation.

- Ferreira, A. de O., Sá, J. C. de M., Harms, M. G., Miara, S., Briedis, C., Quadros Netto, C., Santos, J. B. dos, Canalli, L. B., 2012. Carbon balance and crop residue management in dynamic equilibrium under a no-till system in Campos Gerais. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 36, 1583–1590. doi: 10.1590/S0100-06832012000500022
- Franzluebbers, A. J., 2008. Soil organic carbon sequestration with conservation agriculture in the south eastern USA: potential and limitations. Citeaser.
- Friedrich, T., Kienzie, J., 2007. Conservation Agriculture: Impact on farmers' livelihoods, labour, mechanization and equipment. URL <http://www.fao.org/ag/ca/ca-publications/acsad%202007.pdf> (accessed 11.7.16).
- Gachengo, C. N., Vanlauve, B., Palm, C. A., Cadisch, G., 2004. Chemical Characterisation of a Standard Set of Organic Materials. Delve RJ Probert ME Eds, Modeling Nutrient Management in Tropical Cropping Systems. ACIAR Proceedings 48–53.
- Gathumbi, S. M., 2004. Root recovery of five tropical tree and shrub species by sieves of different mesh sizes. *Agrofor. Syst.* 60, 233–237.
- Gathumbi, S. M., 2001. Agroforestry: N₂-fixing trees in Integrated Agriculture., in: Giller, K. E. (Ed.), Nitrogen Fixation in Tropical Cropping Systems. CABI, Wallingford, pp.222–250.
- Gathumbi, S. M., Cadisch, G., Giller, K. E., 2002. 15N natural abundance assessments of N₂-fixation by mixtures of trees and shrubs in improved fallows. *Soil Biol. Biochem.* 34, 1059–1071.
- Gattinger, A., Muller, A., Haeni, M., Skinner, C., Fliessbach, A., Buchmann, N., Mader, P., Stolze, M., Smith, P., Scialabba, N. E. -H., Niggli, U., 2012. Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109, 18226–18231. doi: 10.1073/pnas.1209429109
- Ghosh, B. N., Dogra, P., Sharma, N. K., Bhattacharyya, R., Mishra, P. K., 2015. Conservation agriculture impact for soil conservation in maize–wheat cropping system in the Indian sub-Himalayas. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 3, 112–118. doi: 10.1016/j.iswcr.2015.05.001
- Giller, K. E., Witter, E., Corbeels, M., Tittonell, P., 2009. Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Res.* 114, 23–34. doi: 10.1016/j.fcr.2009.06.017
- Godefroy, 1988. Observation de l'enracinement du stylosanthes, de la crotalaire et du flémingia dans un sol volcanique du Cameroun. *Fruits* 43, 79–86.
- Granier, P., Razafindratsita, R., 1970. Contribution à l'étude de la culture dérobée de fourrages en rizière dans la région de Tananarive. *Rev. Elev. Méd. vét. Pays trop* 23, 101–108.
- Haque, M. M., Rahman, A., Ahmed, M., Masud, M. M., Sarker, M. M. R., others, 2007. Effect of nitrogen and potassium on the yield and quality of ginger in hill slope. *J Soil Nat* 1, 36–39.
- Hooker, B. A., Morris, T. F., Peters, R., Cardon, Z. G., 2005. Long-term Effects of Tillage and Corn Stalk Return on Soil Carbon Dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 188. doi: 10.2136/sssaj2005.0188
- Howden, S. M., Soussana, J. -F., Tubiello, F. N., Chhetri, N., Dunlop, M., Meinke, H., 2007. Adapting agriculture to climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104, 19691–19696. doi: 10.1073/pnas.0701890104
- Huijsmans, J. F. M., Hol, J. M. G., Hendriks, M., 2001. Effect of application technique, manure characteristics, weather and field conditions on ammonia volatilization from manure applied to grassland. *NJAS-Wagening. J. Life Sci.* 49, 323–342.
- Husson, O., Charpentier, H., Michellon, R., Razanamparany, C., Moussa, N., Enjalric, F., Naudin, K., Rakotondramanana, Séguy, L., 2012. Fiches techniques plantes de couverture : Graminées annuelles. Avoine : Avena sativa et Avena strigosa.
- Hylander, L. D., Ae, N., 1999a. Nutrient distribution around roots of Brachiaria, maize, sorghum, and upland rice in an Andisol. *Soil Sci. Plant Nutr.* 45, 617–626. doi: 10.1080/00380768.1999.10415825
- Hylander, L. D., Ae, N., 1999b. Nutrient distribution around roots of Brachiaria, maize, sorghum, and upland rice in an Andisol. *Soil Sci. Plant Nutr.* 45, 617–626. doi: 10.1080/00380768.1999.10415825
- INSTAT, 2010. Enquête périodique auprès de ménage 2010. Rapport principal.
- IPCC, R. K. (Ed.), 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report . Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (Eds.)], IPCC. ed. Geneva, Switzerland.

- Janssen, B. H., 1984. A simple method for calculating decomposition and accumulation of “young” soil organic matter. *Plant Soil* 76, 297–304. doi: 10.1007/BF02205588
- Jia, J., Yu, D., Zhou, W., Zhou, L., Bao, Y., Meng, Y., Dai, L., 2015. Variations of soil aggregates and soil organic carbon mineralization across forest types on the northern slope of Changbai Mountain. *Acta Ecol. Sin.* 35, 1–7. doi: 10.1016/j.chnaes.2014.03.008
- Johnson, J. M. -F., Allmaras, R. R., Reicosky, D. C., 2006. Estimating Source Carbon from Crop Residues, Roots and Rhizodeposits Using the National Grain-Yield Database. *Agron. J.* 98, 622. doi: 10.2134/agronj2005.0179
- Kätterer, T., Bolinder, M. A., Andrén, O., Kirchmann, H., Menichetti, L., 2011. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agric. Ecosyst. Environ.* 141, 184–192. doi: 10.1016/j.agee.2011.02.029
- Kaye, J. P., Quemada, M., 2017. Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 37. doi: 10.1007/s13593-016-0410-x
- Kintche, K., 2011. Analyse et modélisation de l'évolution des indicateurs de la fertilité des sols cultivés en zone cotonnière du Togo. *Earth Sciences. Université de Bourgogne.*
- Kisselle, K., Garrett, Fu, Hendrix, P., Crossley Jr, Coleman, D., Potter, 2001. Budgets for root-derived C and litter-derived C: comparison between conventional tillage and no tillage soils. *Soil Biol. Biochem.* 33, 1067–1075. doi: 10.1016/S0038-0717(01)00012-8
- Koga, N., Tsuji, H., 2009. Effects of reduced tillage, crop residue management and manure application practices on crop yields and soil carbon sequestration on an Andisol in northern Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 55, 546–557. doi: 10.1111/j.1747-0765.2009.00385.x
- Kong, A. Y. Y., Six, J., Bryant, D. C., Denison, R. F., Kessel, C. van, 2005. The relationship between Carbon input, aggregation, and Soil organic carbon stabilization in Sustainable Cropping Systems. *Soil Sci. Soc. Am.* 69, 1078–1085.
- Lal, R., 1997. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. *Soil Tillage Res.* 43, 81–107. doi: 10.1016/S0167-1987(97)00036-6
- Lal, R., Negassa, W., Lorenz, K., 2015. Carbon sequestration in soil. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 15, 79–86. doi: 10.1016/j.cosust.2015.09.002
- Legros, J. -P., 2013. Major soil groups of the world: ecology, genesis, properties and classification. CRC Press, Boca Rayton.
- Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B. M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M., Caron, P., Cattaneo, A., Garrity, D., Henry, K., Hottle, R., Jackson, L., Jarvis, A., Kossam, F., Mann, W., McCarthy, N., Meybeck, A., Neufeldt, H., Remington, T., Sen, P. T., Sessa, R., Shula, R., Tibu, A., Torquebiau, E. F., 2014. Climate-smart agriculture for food security. *Nat. Clim. Change* 4, 1068–1072. doi: 10.1038/nclimate2437
- Liu, X., Herbert, S. J., Hashemi, A. M., Zhang, X., Ding, G., others, 2006. Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation-a review. *Plant Soil Environ.* 52, 531.
- Loague, K., Green, R. E., 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *J. Contam. Hydrol.* 7, 51–73. doi: 10.1016/0169-7722(91)90038-3
- Martínez, E., Fuentes, J. P., Silva, P., Valle, S., Acevedo, E., 2008. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil Tillage Res.* 99, 232–244. doi: 10.1016/j.still.2008.02.001
- Mary, B., Guérif, J., 1994. Intérêts et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol. *Cah. Agric.* 247–257.
- Mathew, M. M., Majule, A. E., Sinclair, F., Marchant, R., 2016. Relationships between on-farm tree stocks and soil organic carbon along an altitudinal gradient, Mount Kilimanjaro, Tanzania. *For. Trees Livelihoods* 25, 255–266. doi: 10.1080/14728028.2016.1202790
- Mazzilli, S. R., Kemanian, A. R., Ernst, O. R., Jackson, R. B., Piñeiro, G., 2015a. Greater humification of belowground than aboveground biomass carbon into particulate soil organic matter in no-till corn and soybean crops. *Soil Biol. Biochem.* 85, 22–30. doi: 10.1016/j.soilbio.2015.02.014
- Mazzilli, S. R., Kemanian, A. R., Ernst, O. R., Jackson, R. B., Piñeiro, G., 2015b. Greater humification of belowground than aboveground biomass carbon into particulate soil organic

- matter in no-till corn and soybean crops. *Soil Biol. Biochem.* 85, 22–30. doi: 10.1016/j.soilbio.2015.02.014
- Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z. -S., Cheng, K., Das, B. S., Field, D. J., Gimona, A., Hedley, C. B., Hong, S. Y., Mandal, B., Marchant, B. P., Martin, M., McConkey, B. G., Mulder, V. L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A. C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C. -C., Vågen, T. -G., van Wesemael, B., Winowiecki, L., 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59–86. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.01.002
- Moreau D., 1987 : L'analyse de l'élaboration du rendement du riz : les outils de diagnostic. Paris.
- Morisset, C., Raymond, P., Mocquot, B., Pradet, A., 1982. Adaptation des végétaux à l'hypoxie et à l'anoxie. *Bull. Société Bot. Fr. Actual. Bot.* 129, 73–89. doi: 10.1080/01811789.1982.10826562
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Naudin, K., Bruelle, G., Salgado, P., Penot, E., Scopel, E., Lubbers, M., de Ridder, N., Giller, K. E., 2015. Trade-offs around the use of biomass for livestock feed and soil cover in dairy farms in the Alaotra lake region of Madagascar. *Agric. Syst.* 134, 36–47. doi: 10.1016/j.agry.2014.03.003
- Naudin, K., Gozé, E., Balarabe, O., Giller, K. E., Scopel, E., 2010. Impact of no tillage and mulching practices on cotton production in North Cameroon: A multi-locational on-farm assessment. *Soil Tillage Res.* 108, 68–76. doi: 10.1016/j.still.2010.03.002
- 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? *Agron. Environ. Sociétés* 5, 39–46.
- Nodichao, L., Chopart, J. -L., Roupsard, O., Vauclin, M., Aké, S., Jourdan, C., 2011. Genotypic variability of oil palm root system distribution in the field. Consequences for water uptake. *Plant Soil* 341, 505–520. doi: 10.1007/s11104-010-0663-0
- Ouédraogo, E., Mando, A., Stroosnijder, L., 2006. Effects of tillage, organic resources and nitrogen fertiliser on soil carbon dynamics and crop nitrogen uptake in semi-arid West Africa. *Soil Tillage Res.* 91, 57–67. doi: 10.1016/j.still.2005.11.004
- Penot, E., Gaele, D., 2011. Impact de la crise de 2009 sur les élevages laitiers dans le Vakinankaratra, Madagascar, in: Atelier thématique“ Agronomie et Ecosystème” Programmes Corus, Aires-Sud et Aire Développement.
- Poeplau, C., Don, A., 2015. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 200, 33–41. doi: 10.1016/j.agee.2014.10.024
- Rabeharisoa, L., 2004. Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagasacr. Université d'Antananarivo, Antananarivo, Madagascar.
- Raboin, L. M., Ramanantsoanirina, A., Dusserre, J., Razasolofonahary, F., Tharreau, D., Lannou, C., Sester, M., 2012. Two-component cultivar mixtures reduce rice blast epidemics in an upland agrosystem: *Cultivar mixtures and blast in upland rice*. *Plant Pathol.* 61, 1103–1111. doi: 10.1111/j.1365-3059.2012.02602.x
- Raboin, L. -M., Ramanantsoanirina, A., Dzido, J. L., Andriantsimialona, D., Tharreau, D., Radanielina, T., Ahmadi, N., 2011. Upland (aerobic) rice breeding for the harsh environment of the High Plateau of Madagascar, in: Innovation and Partnerships to Realize Africa's Rice Potential. Presented at the Second Africa Rice Congress, Bamako, Mali: 22-26 March 2010.
- Raboin, L. -M., Ramanantsoanirina, A., Dzido, J. -L., Frouin, J., Radanielina, T., Tharreau, D., Dusserre, J., Ahmadi, N., 2013. Upland rice varieties for the highlands of Madagascar: Review of a 25-year-long breeding program. *Cah. Agric.* 450–458. doi:10.1684/agr.2013.0624
- Raboin, L. -M., Randriambololona, T., Radanielina, T., Ramanantsoanirina, A., Ahmadi, N., Dusserre, J., 2014. Upland rice varieties for smallholder farming in the cold conditions in Madagascar's tropical highlands. *Field Crops Res.* 169, 11–20. doi: 10.1016/j.fcr.2014.09.006
- Rakotoarisoa, J., Belières, J. -F., Salgado, P., 2016. Intensification agricole à Madagascar : Politiques publiques et trajectoires d'exploitations agricoles du Vakinankaratra.

- Rakotoarisoa, J., Olivier R., Dusserre, J., Muller, B., Douzet, J. -M., Michellon, R., Moussa, N., Razafinjara, L. A., Rajeriarison, J., Scopel, E., 2010. Bilan de l'azote minéral au cours du cycle du riz pluvial sous systèmes de couverture végétale en sol ferrallitique argileux à Madagascar. *Etude Gest. Sols* 17,2, 169–186.
- Ralaifenomanana, F. R., 2009. *Sadc_Analyse-de-la-Situation-Nationale-.pdf*. URL http://www.agriculture.gov.mg/communication/wp-content/uploads/sites/2/2014/06/Sadc_Analyse-de-la-Situation-Nationale-.pdf (accessed 5.31.17).
- Rasambainarivo, J. H., Ranaivoarivelo, N., 2006. Country Pasture/Forage Resource Profiles.
- Rasamizafimanantsoa, A. H., Rakotonirainy, H. J., Randianaivoarivony, J. M., Rahetlah, B. V., Razafimpamo, H. L., Andriansolo, H. M., Rzanamparany, F. C., Moussa, N., Michellon, R., Rakotondramanana, Husson, O., Lecomte, P., Naudin, K., Tillard, E., Randrianasolo, J., Séguy, L., Thomas, P., Marbest-Massin, V., Michon, A., Fertil, G., 2008. Conduite des systèmes de culture sur couverts végétaux et affouragement des vaches laitières : Guide pour les Hautes Terres de Madagascar. FIFAMANOR / TAFA / CIRAD / ARP.
- Raunet, M., 1981. Le milieu physique de la région volcanique Ankaratra - Vakinankaratra - Itasy (Madagascar). *Aptitude à la culture du blé pluvial*.
- Razafimahatratra, H. M., 2011. Sols malgaches et spectroscopie dans le moyen infrarouge : classification, caractérisation et sensibilité au climat. ESSA, Antananarivo, Madagascar.
- Razafimbelo, T., 2005. Stockage et protection du carbone dans un sol ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres Malgaches. ENSAP.
- Razafimbelo, T., Albrecht, A., Basile, I., Borschneck, D., Bourgeon, G., Feller, C., Ferrer, H., Michellon, R., Moussa, N., Muller, B., Oliver, R., Razanamparany, C., Seguy, L., Swarc, M., 2006. Effets de système de culture à couverture végétale sur le stockage du carbone dans un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar. *Etude Gest. Sols* 13, 2, 113–127.
- Rice, C. W., Smith, M. S., 1984. Short-Term Immobilization of Fertilizer Nitrogen at the Surface of No-Till and Plowed Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48, 295. doi: 10.2136/sssaj1984.03615995004800020013x
- Robert, M., 2001. Soil carbon sequestration for improved land management, World soil resources reports. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- Rufino, M. C., Rowe, E. C., Delve, R. J., Giller, K. E., 2006. Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop–livestock systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 112, 261–282. doi: 10.1016/j.agee.2005.08.028
- 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. *Livest. Sci.* 112, 273–287. doi: 10.1016/j.livsci.2007.09.011
- Sakala, W. D., Cadisch, G., Giller, K. E., 2000. Interactions between residues of maize and pigeonpea and mineral N fertilizers during decomposition and N mineralization. *Soil Biol. Biochem.* 32, 679–688. doi: 10.1016/S0038-0717(99)00204-7
- Salgado, P., Tillard, E., 2012. Conservation des ressources fertilisantes dans les systèmes d'élevage des pays du Sud.
- Salgado, P., Tillard, E., Rarivoarimanana, H. B., Decruyenaere, V., Lecomte, P., 2014. Management practices to conserve the fertilizer N value of dairy manure in Vakinankaratra region, Madagascar, in: *Agroecology for Africa. Presented at the Agroecology and sustainability of tropical rainfed cropping systems*, Antananarivo, Madagascar.
- Santos, N. Z. dos, Dieckow, J., Bayer, C. I., Molin, R., Favaretto, N., Pauletti, V., Piva, J. T., Nicolás Zendonadi dos Santos, J. D., A. N. F., A. V. P., 2010. Forages, cover crops and related shoot and root additions in no-till rotations to C sequestration in a subtropical Ferralsol. *Soil Tillage Res.* 111, 208–218. doi: 10.1016/j.still.2010.10.006
- Schuman, G., Janzen, H., Herrick, J., 2002. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environ. Pollut.* 116, 391–396. doi: 10.1016/S0269-7491(01)00215-9
- Scopel, E., Findeling, A., Guerra, E. C., Corbeels, M., 2005. Impact of direct sowing mulch-based cropping systems on soil carbon, soil erosion and maize yield. *Agron. Sustain. Dev.* 25, 425–432. doi: 10.1051/agro:2005041

- Séguy, L., Husson, O., Charpentier, H., Bouzinac, S., Michellon, R., Chabanne, A., Boulakia, S., Tivet, F., Naudin, K., Enjalric, F., Chabierski, S., Rakotondralambo, P., Ramaroson, I., Rakotondramanana, 2009. Principes et intérêts des SCV, in: Manuel pratique du semis direct sur couverture végétale permanente, SCV application à Madagascar. GSDM/CIRAD.
- Sester, M., Raveloson, H., Tharreau, D., Dusserre, J., 2014. Conservation agriculture cropping system to limit blast disease in upland rainfed rice. *Plant Pathol.* 63, 373–381. doi: 10.1111/ppa.12099
- Singh, M., Khan, M. M. A., Naeem, M., 2016. Effect of nitrogen on growth, nutrient assimilation, essential oil content, yield and quality attributes in *Zingiber officinale* Rosc. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* 15, 171–178. doi: 10.1016/j.jssas.2014.11.002
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E., Paustian, K., 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant Soil* 241, 155–176.
- Skjemstad, J. O., Spouncer, L. R., Cowie, B., Swift, R. S., 2004. Calibration of the Rothamsted organic carbon turnover model (RothC ver. 26.3), using measurable soil organic carbon pools. *Aust. J. Soil Res.* 42, 79. doi: 10.1071/SR03013
- Smith, E., Gordon, R., Bourque, C., Campbell, A., Générmont, S., Rochette, P., Mkhabela, M., 2009. Simulated management effects on ammonia emissions from field applied manure. *J. Environ. Manage.* 90, 2531–2536. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.01.012
- Smith, P., Davies, C. A., Ogle, S., Zanchi, G., Bellarby, J., Bird, N., Boddey, R. M., McNamara, N. P., Powlson, D., Cowie, A., Noordwijk, M., Davis, S. C., Richter, D. D. B., Kryzanowski, L., Wijk, M. T., Stuart, J., Kirton, A., Eggar, D., Newton-Cross, G., Adhya, T. K., Braimoh, A. K., 2012. Towards an integrated global framework to assess the impacts of land use and management change on soil carbon: current capability and future vision. *Glob. Change Biol.* 18, 2089–2101. doi: 10.1111/j.1365-2486.2012.02689.x
- Snyder, C. S., Davidson, E. A., Smith, P., Venterea, R. T., 2014. Agriculture: sustainable crop and animal production to help mitigate nitrous oxide emissions. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 9, 46–54.
- Srinivasarao, C., Lal, R., Kundu, S., Thakur, P. B., 2015. Conservation Agriculture and Soil Carbon Sequestration, in: Farooq, M., Siddique, K. H. M. (Eds.), *Conservation Agriculture*. Springer International Publishing, Cham, pp.479–524.
- Stocker, T. F., Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds.), 2013. *Climate change 2013: the physical science basis ; summary for policymakers, a report of Working Group I of the IPCC, technical summary, a report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail and frequently asked questions ; part of the Working Group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change, New York.
- Subaedah, S., Aladin, A., Nirwana, 2016. Fertilization of Nitrogen, Phosphor and Application of Green Manure of *Crotalaria Juncea* in Increasing Yield of Maize in Marginal Dry Land. *Agric. Agric. Sci. Procedia* 9, 20–25. doi: 10.1016/j.aaspro.2016.02.114
- Tennant, D., 1975. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *J Ecol* 955–1001.
- Thierfelder, C., Mwila, M., Rusinamhodzi, L., 2013. Conservation agriculture in eastern and southern provinces of Zambia: Long-term effects on soil quality and maize productivity. *Soil Tillage Res.* 126, 246–258. doi: 10.1016/j.still.2012.09.002
- Tittonell, P., Gérard, B., Erenstein, O., 2015. Tradeoffs around crop residue biomass in smallholder crop-livestock systems – What’s next? *Agric. Syst.* 134, 119–128. doi: 10.1016/j.agry.2015.02.003
- Triberti, L., Nastri, A., Baldoni, G., 2016. Long-term effects of crop rotation, manure and mineral fertilisation on carbon sequestration and soil fertility. *Eur. J. Agron.* 74, 47–55. doi: 10.1016/j.eja.2015.11.024
- Turmel, M. -S., Speratti, A., Baudron, F., Verhulst, N., Govaerts, B., 2015. Crop residue management and soil health: A systems analysis. *Agric. Syst.* 134, 6–16. doi: 10.1016/j.agry.2014.05.009
- Ussiri, D. A. N., Lal, R., 2009. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. *Soil Tillage Res.* 104, 39–47. doi: 10.1016/j.still.2008.11.008

- Van der Hoek, K. W., 1998. Nitrogen efficiency in global animal production. *Environ. Pollut.* 102, 127–132.
- Wang, Y., Ji, H., Wang, R., Guo, S., Gao, C., 2017. Impact of root diversity upon coupling between soil C and N accumulation and bacterial community dynamics and activity: Result of a 30 year rotation experiment. *Geoderma* 292, 87–95. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.01.014
- Wassenaar, T., Dumoulin, F., Farinet, J. -L., Paillat, J. -M., Thuriès, L., Tillard, E., Vayssières, J., Vigne, M., 2016. Agricultural Organic Waste Recycling to Reduce Greenhouse Gas Emissions, in: *Climate Change and Agriculture Worldwide*. Torquebiau Emmanuel, Dordrecht.
- Wilts, A. R., Reicosky, D. C., Allmaras, R. R., Clapp, C. E., 2004. Long-Term Corn Residue Effects: Harvest Alternatives, Soil Carbon Turnover, and Root-Derived Carbon. *Soil Sci Soc Am J* 68, 1342–1351.
- Woodward, F., Osborne, C., 2000. The representation of root processes in models addressing the responses of vegetation to global change. *New Phytol.* 147, 223–232.
- Yasuhito, S., Tomoyuki, H., Taniyama, I., 2004. Modified Rothamsted Carbon Model for Andosols and Its Validation: Changing Humus Decomposition Rate Constant with Pyrophosphate-Extractable AI. *Soil Sci Plant Nutr, Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition* 50, 149–158.
- Yoshida, S., Hasegawa, S., 1982. The rice root system: its development and function, in: *Drought Resistance in Crops with Emphasis on Rice*. Internat. Rice Res. Inst, Manila.
- Zhang, Y., Cai, X., Lv, J., 2016. Size and dynamics of soil organic carbon stock in cropland of the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Agric. Ecosyst. Environ.* 222, 125–132. doi: 10.1016/j.agee.2015.11.028
- Zheng, C., Jiang, Y., Chen, C., Sun, Y., Feng, J., Deng, A., Song, Z., Zhang, W., 2014. The impacts of conservation agriculture on crop yield in China depend on specific practices, crops and cropping regions. *Crop J.* 2, 289–296. doi: 10.1016/j.cj.2014.06.006

Annexes

Annexe 1 : Résultats de comparaison (p-value) de distribution racinaire pendant les deux années de l'expérimentation en milieu contrôlé (C) et paysan (P), à l'intérieur d'une même profondeur maximum ($d_{\max}$) en cm, avec $\alpha = 0,05$

Culture			Riz		Maïs, Haricot, Crotalaire							Avoine						
Dispositif			C	P	C						P		C		P			
Système de culture			Pure		Associée			Pure			Associée		Coupe 1		Floraison	Coupe 1	Floraison	
Type d'association			M+C	M+H	M+H	M+C	M+C	M+H	M+H	M+H								
	Année	d _{max}	2015	2015	2015	2014	2015	2014	2015	2015	2015	2014	2015	2015	2015	2015	2015	
Riz	2014	60	NS	NS														
Maïs associé (M+C)	2014	135			NS	-	-	-	*	-								
Maïs associé (M+H)	2014	135			-	-	-	-	-	**	**							
Maïs pur (M+C)	2015	180			*	-	-	NS	-	NS	-							
Maïs pur (M+H)	2015	180			-	*	-	-	NS	-	*							
Haricot pur (M+H)	2015	45			-	NS	-	-	-	-	-							
Haricot pur (M+H)	2015	60			-	-	NS	-	-	-	NS							
Avoine à floraison	2015	75										NS	NS	-	NS	-		
Avoine à floraison	2015	105										-	-	-	-		NS	
Crotalaire pur en octobre	2014	150			-	-	-	NS	NS	-	-							

** si $0,001 < P < 0,01$; * si $0,01 < P < 0,05$; NS si $P > 0,05$ ou non significatif

Annexe 2 : Résultats de simulation du stock de C dans le sol avec Rothamsted C de 2002 en 2011

Etape 1 : Création d'un fichier d'apport de carbone dans le sol et de caractéristiques du climat d'Andranomanelatra

Edit existing land management file

Save Cancel

Description: 02_11

	Plant Residues (t C / ha) (range)	FYM (t C / ha) (range)	Soil cover (range)
January	0	0	Covered
February	0	0	Covered
March	0.49	0	Covered
April	0	0	Covered
May	0	0	Covered
June	0.67	0	Covered
July	0	0	Covered
August	0	0	Covered
September	0	0	Covered
October	0	0.81	Covered
November	0	0	Covered
December	0	0	Covered

Edit existing weather data

Save Cancel

Description: 02-13andrano

	Temperature (oC) (range)	Rainfall (mm) (range)	Evaporation (mm) (range)
January	19.7	321.6	119.2
February	19.5	198.4	109
March	19.3	170.3	112.1
April	18	65.9	98.8
May	16	32.1	85.8
June	13.6	9.1	75.3
July	12.9	14.4	79.5
August	14	12.4	106.8
September	16	8.3	131.1
October	18.3	91.2	151.6
November	19.1	150.4	140
December	19.6	287.3	134.6
Clay % (range)	65.66	Depth (cm) (range)	40

Etape 2 : Calcul de l'apport en carbone nécessaire pour maintenir à l'équilibre le stock de carbone dans le sol

Calculate : Plant inputs : Knowing total carbon

Cancel

Weather: and1

Land management: mat1.dat

Measured Total Carbon: 105.59

DPM / RPM Ratio: 1.44

Year sampled (between 1860-2100): 2000

Run

Modelled values

Total Organic Carbon (t C / ha): 105.5370

Biomass C (t C / ha): 2.2108

Radiocarbon content: 26.1

Plant input per month

January	0.0000
February	0.0000
March	3.4947
April	0.0000
May	0.0000
June	4.7784
July	0.0000
August	0.0000
September	0.0000
October	0.0000
November	0.0000
December	0.0000
Total	8.2731

IOM (0.049 * TOC + 1.139)

9.8879

Résultats obtenus montrant les valeurs des différents compartiments de carbone du sol prédites avec le modèle Roth C

Radiocarbon activity scaling factor = 1.0000

RadioDelta

CarbonAgeValue

DPM 0.15310.43-0.05

RPM 12.96223.42-0.43

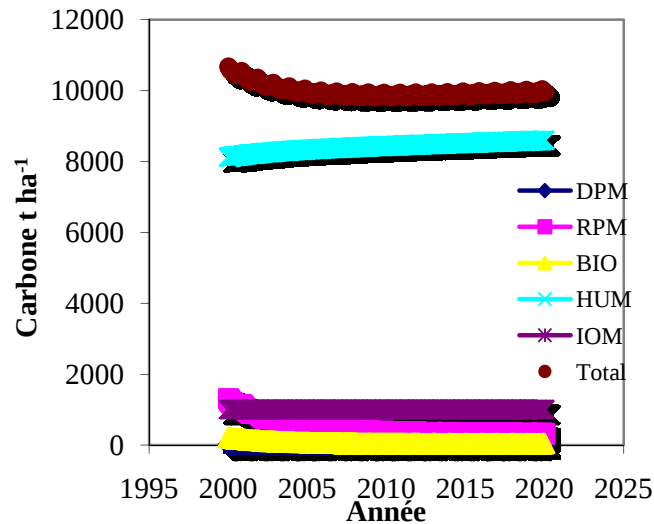
BIO 2.210811.69-1.45

HUM 80.323160.46-7.50

IOM 9.887850000.00 -998.02

Total 105.5370840.06-99.27

Simulation de l'évolution du stock de C par Roth C en utilisant les quantités réelles de carbone apportées par les biomasses végétales et fumier.



Annexe 3 : Stock de carbone dans le sol mesuré en 2002 et en 2011 et quantité de carbone restituée sur la parcelle depuis 2002 jusqu'en 2011

	t_0 (2002)	t_8 (2011)	$t_0 - t_8$	Par an
	t C ha ⁻¹	t C ha ⁻¹	t C ha ⁻¹	t C ha ⁻¹
Stock de C dans le sol				
CA	104,69	104,97	-	-
CT	107,34	104,06	-	-
(CA-CT)	105,59	104,66	-	-
Apport en C				
Fumier	-	-	7,33	0,81
Biomasses aériennes	-	-	6,01	0,67
Racines	-	-	4,42	0,49
Total	-	-	17,76	1,97

Annexe 4 : Coefficients d'humification k_1 des biomasses végétales et animale et de minéralisation k_2

	k_1	k_2	Pays	Références
Biomasse végétale aérienne	0.25	0.15 à 0.20		(Kintche 2011)
	0.23-0.24	0.034	Togo	(Kintche 2011)
	0.06 à 0.30	0.03 à 0.16	Argentine	(Andriulo et Jérôme 1999)
	0.08 à 0.10			(Kätterer et al. 2011)
	0.15			
	0.30 à 0.40			(Janssen 1984)
	0.11, 0.18, 0.23		Madagascar	(Razafimbelo 2005)
	0.32 à 0.13	0.15	France	Guérif (1986) cité par (Mary and Guérif 1994)
Racines	0.17 à 0.23	0.008 à 0.019	France	Balesdent et al., (1990) cité par (Mary et Guérif 1994)
		0.019 à 0.024	Royaume Uni	(Mary et Guérif 1994)
	0.16 à 0.30 ⁽¹⁾			(Andriulo et Jérôme 1999)
Fumier	0.60			(Janssen 1984)
	0.30 à 0.34			(Mary et Guérif 1994; Kätterer et al. 2011)



Coordination,
conseils,
laboratoire,
« hanihany » pour
destresser



Formations stat
R, encadrement,
matériels,
bureau, conseils,

Membres
de jury
Equipes
CAM TICE



Financements,

BGF :
séjour à
Montpellier



Paysans : parcelles
d'expérimentation,
échange de
connaissances



Laboratoire
d'accueil,
conseils,
divertissements



Meilleur encadrement,
guides, conseils, aide
financière (AI), analyse
statistique, formation R,
distractions



Supervision ;
analyses sol,
racines ; Comité
de thèse ; séjour
pour un congrès
à Montpellier



SPIR :
formation,
prédiction



Ecole
doctorale



Techniciens,
stagiaires en
M2, Ingénieurs,
Collègues
doctorants,
Assistants



Encouragement,
soutien, prière,
distractions,
patience, amour
inconditionnel



Ma famille :
soutien,
encouragement,
vacance familiale,
distractions

Merci!

RESUME

L'agriculture de conservation (AC) a été introduite à Madagascar dans l'objectif de maintenir la durabilité des cultures pluviales. L'AC et l'élevage de ruminants doivent être considérés comme activités complémentaires et synergiques mais des compétitions pour l'utilisation de la biomasse peuvent néanmoins apparaître dans certaines circonstances. En effet, l'AC permet de fournir des ressources fourragères pour l'alimentation des ruminants. En contrepartie les ruminants recyclent une partie de la biomasse ingérée, mais non digérée, sous forme de fumier. Les ruminants permettent ainsi d'améliorer la fertilité du sol via l'apport de fumier. Le recyclage des nutriments au sein d'une exploitation mixte d'agriculture-élevage peut être optimisé en améliorant les techniques de conservation des résidus des cultures et des effluents d'élevage. Cette thèse contribue à une optimisation de gestion des biomasses végétales et animales afin d'améliorer la production agricole. Le principe est de favoriser le recyclage des biomasses végétales et animales en limitant les pertes en nutriments au sein de l'exploitation agricole. Pour cela, trois systèmes de culture pluviale ont été suivis en milieu contrôlé durant trois campagnes (2013 à 2016) : (i) rotation du riz avec du maïs associé à crotalaire en AC, (ii) rotation du riz avec de l'avoine en AC et (iii) rotation du riz avec du maïs associé au haricot en labour. À l'intérieur de chaque système de culture, quatre types de fertilisation ont été comparés : (i) aucune fertilisation, (ii) 5 t ha⁻¹ de fumier conventionnel, (iii) 5 t ha⁻¹ de fumier amélioré et (iv) 5 t ha⁻¹ de fumier conventionnel + fumure minérale. Nous avons installé et suivi également les systèmes de culture *ii* et *iii*, et les deux fertilisations *ii* et *iii* en milieu paysan, pendant deux campagnes (2013 à 2015). Les résultats ont montré que les rendements en paille ou en grain en milieu contrôlé et paysan sont similaires. Les rendements en grain de riz sont 27% et 48% supérieurs en utilisant le fumier amélioré ou la fumure minérale, respectivement, par rapport à l'utilisation de fumier conventionnel et la situation sans fertilisation. La rotation riz//maïs associé à la crotalaire est la seule qui permet d'augmenter le stock en carbone du sol, quel que soit le taux d'exportation de la biomasse végétale quand le stock en C initial est inférieur à 160 t C ha⁻¹. Elle permet également une restitution importante de l'azote au sol (jusqu'à 160 kg N ha⁻¹ an⁻¹) en comparant avec les deux autres systèmes (45 kg N ha⁻¹ an⁻¹), grâce à la forte production de la crotalaire. En contrepartie, la rotation riz//avoine permet une production importante de lait (jusqu'à 3 600 l ha⁻¹ an⁻¹) par rapport aux autres rotations, riz//maïs associé au haricot (19% inférieur) et riz//maïs associé à la crotalaire (41% inférieur). En revanche, la rotation riz//maïs associé au haricot permet une production plus importante en grain plus riche en protéine par rapport aux deux autres rotations. Cependant, en tenant compte de toutes les productions (lait, grain, azote restitué au sol), la rotation riz//maïs associé à la crotalaire est la plus intéressante économiquement, avec un gain de 300 à 400 kAr ha⁻¹ an⁻¹ par rapport à la rotation riz//avoine, et de 60 à 600 kAr ha⁻¹ an⁻¹ par rapport à la rotation riz//maïs associé au haricot, suivant le taux d'exportation de la biomasse végétale consommable par les animaux. Pour chaque système de culture, la vente du lait produit, en valorisant la biomasse végétale comme fourrage, permet d'acheter une forte quantité de fumier et des engrais minéraux pour améliorer la fertilité du sol afin d'accroître les productions en grain dont celles du riz pour l'alimentation humaine. Le choix du système de culture utilisé dépendra, au final, de l'objectif de chaque paysan et de la taille de son exploitation.

Mots clés : agriculture de conservation, biomasse végétale, fumier amélioré, grain, lait, racines