

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

Laingo I. Rasolofo^{1*}, Julie Dusserre², Paulo Salgado³, Tantely Razafimbelo⁴, Krishna Naudin²

Résumé

La pauvreté du sol en éléments nutritifs disponibles pour les plantes est l'un des facteurs responsables 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 testés 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 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+*Crotalaria grahamiana* 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 %) et 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%) par rapport au fumier conventionnel. Pendant l'année où la pluie a été mal répartie durant la campagne agricole, 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%. 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 in available nutrients for plants 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 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 grahamiana* 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 and total yields, ie total grain yield of all plants used in each system, were significantly 27 and 22 to 27% 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. 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

¹FOFIFA, BP 230, 110 Antsirabe, Madagascar

²CIRAD, UPR AIDA, F-34398 Montpellier, France

³CIRAD, UMR SELMET, BP 230, 110 Antsirabe, Madagascar

⁴LRI, Université d'Antananarivo, BP 3383, 101 Antananarivo, Madagascar

*Auteur correspondant: lgrints@hotmail.fr

Svp citer cet article comme suit : Rasolofo L.I. et al., 2018. Impacts des innovations agro-écologiques sur le rendement en grain des cultures pluviales. Akon'ny Ala 34 : 13-26

1. Introduction

À Madagascar la demande alimentaire croissante et l'augmentation de la pression foncière sur les bas-fonds 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 (i) les engrais organiques (fumier) et/ou (ii) 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 (Husson *et al.*, 2013) pour limiter l'érosion et pour améliorer la durabilité des cultures pluviales (Naudin *et al.*, 2010 ; Thierfelder *et al.*, 2013 ; Bruelle *et al.*, 2015). Par ailleurs, la biomasse végétale peut également être exploitée comme une ressource fourragère (Naudin *et al.*, 2015 ; Erenstein *et al.*, 2015 ; Tittonell *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 et recycler les nutriments dans le fumier (Salgado and Tillard, 2012 ; Diogo *et al.*, 2013).

Dans cette étude nous avons comparé les impacts sur la production des cultures de ces deux approches 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, 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), avec de fait une production de riz *a priori* élevée, 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) ?

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 17°C avec des températures minimale de 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 1). 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 1).

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

Paramètres	Unités	Site contrôlé ⁽¹⁾ Andranomanelatra (n = 96)		Site paysan Andranomanelatra ⁽²⁾ (n = 12)		Site paysan – Betafo ⁽²⁾ (n = 7)	
		0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm
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	-	-	-	-	-

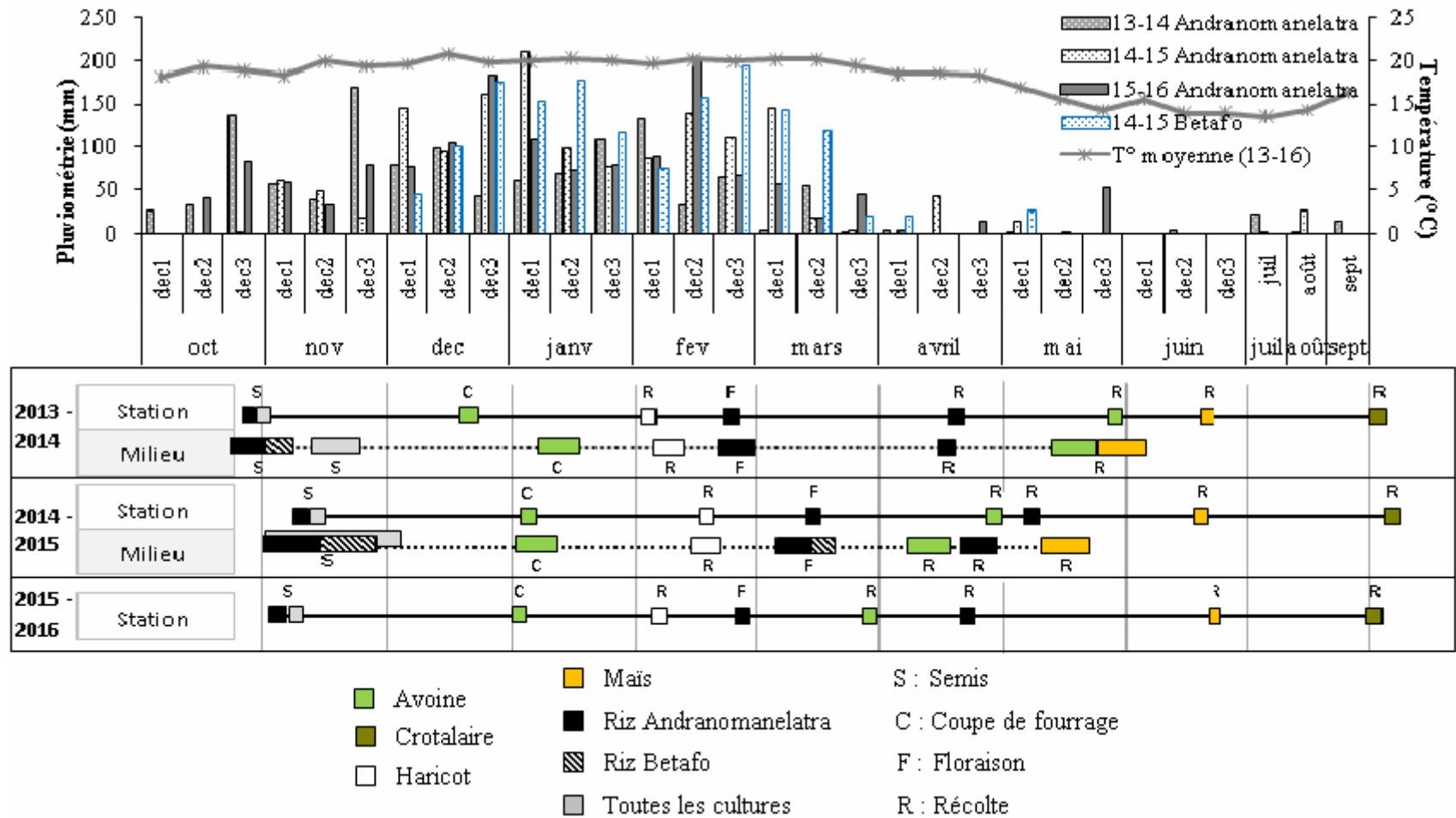


Fig. 1. Pluviométrie et températures décadaires des trois campagnes culturales avec les dates des opérations culturales

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 *C. grahamiana*, 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 gN.kg⁻¹MS, 5,5 gP.kg⁻¹MS contre 13 gN.kg⁻¹MS, 3,6 gP.kg⁻¹MS 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 d'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 2. Les opérations culturales telles que semis, coupe d'avoine et récolte avec les dates de floraison de riz sont résumées dans la Figure 1.

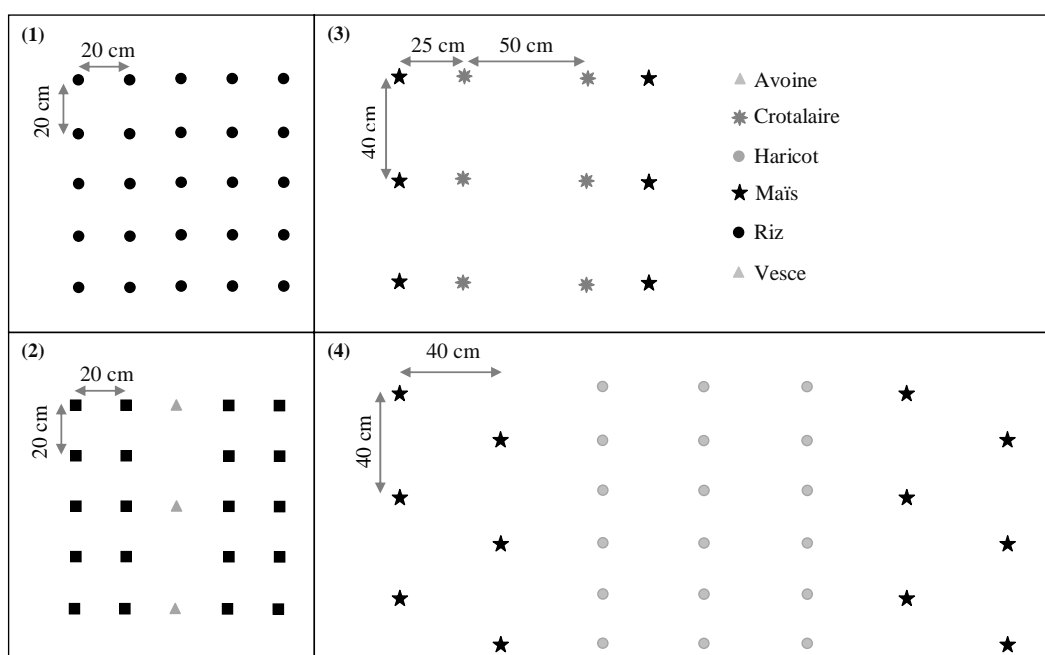


Fig. 2. Espacement entre plantes de : (1) riz, (2) association de l'avoine+vesce, (3) association du maïs+crotalaire, (4) association du maïs+haricot

2.3. Mesures effectuées

En milieu contrôlé le rendement a été mesuré dans un carré de 5x5m au milieu de chaque parcelle (10x10m). En milieu réel, il 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 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 telles que le nombre de plants par m², le nombre de panicules par plant, le nombre d'épilletts par panicule, le pourcentage de graines pleines et le poids de 1000 grains.

2.4. Analyse des données

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 4 parcelles en milieu contrôlé et 19 parcelles en milieu paysan. Les variables dépendantes considérées sont les rendements en grain de riz, maïs, haricot et les composantes de rendement de riz (plants/m², panicules/m², épilletts/m², graines pleines/m², poids de mille grains) ; les variables explicatives (ou facteurs) sont le type de fertilisation et les systèmes de culture.

Des modèles linéaires généraux (GLM) ont d'abord été utilisés pour analyser les effets des facteurs sur une variable dépendante. Le modèle considéré 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 la moyenne (intercept) ; α_i l'effet campagne cultural ; β_j l'effet système de culture ; σ_k l'effet fertilisation ; $(\alpha\beta)_{ij}$ l'effet de l'interaction campagne cultural/système de culture ; $(\alpha\sigma)_{ik}$ l'effet de l'interaction campagne cultural/fertilisation ; $(\beta\sigma)_{jk}$ l'effet de l'interaction système de culture/fertilisation ; $(\alpha\beta\sigma)_{ijk}$ l'interaction des effets de ces trois facteurs et ε_{ijk} les résidus. Pour une variable dépendante donnée, l'AIC (critère d'information d'Akaike ; valeur minimale ; Akaike, 1974) a été considéré pour sélectionner le meilleur modèle (avec ou sans interactions). Les variables dépendantes ayant fait l'objet de GLM sont les rendements en grain (i) de riz, (ii) de maïs et (iii) de haricot. Pour chacune des variables analysées, la normalité des résidus du modèle utilisé et l'égalité de variance ont été testées. Des transformations logarithmiques ou la mise en racine carrée ont été effectuées pour une normalisation des données quand cela s'est avéré nécessaire.

Les variables (rendements en grains et composantes du rendement de riz) suivant des distributions normales ont ensuite été soumises à des analyses de variances (ANOVA) avec des tests de comparaison multiple de Tukey HSD (High Significant Difference ; $p < 0,05$) afin d'évaluer les effets des facteurs campagne cultural, fertilisation, système de culture et de leurs éventuelles interactions. Les autres variables ont été soumises aux tests non-paramétriques de Kruskal Wallis ($p < 0,05$) en utilisant la procédure de Dunn comme test de comparaison multiple (Dunn, 1964).

3. Résultats

3.1. Production de riz

En milieu contrôlé, le meilleur modèle intègre les effets des 3 facteurs et des interactions entre (i) Campagne agricole x Fertilisation d'une part et celles (ii) Campagne agricole x Système de culture, d'autre part (AIC = -53,14 et $R^2 = 0,71$; Tableau 2). Les rendements en grains de riz des trois campagnes sont respectivement de 3,8 ; 2,2 et 3,4 t.ha⁻¹. Quelle que soit l'année, le riz dans le système de culture R//A+V a le rendement le plus faible (Figure 3, Tableaux 2 et 3). 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 présentent des différences significatives 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 (Tableau 3). Concernant les différents types de fertilisation, les mêmes tendances de réponse de fertilisation sur la production de riz sont observées ($F_0 < F_{uC} < F_{uA} < F_m$) pendant les trois campagnes mais les différences ne sont significatives qu'en 2016 (Tableau 2, Figure 3). Le rendement en grain est de 2,2 t.ha⁻¹ sans l'apport de fertilisation, 3,1 t.ha⁻¹ avec l'apport de FuC et augmente respectivement jusqu'à 4,2 t.ha⁻¹ et 4,3 t.ha⁻¹ avec l'apport de FuA et Fm.

En milieu réel, le meilleur modèle tient surtout compte de la campagne agricole et de la fertilisation (AIC = -41,84 et $R^2 = 0,69$; Tableau 2). Les rendements en riz en 2014 sont supérieurs d'environ 50% à ceux observés en 2015 (Figure 4, Tableau 4). 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'épilletts par panicule. Les rendements en riz sont similaires sur les deux zones étudiées l'année 2014, alors qu'en 2015 la quantité produite de grains est trois fois plus élevée sur les parcelles autour d'Andranomanelatra que sur les parcelles de Betafo (Tableau 4). Concernant la fertilisation, l'utilisation du FuA a permis d'augmenter significativement de l'ordre de 26% les rendements la première année. 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 t.ha⁻¹ contre 1,7 t.ha⁻¹, respectivement. La comparaison des systèmes de culture n'a été faite que pour la deuxième campagne agricole, 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 riz après avoine en AC et après M+H en labour.

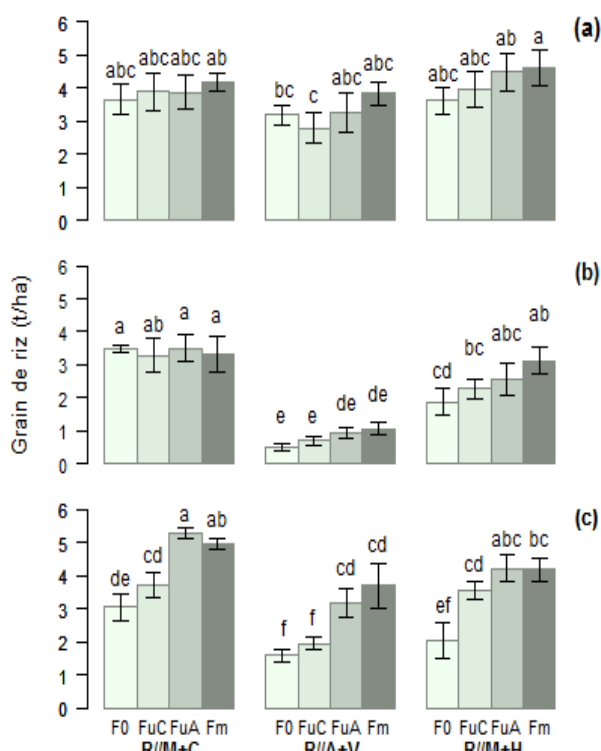


Fig.3. Production en grain de riz durant les trois campagnes culturales (a) 2014, (b) 2015, (c) 2016, en milieu contrôlé.

Fm : fumure minérale, FuA : fumier amélioré, FuC : fumier conventionnel, F0 : sans fertilisation, R//A+V : riz//avoine+vesce, R//M+C : riz//maïs+crotalaire, R//M+H : riz//maïs+haricot. Les lettres a, b, ... indiquent les résultats des tests de comparaisons multiples (p<0,05)

En considérant les deux premières années de l'expérimentation et les deux types de fertilisation (FuC et FuA), les rendements moyens en milieux paysan et contrôlé sont similaires ; ils sont respectivement de 2,6 t.ha⁻¹ (n=32) et 2,8 t.ha⁻¹ (n=138). En milieu contrôlé, le rendement est compris entre les valeurs minimale et maximale de celui en milieu paysan. Il varie respectivement de 0,1 à 7,0 t.ha⁻¹ et 0,5 à 6,0 t.ha⁻¹ en milieux paysan et contrôlé. 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.

Tab. 2. Effets de différents facteurs sur le rendement en grain de riz

α_i : effet campagne agricole ; β_j : effet système de culture ; σ_k : effet fertilisation ; R//M+C : riz//maïs+crotalaire ; R//A+V : riz//avoine+vesce ; R//M+H : riz//maïs+haricot ; Fm : fumure minérale ; FuA : fumier amélioré, FuC : fumier conventionnel ; F0 : sans fertilisation ; ES : erreur standard ; μ : intercept et ε : résidus

Facteurs/ Traitements	Effets	ES	p-value	
En milieu contrôlé				
2013-2016	$Y_{i,j,k} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \sigma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\sigma)_{ik} + \varepsilon_{ijk}$; AIC = -53,14 et R ² = 0,71			
Intercept	3,8756	0,2773	< 0,0001 ***	
Campagne agricole	2014	0,0000	0,0000	
	2015	-1,6683	0,3922	< 0,0001 ***
	2016	-1,5917	0,3922	< 0,0001 ***
Systèmes de culture	R//M+H	0,0000	0,0000	
	R//M+C	-0,2706	0,2773	0,3311
	R//A+V	-0,9012	0,2773	0,0015 **
Fertilisation	F0	0,0000	0,0000	
	Fm	0,7125	0,3202	0,0279 *
	FuA	0,3767	0,3202	0,2417
	FuC	0,0583	0,3202	0,8558
Campagne agricole x Fertilisation	2014 x Fm	0,0000	0,0000	
	2015 x Fm	-0,1658	0,4529	0,00382 **
	2016 x Fm	1,3350	0,4529	0,98828
	2014 x FuA	0,0000	0,0000	
	2015 x FuA	-0,0067	0,4529	0,00053 ***
	2016 x FuA	1,6108	0,4529	0,86730
	2014 x FuC	0,0000	0,0000	
	2015 x FuC	0,0758	0,4529	0,08816.
	2016 x FuC	0,7783	0,4529	0,00272 **
Campagne agricole x Système de culture	2015 x R//M+C	1,1993	0,3922	0,00993 **
	2016 x R//M+C	1,0268	0,3922	0,05432.
	2015 x R//A+V	-0,7618	0,3922	0,98858
2016 x R//A+V	0,0056	0,3922	0,00382 **	
En milieu paysan				
2013-2015	$Y_{i,j,k} = \mu + \alpha_i + \sigma_k + (\alpha\sigma)_{ik} + \varepsilon_{ik}$; AIC = -41,84 et R ² = 0,69			
Intercept	3,9129	0,2078	< 0,0001***	
Campagne agricole	2014	0,0000	0,0000	
	2015	-1,5755	0,3101	< 0,0001***
Fertilisation	FuA	0,0000	0,0000	
	FuC	-1,0245	0,2939	0,0006 ***
Campagne agricole x Fertilisation	2014 x FuC	0,0000	0,0000	
	2015 x FuC	0,3861	0,4385	0,380177
	2014 x FuA	0,0000	0,0000	
2015 x FuA	0,0000	0,0000		

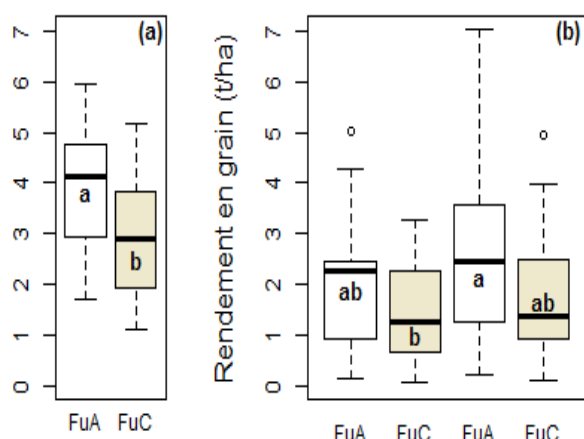


Fig. 4. Rendement de riz en milieu paysan pendant les deux saisons de culture : (a) 2014, (b) 2015

FuA : fumier amélioré, FuC : fumier conventionnel, R//A+V : riz//avoine+vesce, R//M+H : riz//maïs+haricot. Les lettres a, b, ... indiquent les résultats des tests de comparaisons multiples ($p < 0,05$)

3.2. Production des cultures en rotation avec le riz

En milieu contrôlé, le rendement en maïs est essentiellement affecté par (i) la campagne agricole, (ii) la fertilisation ainsi que par (iii) la combinaison de la campagne agricole et du système de culture ($AIC = -110,52$; $R^2 = 0,58$; Tableau 5). Le rendement en haricot quant à lui est essentiellement affecté par (i) la campagne agricole, (ii) la fertilisation et (iii) leur combinaison ($AIC = -224,83$; $R^2 = 0,70$; Tableau 5). Comme pour le riz, les rendements du maïs et du haricot sont inférieurs en 2015 comparés aux deux autres campagnes. L'effet « campagne agricole » étant significatif ainsi que ses interactions avec les autres facteurs (Tableau 5), nous avons décidé de conduire une analyse séparée des trois campagnes (Tableau 6). Le rendement du maïs est généralement faible avec un maximum de $1,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Il est similaire entre les systèmes R//M+C et R//M+H les deux premières campagnes. Il est significativement supérieur avec R//M+C lors de la troisième campagne, 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.

En milieu paysan, le GLM montre que les facteurs (i) campagne agricole et (ii) zone ont des effets significatifs sur le rendement en grain de maïs ($AIC = -109,49$; $R^2 = 0,50$; Tableau 5) et du haricot ($AIC = -153,76$; $R^2 = 0,63$; Tableau 5). Le rendement est significativement supérieur en première année par rapport à la deuxième année, quel que soit les types des plantes cultivées (Tableau 7).

Le rendement de haricot est beaucoup plus élevé en milieu paysan qu'en milieu contrôlé, respectivement

$0,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en moyenne contre $0,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. 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 $1,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Le rendement d'avoine est de l'ordre de $0,8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ quel que soit le site expérimental, avec une distribution très variée de $0,02$ à $3,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en milieu paysan et une concentration de rendement entre $0,2$ à $2,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en milieu contrôlé.

3.3. Production totale en grain de chaque système de culture

La production totale en grain (Figure 5) du système R//A+V est significativement plus faible que celle des deux autres systèmes quelles que soient les campagnes culturales ($4,6$, $1,4$ et $3,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ sur deux rotations en 2014, 2015, 2016), dont 70 à 84% proviennent du riz. 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 $4,8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ 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 $2,8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ sur deux rotations pour R//M+H.

L'effet de la fertilisation sur la production totale en grain n'est visible que pendant la troisième campagne agricole. Elle est significativement supérieure en utilisant FuA et Fm, quel que soit le système de culture et est équivalente avec FuC et F0 (Figure 5).

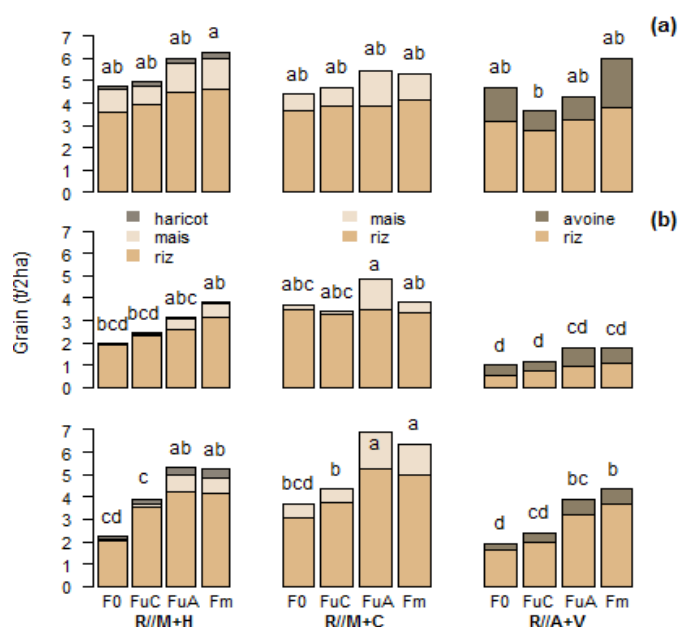


Fig. 5. Rendement de chaque système de culture des parcelles contrôlées en (a) 2014, (b) 2015 et (c) 2016 Fm : fumure minérale, FuA : fumier amélioré, FuC : fumier conventionnel, F0 : sans fertilisation, R//A+V : riz//avoine+vesce, R//M+C : riz//maïs+crotalaire, R//M+H : riz//maïs+haricot. Les lettres a, b, ... indiquent les résultats des tests de comparaisons multiples ($p < 0,05$)

Tab. 3. Composante de rendement et rendement en grain de riz de 2014 à 2016, en milieu contrôlé suivant les systèmes de culture et les fertilisations.

Fm : fumure minérale, FuA : fumier amélioré, FuC : fumier conventionnel, FO : sans fertilisation, GP : graines pleines, PMG : poids des 1000 grains, R//M+C : riz//maïs+crotalaire, R//M+H : riz//maïs+haricot ; R//A+V : riz//avoine+vesce. Les lettres a, b et c indiquent les résultats des tests de comparaisons multiples ($p < 0,05$)

Facteurs/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)
Campagne agricole	2013-2014	105,03 a	3,76 a	388,60 a	53,10 b	20774 a	88,68 a	18291 a	25,68 b	3,77 a
	2014-2015	105,03 a	2,86 b	301,04 b	42,38 c	13883 b	80,67 b	11817 b	26,79 a	2,22 b
	2015-2016	109,43 a	3,17 b	343,52 b	63,59 a	21895 a	74,62 c	16014 a	26,45 ab	3,45 a
p-value		> 0,05	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,01	< 0,001
2013-2014										
Système de culture	R//M+H	113,72 a	3,81 a	426,22 a	51,89 a	22192 a	89,65 a	18832 a	24,92 a	4,16 a
	R//M+C	102,95 ab	3,83 a	384,55 ab	52,61 a	20425 a	90,46 a	18457 a	25,95 a	3,89 ab
	R//A+V	98,44 b	3,63 a	355,03 b	54,79 a	19705 a	85,93 b	17583 a	26,17 a	3,26 b
p-value		< 0,05	> 0,05	< 0,05	> 0,05	> 0,05	< 0,05	> 0,05	> 0,05	< 0,05
2014-2015										
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
	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
	R//A+V	101,74 b	1,99 b	196,35 c	28,99 c	5738 c	66,48 b	3789 c	29,46 a	0,81 c
p-value		< 0,05	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
2015-2016										
Système de culture	R//M+H	105,38 a	3,11 a	323,61 a	62,43 a	20314 b	72,97 a	14601 a	26,24 a	3,50 ab
	R//M+C	110,59 a	3,41 a	374,99 a	67,43 a	25665 a	72,62 a	17922 a	26,25 a	4,26 a
	R//A+V	112,33 a	2,98 a	331,94 a	60,89 a	19707 b	78,28 a	15519 a	26,85 a	2,61 b
p-value		> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	< 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	< 0,001
Fertilisation	FO	100,46 a	2,95 a	291,66 b	60,34 a	17945 a	74,15 a	12834 b	26,11 a	2,23 b
	FuC	112,50 a	3,19 a	357,41 a	61,10 a	21717 a	72,30 a	15762 ab	26,73 a	3,07 b
	FuA	107,87 a	3,18 a	355,56 a	66,36 a	23495 a	76,55 a	17708 a	26,50 a	4,22 a
	Fm	116,90 a	3,35 a	369,44 a	66,55 a	24422 a	75,50 a	17751 a	26,45 a	4,28 a
p-value		> 0,05	> 0,05	< 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	< 0,05	> 0,05	< 0,001

Tab. 4. Composante de rendement et rendement de riz de 2014 à 2015 des parcelles paysannes suivant les zones considérées et les fertilisations

FuA : fumier amélioré, FuC : fumier conventionnel, GP : graines pleines, PMG : poids des 1000 grains, R//M+H : riz//maïs+haricot ; R//A+V : riz//avoine+vesce. Les lettres a, b et c indiquent les résultats des tests de comparaisons multiples (p<0,05)

Facteurs/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)
Campagne agricole	2013-2014	159,16 b	3,42 a	522,84 a	47,36 a	25276 a	83,89 a	21079 a	25,03 b	3,40 a
	2014-2015	206,29 a	1,69 b	337,56 b	30,01 b	10579 b	83,76 a	8798 b	26,44 a	2,01 b
p-value		< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	> 0,05	< 0,001	< 0,001	< 0,001
2013-2014										
Zone	Andranomanelatra	159,93 a	3,61 a	552,65 a	48,98 a	27184 a	82,97 a	22502 a	25,36 a	3,40 a
	Betafo	157,87 a	3,10 b	480,25 b	45,03 a	22096 b	85,21 a	18707 a	24,56 a	3,40 a
p-value		> 0,05	< 0,05	< 0,05	> 0,05	< 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05
Fertilisation	FuC	159,11 a	3,22 b	488,38 b	48,98 a	22946 b	80,86 b	18286 b	24,81 a	2,89 b
	FuA	159,20 a	3,63 a	557,29 a	45,73 a	27606 a	86,92 a	23872 a	25,24 a	3,91 a
p-value		> 0,05	< 0,05	< 0,05	> 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,01	> 0,05	< 0,001
2014-2015										
Zone	Andranomanelatra	210,16 a	1,91 a	381,54 a	32,92 a	12725 a	85,32 a	10560 a	26,65 a	2,60 a
	Betafo	197,78 a	1,22 b	240,80 b	22,01 b	4676 b	79,46 a	3955 b	25,84 a	0,79 b
p-value		> 0,05	< 0,001	< 0,001	< 0,01	< 0,001	> 0,05	< 0,001	> 0,05	< 0,001
Fertilisation	FuC	217,62 a	1,59 a	338,31 a	26,98 b	9277 a	83,31 a	7788 a	26,07 a	1,70 b
	FuA	194,96 a	1,81 a	336,81 a	33,05 a	11880 a	84,21 a	9808 a	26,80 a	2,34 a
p-value		> 0,05	> 0,05	> 0,05	< 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	< 0,001

Tab. 5. Effets des différents facteurs sur le rendement en grain des cultures en rotation avec le riz

α_i effet campagne agricole ; β_j effet système de culture ; σ_k : effet fumure minérale ; R//M+C : riz//maïs+crotalaire ; R//A+V : riz//avoine+vesce ; R//M+H : riz//maïs+haricot ; Fm : fertilisation minérale ; FuA : fumier amélioré ; FuC : fumier conventionnel ; F0 : sans fertilisation ; θ_i effet zone (Andranomanelatra et Betafo) ; ES : erreur standard ; μ : intercept et ε : résidus

Facteurs/Traitements		Culture					
		Maïs			Haricot		
		Effets	ES	p-value	Effets	ES	p-value
En milieu contrôlé		$Y_{i,j,k} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \sigma_k + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$; AIC = -110,52 ; R ² = 0,58			$Y_{i,j} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ij}$; AIC = -224,83 ; R ² = 0,70		
2013-2016							
Intercept	Intercept	0,8402	0,0821	< 0,0001***	0,1444	0,0432	0,0019 **
Campagne agricole	2014	0,0000	0,0000	-	0,0000	0,0000	-
	2015	-0,5063	0,0987	< 0,0001***	-0,1424	0,0611	0,0255 *
	2016	-0,4740	0,0928	< 0,0001***	-0,0587	0,0611	0,3433
Fertilisation	Fm	0,3340	0,0790	< 0,0001***	0,0738	0,0611	0,2348
	FuA	0,4318	0,0790	< 0,0001***	0,0636	0,0611	0,3046
	FuC	0,0053	0,0790	0,9465	0,0337	0,0611	0,5841
	F0	0,0000	0,0000	-	0,0000	0,0000	-
Système de culture	R//M+C	-0,0581	0,0928	0,5329	-	-	-
	R//M+H	0,0000	0,0000	-	-	-	-
Campagne agricole x Système de culture	2014 : R//M+C	0,0000	0,0000	-	-	-	-
	2015 : R//M+C	0,1645	0,1355	0,2281	-	-	-
	2016 : R//M+C	0,4809	0,1355	0,0004***	-	-	-
Campagne agricole x Fertilisation	2014 x Fm	-	-	-	0,0000	0,0000	-
	2015 x Fm	-	-	-	-0,0465	0,0864	0,5935
	2016 x Fm	-	-	-	0,2251	0,0864	0,0133 *
	2014 x FuA	-	-	-	0,0000	0,0000	-
	2015 x FuA	-	-	-	-0,0180	0,0864	0,8360
	2016 x FuA	-	-	-	0,1602	0,0864	0,0721 .
	2014 x FuC	-	-	-	0,0000	0,0000	-
	2015 x FuC	-	-	-	-0,0187	0,0864	0,8300
	2016 x FuC	-	-	-	0,0690	0,0864	0,4301
En milieu paysan		$Y_{i,j,kl} = \mu + \alpha_i + \theta_l + \varepsilon_{il}$; AIC = -109,49 ; R ² = 0,50			$Y_{i,j,kl} = \mu + \alpha_i + \theta_l + \varepsilon_{il}$; AIC = -153,76 ; R ² = 0,63		
2013-2015							
Intercep		1,2558	0,0758	< 0,0001***	0,6582	0,0449	< 0,0001***
Campagne agricole	2014	0,0000	0,0000	-	0,0000	0,0000	-
	2015	-0,5243	0,0969	< 0,0001***	-0,5715	0,0641	< 0,0001***
Zone	Andranomanelatra	0,0000	0,0000	-	0,0000	0,0000	-
	Betafo	-0,2698	0,0997	0,0092 **	-0,1449	0,0685	0,0398 *

4. Discussions

4.1. Variation de rendement au cours des trois campagnes culturales

Le rendement le plus faible a été obtenu lors de la deuxième campagne agricole avec une moyenne de grain total de 2,7 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 1) 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).

Tab. 6. Rendement des cultures en rotation suivant les saisons culturales, systèmes de culture et fertilisation en milieu contrôlé

Fm : fumure minérale, FuA : fumier amélioré, FuC : fumier conventionnel, F0 : sans fertilisation, R//A+V : riz//avoine+vesce ; R//M+C : riz//maïs+crotalaire, R//M+H : riz//maïs+haricot. Les lettres a, b et c indiquent les résultats des tests de comparaisons multiples ($p < 0,05$)

Facteurs	Traitements	Grain				
		Maïs	Haricot	Avoine	Total	
Campagne agricole	2013-2014	1,09 a	0,19 a	1,38 a		
	2014-2015	0,48 b	0,03 b	0,62 b		
	2015-2016	0,73 b	0,24 a	0,52 b		
	p-value	< 0,001	< 0,001	< 0,001		
2013-2014						
Fertilisation	F0	0,86 a	0,14 a	1,48 ab		
	FuC	0,80 a	0,18 a	0,84 b		
	FuA	1,45 a	0,21 a	1,01 b		
	Fm	1,28 a	0,22 a	2,17 a		
	p-value	> 0,05	> 0,05	< 0,05		
Système de culture	R//M+C	1,06 a	-	-	1,06 a	A _{MC} ⁽¹⁾
	R//M+H	1,13 a	0,19	-	1,32 a	A _{MB} ⁽¹⁾
	R//A+V	-	-	1,38	1,38 a	A _{AV} ⁽¹⁾
	p-value	> 0,05	-	-	> 0,05	
2014-2015						
Fertilisation	F0	0,16 b	0,01 a	0,48 b		
	FuC	0,14 b	0,02 a	0,47 b		
	FuA	0,94 a	0,05 a	0,86 a		
	Fm	0,57 ab	0,03 a	0,67 ab		
	p-value	< 0,001	> 0,05	< 0,05		
Système de culture	R//M+C	0,55 a	-	-	0,55 a	B _{MC} ⁽¹⁾
	R//M+H	0,40 a	0,03	-	0,35 b	B _{MB} ⁽¹⁾
	R//A+V	-	-	0,62	0,62 a	B _{AV} ⁽¹⁾
	p-value	> 0,05	-	-	< 0,001	
2015-2016						
Fertilisation	F0	0,35 b	0,09 b	0,29 a		
	FuC	0,39 b	0,19 ab	0,44 a		
	FuA	1,19 a	0,31 ab	0,63 a		
	Fm	1,01 ab	0,38 a	0,69 a		
	p-value	< 0,001	< 0,05	> 0,05		
Système de culture	R//M+C	1,05 a	-	-	1,05 a	A _{MC} ⁽¹⁾
	R//M+H	0,42 b	0,24	-	0,66 ab	C _{MB} ⁽¹⁾
	R//A+V	-	-	0,52	0,52 b	B _{AV} ⁽¹⁾
	p-value	< 0,001	-	-	< 0,001	

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

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 réel. 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 réel 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 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 un retard de la date de floraison qui a eu lieu pendant une période sèche (Figure 1). Cela est responsable d'une diminution du nombre de panicules et épislets par panicule.

Tab.7. Rendement des cultures en rotation avec le riz en milieu paysan en 2014 et 2015

FuA : fumier amélioré, FuC : fumier conventionnel, R//A+V : riz//avoine+vesce ; R//M+H : riz//maïs+haricot. Les lettres a, b et c indiquent les résultats des tests de comparaisons multiples ($p < 0,05$)

Facteurs	Traitements	Grain (t/ha)			
		Mais	Haricot	Avoine	Total
Campagne agricole	2013-2014	1,50 a	0,60 a	1,03 a	-
	2014-2015	0,49 b	0,07 b	0,52 b	-
p-value		< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
2013-2014					
Système de culture x Fertilisation	R//A+V x FuC	-	-	0,91 a	0,91 b
	R//A+V x FuA	-	-	1,15 a	1,15 b
	R//M+H x FuC	1,47 a	0,58 a	-	2,06 a
	R//M+H x FuA	1,53 a	0,63 a	-	2,16 a
p-value		> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05

4.3. Rendement avec les différentes fertilisations

Le fumier amélioré, plus riche en azote, permet d'augmenter le nombre de panicules et le nombre des graines pleines par m² (Tableau 3, Tableau 4) 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 agricole. 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).

4.4. Rendement 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 riz est déjà observé dès la première campagne de notre étude parce que les

parcelles sont en AC depuis plus de dix ans consécutifs. Le rendement 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 FO 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 crotalaire qui produit une importante quantité de biomasse, jusqu'à 16 t.ha⁻¹ (données non présentées), permet l'enrichissement en azote disponible pour les plantes en rotation ou en association avec elle. *C. grahamiana* 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. Gathumbi (2001) a montré par exemple qu'elle peut apporter 199 kgN.ha⁻¹ en six mois de culture et que ¾ 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. 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. 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. Les écarts entre (i) les rendements de riz avec FuA, que ce soit sur les parcelles paysannes ou contrôlées, et (ii) ceux avec FuC ou FO peuvent respectivement aller jusqu'à 27 et 50%. L'utilisation de FuA améliore également la production totale de grain de chaque système de culture. Cependant, la différence n'est significative qu'en troisième année d'expérimentation (22 à 27% supérieur par rapport à 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 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 d'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 étudié que la quantité de rendement en grains 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.

6. Remerciements

Les expérimentations ont été effectuées sur les parcelles FOFIFA (*Foibem-pirenena momba ny Fikarohana ampiarina amin'ny Fampandrosoana ny eny Ambanivohitra*)/SCRiD (*Système de Culture et de Riziculture Durable*) et sur des parcelles paysannes choisies avec l'appui de FIFAMANOR (*Fiompiana Fambolena Malagasy Norveziana*). Les auteurs tiennent à remercier le projet BIOVA pour l'appui financier et tous ceux qui ont contribué à cette étude.

7. Références bibliographiques

- Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control* 19, 716–723. doi:10.1109/TAC.1974.1100705
- 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 and Management*, 11, 51–54.
- 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. *Experimental Agriculture*, 51, 66–84.
- 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.
- 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. *Agricultural Systems*, 114, 64–72.
- Dunn, O.J., 1964. Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics* 6, 241–252.
- Erenstein O., Gérard B., Tittonell P., 2015 : Biomass use trade-offs in cereal cropping systems in the developing world: Overview. *Agricultural Systems*, 134, 1–5.
- Friedrich T., Kienzle J., 2007 : Conservation Agriculture: Impact on farmers' livelihoods, labour, mechanization and equipment. <http://www.fao.org/ag/ca/ca-publications/acsad%202007.pdf> (November, 2016).
- 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. Nitrogen fixation in tropical cropping systems. CABI: Wallingford. <http://www.cabi.org/cabebooks/ebook/20073011475> (November, 2016).

- Gathumbi SM, Cadisch G, Giller KE 2002 : 15N natural abundance assessments of N₂-fixation by mixtures of trees and shrubs in improved fallows. *Soil Biological and Biochemistry.*, 34, 1059–1071.
- Giller K.E., Witter E., Corbeels M., Tittonell P., 2009 : Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research*, 114, 23–34.
- Granier, P., Razafindratsita R., 1970 : Contribution à l'étude de la culture dérobée de fourrages en rizière dans la région de Tananarive. *Revue d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays tropicaux*, 23, 101–108.
- Husson O., Séguy L., Charpentier H., Rakotondramanana, Michelon R., Raharison T., Naudin K., Enjalric F., Moussa N., Razanamparany C., 2013 : Manuel pratique du semis direct sur couverture végétale permanente, SCV application à Madagascar. Manuel pratique du semis direct sur couverture végétale permanente, SCV application à Madagascar. GSDM/CIRAD.
- Legros J-P., 2013 : Major soil groups of the world: ecology, genesis, properties and classification. Major soil groups of the world: ecology, genesis, properties and classification. CRC Press: Boca Rayton.
- 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. *Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques*, 129, 73–89.
- 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. *Agricultural Systems.*, 134, 36–47.
- 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 and Tillage Research.*, 108, 68–76.
- Rabeharisoa L., 2004 : Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar. Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar. Université d'Antananarivo.
- 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 et Gestion des Sols*, 17,2, 169–186.
- Razafimbelo T., Albrecht A., Basile I., Borschneck D., Feller C., Ferrer H., Michellon R., Moussa N., Muller B., Olivier R., Razanamparany C., Séguy 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 et Gestion des 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 Science Society. America Journal*, 48, 295.
- Salgado P., Tillard E., 2012 : Conservation des ressources fertilisantes dans les systèmes d'élevage des pays du Sud. https://agritrop.cirad.fr/568667/1/document_568667.pdf (November, 2016).
- 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 Research*, 126, 246–258.
- Tittonell P., Gérard B., Erenstein O., 2015 : Tradeoffs around crop residue biomass in smallholder crop-livestock systems – What's next? *Agricultural Systems*, 134, 119–128.
- 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. *The Crop Journal*, 2, 289–296.