

Bilan de l'azote minéral au cours du cycle du riz pluvial sous systèmes de culture en semis direct sous couverture végétale en sol ferrallitique argileux à Madagascar

J. Rakotoarisoa⁽¹⁾, R. Oliver⁽²⁾, J. Dusserre⁽³⁾, B. Muller⁽⁴⁾, J.-M. Douzet⁽³⁾,
R. Michellon⁽⁵⁾, N. Moussa⁽⁵⁾, L. A. Razafinjara⁽⁶⁾, C. Rajeriarison⁽⁸⁾ et E. Scopel⁽⁹⁾

- 1) FOFIFA-Unité de Recherche en Partenariat sur les Systèmes de Culture et Rizicultures Durables, Département de Recherche Rizicole, BP 1690, Antananarivo 101, Madagascar - *j.rakotoarisoa@cirad.mg*
- 2) Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Département PERSYST, UPR RELIER, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier cedex 5, France
- 3) Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Département PERSYST - Unité de Recherche en Partenariat sur les Systèmes de Culture et Rizicultures Durables, BP 230, Antsirabe 110, Madagascar
- 4) Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Département BIOS, CERAAS-ISRA HP, Sénégal
- 5) ONG TAFa, Tany sy Fampandrosoana, BP 266, Antsirabe 110, Madagascar
- 6) FOFIFA-Direction Générale, BP 1690, Antananarivo 101, Madagascar
- 8) Université d'Antananarivo-Faculté des Sciences, Département Ecologie et Biologie Végétale, BP 906, Antananarivo 101, Madagascar
- 9) Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Département PERSYST, Unité de Recherche en Partenariat sur les Systèmes de Culture et Rizicultures Durables, BP 853, Antananarivo 101, Madagascar

RÉSUMÉ

Dans le Vakinankaratra (1 500 m d'altitude) en climat tropical d'altitude (1 300 mm, 20 °C), pour optimiser la nutrition azotée du riz pluvial (RP) d'une succession culturale biennale, Maïs + soja/riz pluvial (R4), à partir de l'offre en azote du sol ferrallitique humifère à caractère andique d'Andranomanelatra, notre étude a établi le bilan entrées-sorties d'azote pour 2 situations, se différenciant par les modes de gestion de sol (semis direct sous couverture végétale, SCV et labour, LAB) et de leur âge (4 et 12 ans). L'azote fourni par les résidus et celui minéralisé dans les horizons humifères du sol représentent les entrées. La consommation en azote de la plante et les pertes de tous ordres constituent, quant à elles, les sorties. Les résultats ont mis en évidence que les parcelles en SCV plus âgé ont minéralisé plus d'azote que celles en SCV plus jeune, alors que l'azote minéralisé sur des parcelles labourées de différents âges ne diffère pas significativement. En outre, quels que soient les modes de gestion du sol et leur âge, en toute période, les horizons de surface du profil cultural du RP de la succession culturale présentent une offre moindre en azote minéral que ceux de profondeur. Cette concentration en profondeur de l'azote est imputable aux caractéristiques spécifiques de ce type de sol. En labour comme en SCV, le bilan entrées-

sorties d'azote n'est pas profitable à la plante cultivée. La quantité d'azote consommée par la plante est faible malgré celle disponible dans le sol. Un autre facteur pourrait donc limiter l'absorption d'azote. Les pertes de N par lixiviation sont donc importantes, en plus de l'azote fortement retenu par le sol à capacité d'échange anionique élevée. L'introduction de plantes de couverture à fort pouvoir d'enracinement valoriserait mieux l'azote mis à disposition par le système.

Mots clés

Azote minéral du sol, minéralisation, paillis de résidus, offre, Madagascar.

SUMMARY

UPLAND RICE MINERAL NITROGEN BALANCE UNDER DIRECT SEEDING COVER CROP SYSTEMS DURING ONE CROP SEASON (CLAY FERRALLITIC SOILS, MADAGASCAR)

In the Vakinankaratra (1 500 m of altitude), under altitude tropical climate (1 300 mm, 20 °C), a survey aiming to optimize the upland rice nitrogenous nutrition of a biennial cultural succession, maize + soyabean/rice(R4), from the nitrogen offer in andic organic ferrallitic soil, has been conducted. It quantifies the real available mineral nitrogen offer in the cultural profile and estimates the nitrogen plant demand, in order to establish the nitrogen balance in situations, differentiating themselves by the soil management methods (direct seedling under plant cover, SCV and ploughing, LAB) and their age (4 and 12 years). The nitrogen inputs are represented by those provided by the residues and nitrogen mineralized in the soil organic compartment. The nitrogen outputs are constituted by the plant nitrogen consumption and all the losses from the system. The results show that older SCV are better provided in mineral nitrogen than younger, while mineral nitrogen systems ploughed during several years or those ploughed more lately are not significantly different. Otherwise, independently of the soil management fashions and their age, in all period, the upland rice cultural profile of upper horizons presents a lower offer in mineral nitrogen than the depth horizons. This nitrogen concentration in depth layer is due to the soil type specific features. Both in ploughing and in SCV, the nitrogen balance is not profitable to the cultivated plant. Indeed, important mineral nitrogen losses by lixiviation are noted as well in system with ploughing that in SCV. Plant nitrogen consumption is low in despite of soil available nitrogen. Another factor should limit nitrogen sorption. Thus nitrogen amounts lost by leaching or strongly kept by soil high anionic exchange capacity are high. The introduction of strong rooting cover crops would valorise better the available nitrogen.

Key-words

Mineral nitrogen of soil, mineralization, residues mulching, offer, Madagascar.

RESUMEN

BALANCE DEL NITRÓGENO MINERAL EN EL CURSO DEL CICLO DEL ARROZ PLUVIAL BAJO SISTEMAS DE CULTURA EN SIEMBRA DIRECTA BAJO COBERTURA(CUBIERTA) VEGETAL EN SUELO FERRALLITIQUE ARCILLOSO EN EL MADAGASCAR

En Vakinankaratra (1 500 m de altitud) en clima tropical de altitud (1 300 mm, 20 °C, para optimizar la nutrición nitrogenada del arroz pluvial (RP) de una sucesión culturale bienal, Maïs + soja / arroz pluvial (R4), a partir de la oferta en nitrógeno del suelo ferrallitique humifère a carácter andique de Andranomanelatra, nuestro estudio estableció el balance entradas-salidas de nitrógeno para 2 situaciones, diferenciándose por los modos(modas) de gestión de suelo (siembra directa bajo cobertura(cubierta) vegetal, SCV y labranza, LAB) y de su edad (4 y 12 años). El nitrógeno abastecido por los residuos y el mineralizado en el horizonte humifères del suelo representan las entradas. El consumo en nitrógeno de la planta y las pérdidas de toda orden constituyen, en cuanto a ellas, las salidas. Los resultados pusieron en evidencia que las parcelas en SCV más de edad habían mineralizado más nitrógeno que los en SCV más joven. Mientras que el nitrógeno mineralizado sobre parcelas aradas por diferentes edades no difiera significativamente. Además, cualesquiera que sean los modos(modas) de gestión del suelo y su edad, en todo período, el horizonte de superficie del perfil cultural del RP de la sucesión culturale presenta una oferta menor en nitrógeno mineral que el de profundidad. Esta concentración en profundidad del nitrógeno es imputable a las características específicas de este tipo de suelo. En labranza como en SCV, el balance entradas-salidas de nitrógeno no es provechoso a la planta cultivada. La cantidad de nitrógeno consumida por la planta es débil a pesar de la disponible en el suelo. Otro factor podría pues limitar la absorción de nitrógeno. Las pérdidas de N por lixivación son pues importantes, además del nitrógeno fuertemente retenido por el suelo capacidad de intercambio aniónico elevada. La introducción de plantas de cobertura(cubierta) a poder fuerte de arraigamiento valorizaría mejor el nitrógeno puesto en disposición por el sistema.

Palabras clave

Nitrógeno mineral del suelo, la mineralización, paillis de residuos, oferta, Madagascar

Il est généralement reconnu que la pratique de systèmes conventionnels avec travail du sol conduit en milieu tropicaux à de profonds processus d'érosion (Douzet *et al.*, 2010; Séguy *et al.*, 1996). Dans la région du Vakinankaratra, sur les Hautes Terres malgaches, le développement rapide de la riziculture pluviale, pratiquée dans la majorité des cas suivant des techniques culturales conventionnelles, a conduit à une rapide dégradation de la fertilité des sols et à une baisse de la productivité. Le niveau de rendement de la riziculture pluviale dans le Vakinankaratra est ainsi faible, de l'ordre de 800 à 1 500 kg/ha suivant les niveaux d'intensification adoptés par les producteurs (Dabat *et al.*, 2000). Le souci d'une gestion durable de ces sols tropicaux a amené à préconiser des techniques culturales plus préservatrices de l'environnement, les « systèmes de cultures en semis direct, sans travail du sol sous couverture végétale » (SCV). En effet, dans les SCV, les plantes de couverture et les paillis de résidus qui en sont issus se voient conférés différents rôles : accroissement annuel des taux de C et de N de l'horizon de surface aux activités biologiques et à caractère humifère plus importants (Barthés *et al.*, 2006), réduction de l'érosion (Scopel *et al.*, 2005), du ruissellement (Findeling *et al.*, 2003) et des pertes par évaporation directe de l'ensemble sol-systèmes (Scopel *et al.*, 2005). Ces avantages reconnus des SCV devraient se solder par une amélioration du statut organique et azoté du sol (Maltas *et al.*, 2009), permettant potentiellement une meilleure offre minérale du système. Parmi les éléments minéraux indispensables à la croissance du riz, l'azote joue un rôle déterminant dans l'obtention d'un rendement élevé (Jacquot *et al.*, 1983) et la réponse de la culture à cet élément est très marquée (Murayama, 1979; Stangel, 1979; Lacharme, 2001). Il est ainsi primordial d'assurer une bonne alimentation azotée de la riziculture pluviale du Vakinankaratra, dans le but d'améliorer son rendement. Mais, de par leur prix, les engrais minéraux sont peu utilisés par les petits producteurs malgaches, ce qui limite la riziculture pluviale régionale (Andrianiasy, 2003; MAEP, 2003). Ainsi, à l'échelle même du pays, la fertilisation est en baisse, passant de 15 kg/ha dans les années 70 à 8 kg/ha/an en 2000 (UPDR, 2005). L'amendement organique reste lui aussi très limité du fait de sa faible disponibilité au niveau des exploitations agricoles. L'intégration d'engrais verts reste pour le moment l'option la plus rationnelle pour compenser la faible mobilisation ou l'absence d'engrais azotés. Or, les plantes de couverture et/ou les cultures précédant la culture du riz peuvent modifier deux paramètres importants du bilan azoté en SCV (i)- un reliquat d'azote dans le profil de sol beaucoup moins important au début du cycle cultural du riz de par l'utilisation par ce couvert antérieur de l'azote minéral disponible (Reyes Gomes *et al.*, 2002); (ii)- l'azote recyclé et restitué par la dégradation des résidus de ces cultures antérieures, laissés à la surface du sol pour des systèmes SCV (Maltas *et al.*, 2009). Par ailleurs, les conditions de minéralisation de la matière organique du sol (MOS), peuvent

être modifiées par le mode de gestion des sols. D'un côté, la pratique du travail du sol provoque un fluch de minéralisation de la MOS mais généralement ce pic est mal valorisé par les cultures qui ne sont installées que plus tard (Reyes Gomes *et al.*, 2002). En contre partie, la présence d'un paillis en SCV permet de maintenir plus longtemps et régulièrement des conditions d'humidité et de température favorables à la minéralisation de la MOS tout au long du cycle (Métyay *et al.*, 2007) et à une moindre organisation par les microorganismes du sol (Coppens *et al.*, 2006). Cette minéralisation régulière et continue pourrait être mieux valorisée par la culture en croissance (Maltas *et al.*, 2009). D'autres auteurs rapportent que le passage au SCV permet de reconstituer un pool d'azote organique labile et donc d'une proportion d'azote minéralisable plus importante (Mikha *et al.*, 2006; Tan *et al.*, 2007).

La présente étude s'est donc fixé comme objectif général d'étudier la qualité de la nutrition azotée du riz pluvial dans un système SCV par rapport à un système conventionnel avec préparation du sol, dans les Hautes Terres de Madagascar. Nous avons choisi pour cela de comparer, par la méthode du bilan, les entrées et les sorties d'azote du système afin de pouvoir analyser la satisfaction des besoins de la culture de riz dans chaque système (Rémy *et al.*, 1977; Meynard *et al.*, 1982).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Présentation du lieu d'étude

Le lieu d'étude se situe dans la commune rurale d'Andranomanelatra, localisée dans le district d'Antsirabe II de la région du Vakinankaratra sur les Hautes Terres centrales malgaches. Situé à 16 km au Nord d'Antsirabe, à une altitude moyenne de 1 645 m, il bénéficie d'un régime climatique tropical d'altitude, avec une température moyenne annuelle inférieure ou égale à 20 °C. La moyenne pluviométrique annuelle est de 1 300 mm, et le régime est caractérisé par deux saisons bien individualisées : une saison pluvieuse et plus chaude, d'octobre à avril; une saison plus fraîche et sèche de mai à septembre. Le sol du site expérimental a été classé par Zebrowski et Ratsimbazafy (1979) comme un sol ferrallitique fortement désaturé, typique, rajeuni, humifère, sur matériaux volcaniques acides, et par Raunet (1981) comme un sol ferrallitique gibbsitique, fortement désaturé, rouge ou ocre, sur alluvions volcano-lacustres. Par rapport à la Soil Taxonomy, ce sol est classé dans les « andic Dystrustep » (Razafimbelo *et al.*, 2006)

Présentation du dispositif expérimental

L'étude, réalisée au cours de la campagne agricole allant d'octobre 2005 à mai 2006, s'appuie sur deux dispositifs, se distinguant par leur âge : un premier dispositif, datant de

quatre ans, organisé en blocs complets répartis au hasard, avec 4 répétitions et un deuxième dispositif, âgé de **douze ans**, disposé également en blocs complets répartis au hasard, avec 2 répétitions. Au sein de ces deux dispositifs, le riz vient dans une succession culturale biennale faisant alterner une association de **maïs** et de **soja** de la saison précédente (octobre 2004 à mai 2005) avec **le riz pluvial** de la saison suivante (octobre 2005 à mai 2006). Le riz pluvial y est installé suivant deux modes de gestion du sol correspondant aux deux traitements étudiés: **Semis direct sans travail de sol (SCV)** sur couverture morte de résidus des cultures antérieures (maïs + soja) correspondant au traitement préconisé par la recherche dans la région ou **labour (LAB)**, par traction animale, à la charrue, après exportation de l'ordre de 60 % des résidus des précédents culturaux (maïs + soja) correspondant plus à la pratique paysanne locale. Dans le but de mieux évaluer la fourniture naturelle en azote du système Sol-Résidus, aucune fertilisation n'a été appliquée aussi bien sur les précédents culturaux que sur la culture du riz suivant. L'étude effectuée porte sur le cycle du riz dans la rotation culturale étudiée.

Le dispositif a été géré de façon qu'aucune plante adventice n'interfère dans le bilan azote du système (traitement par herbicide total avant l'installation des cultures, application d'herbicide en pré émergence du riz, 2 jours après le semis, traitement d'herbicide en post émergence, au stade 3-4 feuilles du riz, complété à la demande par des opérations de sarclage manuel).

Observations effectuées

Dans notre étude, nous avons pratiqué le bilan d'azote sur l'ensemble du cycle du riz pluvial suivant le principe de conservation de la matière, Entrées = Sorties. Les entrées de N minéral dans le système sont constituées ici par le reliquat de N minéral dans l'horizon correspondant à celui qui sera exploré par les racines du riz, au début de son cycle cultural (R_i), par l'azote issu de la dégradation des résidus (N_r), par l'ensemble de N minéral issu de la minéralisation de la MOS (N_{mos}) et par les apports incontrôlés d'azote par les pluies ou par la fixation non symbiotique de l'azote. Les sorties elles, sont constituées des pertes d'azote par voies gazeuses (volatilisation et dénitrification N_g), celles induites par le ruissellement (N_{ru}), et le drainage (N_{dr}) ainsi que l'exportation en azote du couvert végétal du riz pluvial (N_{pl}) et le reliquat de N minéral dans l'horizon correspondant à celui exploré par les racines du riz pluvial à la fin du cycle cultural, à la période de récolte du riz (R_f). Pour une culture non symbiotique, les pertes par voie gazeuse, par volatilisation et dénitrification peuvent être considérées globalement compensées par les apports incontrôlés d'azote par les pluies et par la fixation non symbiotique de l'azote (Hébert, 1975). D'ailleurs, sur notre dispositif de recherche dans le Vakankaratra, les pertes d'azote par dénitrification sont

également minimales et négligeables car l'émission de N_2O pour l'ensemble du cycle cultural ne se chiffrait qu'à 0,26 kg. ha⁻¹ (Chapuis-Lardy et al., 2009). L'équation du bilan simplifiée que nous avons utilisée devient ainsi: $R_i + N_r + N_{mos} = N_{ru} + N_{dr} + N_{pl} + R_f$.

A chaque stade phénologique repère du riz pluvial (1- avant le semis de la culture, 2- à la levée, 3-au stade début tallage, 4-au stade fin tallage, 5-au stade fin floraison et 6-à la récolte), la minéralisation des résidus a été estimée par la méthode des litter bags (Autfray et al., 2001). Douze sacs de 0,25 m² contenant des résidus de maïs + soja homogénéisés ont été disposés au hasard sur chaque parcelle de chaque traitement. Chacun de ces sacs contenait au départ respectivement des quantités proportionnelles aux quantités moyennes de résidus restant dans chaque traitement au moment du semis, soit 5000 kg MS. ha⁻¹ pour SCV 4 ans, 8800 kg MS. ha⁻¹ pour SCV 12 ans et 2000 kg MS. ha⁻¹ pour Lab. Les litter bags ont été posés à la surface au milieu des pailles sur les SCV et enfouis en profondeur (5 à 10 cm) sur les labours. Deux des douze sacs existant sur chaque parcelle ont été prélevés à chaque date. Le matériel restant dans chaque litter bag a été nettoyé, séché, pesé et sa teneur en C et N a été analysée par la méthode de Dumas (Dumas, 1826). La différence de biomasse de résidus entre 2 dates successives de prélèvement est considérée comme la partie décomposée et minéralisée des résidus durant la période. L'apport de N par les résidus (N_r) dans le système durant une période est donc calculé comme la différence entre l'azote total (masse des résidus X teneur respective en N) restant dans les litter bags aux deux dates de prélèvement encadrant la période. La minéralisation de la MOS (N_{mos}) est suivi *in situ* par la méthode des cylindres (Raison et al., 1987).

En chacun des stades phénologiques du RP, il a été également réalisé un profil d'azote minéral (NO_3^- et NH_4^+) aux profondeurs 0-10, 10-20, 20-30, 30-60, 60-90, 90-120, 120-150 cm. L'azote minéral a été déterminé par dosage par colorimétrie automatique après extraction de l'azote par agitation pendant une heure, 50 g de sol dans 170 g de solution molaire de chlorure de potassium. Le $N-NH_4^+$ a été analysé selon la réaction de Berthelot et le $N-NO_3^-$ selon la réaction de Griess.

L'estimation des pertes en N minéral par ruissellement (N_{ru}) s'est faite à partir d'une parcelle d'érosion délimitée par un cadre de 1 m², à l'intérieur de chaque parcelle. A l'exutoire du cadre, les eaux de ruissellement ont été collectées dans un bidon. Après chaque événement pluvieux, les eaux de ruissellement du bidon ont été homogénéisées, puis un échantillon de 0,5 litre filtré est gardé au frais. Ces échantillons ont été mélangés, proportionnellement au ruissellement mesuré, afin de créer, à la fin de chaque période, une aliquote composite par parcelle, pour analyse de l'azote minéral dissout.

Des profils racinaires du riz ont été effectués jusqu'à 100 cm de profondeur juste après la floraison selon la méthode de la grille d'impacts racinaires (Chopart et Siband, 1999), l'offre en

N étant fonction de la profondeur et du volume de sol explorés par les racines.

Concernant la quantité d'azote absorbée par la plante (N_{pl}), la biomasse aérienne de 4 poquets repérés a été prélevée à la récolte, pesée puis séchée à l'étuve à 60 °C pendant 72 heures. La matière sèche ainsi obtenue a été broyée puis la teneur en azote total de la partie aérienne de la plante a été déterminée par analyse par la méthode Dumas à partir d'un échantillon de 5 g de ce broyat.

L'azote perdu par drainage (N_{dr}) est alors estimé par défaut de bilan dans notre analyse.

RÉSULTATS

Caractérisation générale de ce sol et de ses teneurs en C et N et de sa densité apparente

Le sol du lieu d'étude est de pH acide et, en surface comme en profondeur, sa composition granulométrique est à dominance argileuse (tableau 1).

Très riches à riches en N totaux respectivement dans les horizons de surface 0-10 cm et à 30-60 cm de profondeur, sa teneur en matière organique reste élevée, de l'ordre de 4,16 %, jusqu'à 60 cm de profondeur mais elle décroît avec la profondeur, pour descendre jusqu'à 0,89 % dans les horizons de profondeur 90-120 cm. Néanmoins, le rapport C/N reste satisfaisant, contrairement à la teneur en phosphore assimilable qui est faible par rapport au phosphore total. La somme de bases

Tableau 1 : Caractéristiques analytiques moyennes (M) et écart type (E.T.) de trois horizons de sol d' Andranomanelatra dans le Vakinankaratra.

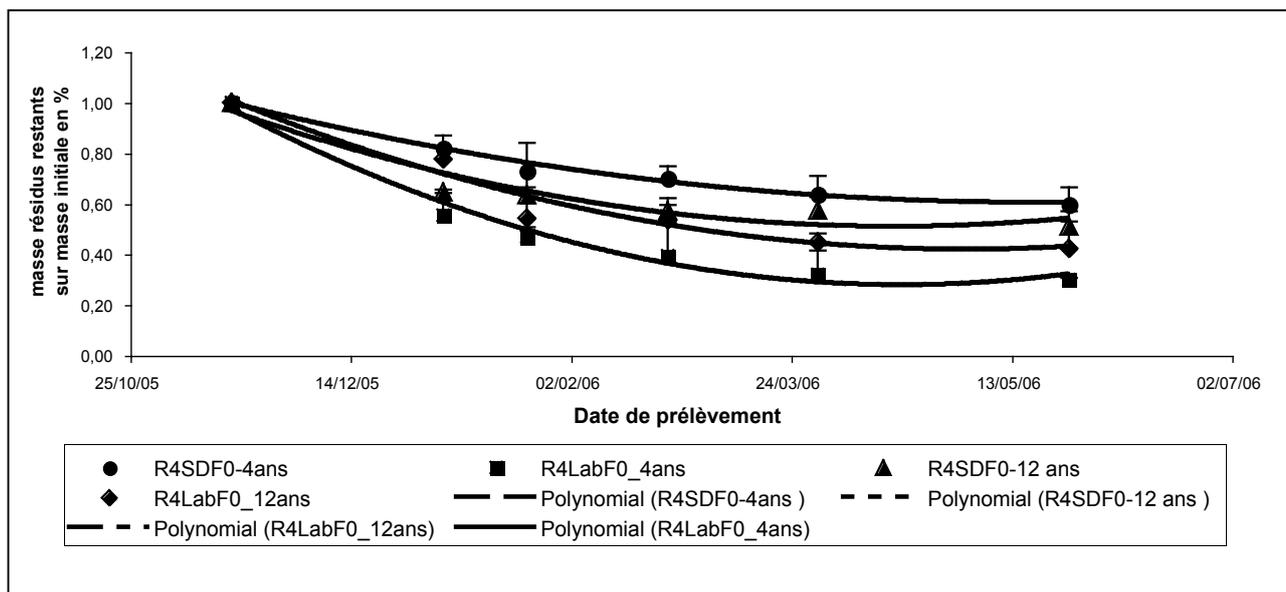
Table 1: Average analytical characteristics (M) and standard deviation (E.T.) of three soil horizons at Andranomanelatra in Vakinankaratra (Madagascar).

Profondeur en cm		0-10		30-60		90-120	
		M	E.T.	M	E.T.	M	E.T.
Analyse granulométrique (% matière minérale)							
argiles	%	59,4	4,70	72,0	7,31	70,7	2,91
limons	%	27,5	3,11	15,2	3,65	15,4	0,96
sables	%	13,1	1,90	12,1	4,24	13,9	2,07
C total	%	4,45	0,16	2,42	0,30	0,52	0,08
N total	%	0,35	0,012	0,17	0,03	0,05	0,01
Matière organique	%	7,65		4,16		0,89	
C/N		12,71		14,24		10,40	
P ass. Olsen	ppm P	13,9	2,33	n,d,		n,d,	
pH eau		4,94	0,126	4,87	0,182	5,18	0,085
pH KCl		4,19	0,066	4,55	0,137	5,78	0,090
Complexe adsorbant (méthode cobaltihexammine)							
Ca ⁺⁺	cmolc kg ⁻¹	0,80	0,45	0,40	0,11	0,81	0,08
Mg ⁺⁺	cmolc kg ⁻¹	0,48	0,34	0,14	0,06	0,26	0,03
K ⁺	cmolc kg ⁻¹	0,20	0,06	0,06	0,00	0,04	0,01
Na ⁺	cmolc kg ⁻¹	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,00
Al ⁺⁺⁺	cmolc kg ⁻¹	1,32	0,46	0,81	0,23	0,38	0,08
Mn ⁺⁺	cmolc kg ⁻¹	0,04	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01
H ⁺	cmolc kg ⁻¹	0,14	0,02	0,10	0,02	0,02	0,00
C E C	cmolc kg ⁻¹	3,71	0,45	2,63	0,17	1,11	0,09
Taux de saturation V	%	40,43		23,57		101,80	
Densité apparente	g. cm ⁻³	0,85	0,00	1,04	0,00	1,15	0,05

(n. d. : non déterminé)

Figure 1: Pourcentage en masse des résidus restant par rapport aux résidus initiaux.

Figure 1: Percentage in mass of the remaining residues compared to the initial residues.



échangeables est également très faible aussi bien en surface qu'en profondeur. La densité apparente augmente légèrement avec la profondeur mais sans différence significative entre les couches considérées.

Entrées en azote minéral sur le cycle de riz pluvial

Apport d'azote par les résidus (Nr)

Le suivi de la dégradation des résidus dans les litter bags est représenté sur la *figure 1*.

Elle révèle que, quel que soit l'âge des dispositifs, les résidus enfouis au labour se dégradent légèrement plus rapidement que ceux restés en surface en SCV, sans pour cela que cette vitesse de dégradation ne diffère significativement à aucune date entre les situations comparées.

Quant à l'azote libéré par ces résidus dans le système pendant le cycle, tel qu'il est présenté sur la *figure 2*, il diffère suivant l'âge du dispositif. Pour le dispositif de 12 ans, la fourniture en N sur l'ensemble du cycle est supérieure sous SCV (34 kg ha⁻¹) que sous Lab. (13 kg ha⁻¹). Pour une teneur en N des résidus similaire (1,06 % MS pour SCV et 1,21 % MS pour Lab.), la quantité de résidus restant en surface est quatre fois plus importante pour SCV (8800 kg ha⁻¹) que celle enfouie au labour (2000 kg. ha⁻¹), il est donc normal que, par effet de masse, l'azote total libéré soit beaucoup plus important sous SCV. Pour le dispositif de 4 ans par contre, le total de

N libéré par les résidus restés en surface en SCV ne diffère pas significativement de celui libéré dans le système sous labour (environ 17 kg ha⁻¹). De fait, il est fort probable que la différence de biomasse initiale, beaucoup moins grande que sur le dispositif de 12 ans (3000 kg MS ha⁻¹ en plus sur SCV uniquement), ait en partie été compensée par sa plus rapide dégradation sous labour.

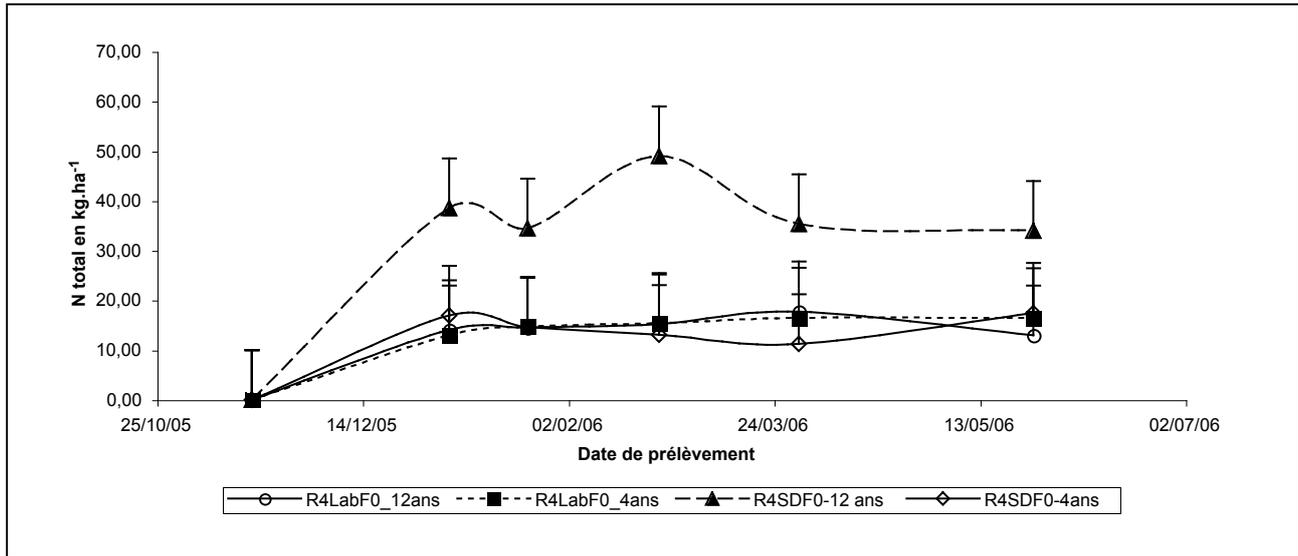
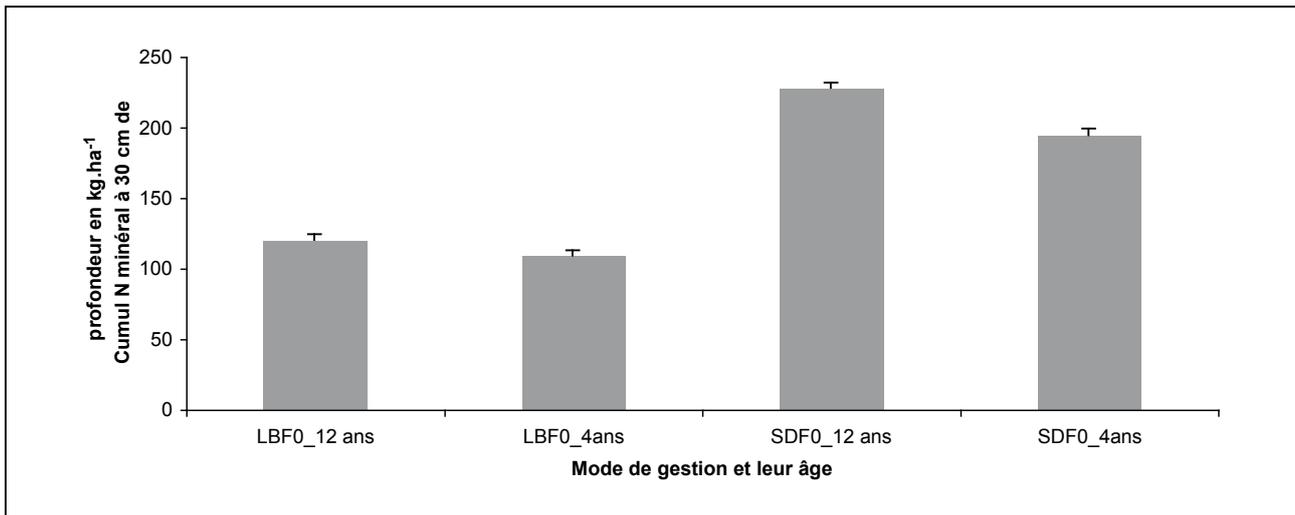
Indépendamment de l'âge du dispositif et du mode de gestion du sol, la grande majorité de l'azote des résidus est libéré dans les premiers quarante cinq jours du cycle de culture, entre le 17 novembre 2005, date d'installation des litter bags et le 4 janvier 2006, première date de leur prélèvement. Au-delà de cette dernière date, le N libéré par les résidus, ne diffère plus significativement, quels que soient l'âge des dispositifs et le mode de gestion du sol.

Azote minéral issu de la minéralisation de la MOS (Nmos)

L'azote minéralisé sur l'horizon de 0 à 30 cm représente la très large majorité de l'azote provenant de la MOS. Le cumul de cette minéralisation durant le cycle est reporté dans la *figure 3*.

Sur l'ensemble du cycle, environ 110 kg ha⁻¹ de N sont minéralisés pour les systèmes en labour, soit une vitesse moyenne de mise à disposition de 0,6 kg ha⁻¹j⁻¹ sur les deux dispositifs de 4 et de 12 ans.

Pour les systèmes en SCV par contre, la minéralisation est près du double sur l'ensemble du cycle, elle se chiffre à 228 kg ha⁻¹ soit une vitesse de 1,2 kg ha⁻¹j⁻¹ pour le dispositif de 12 ans,

Figure 2: Azote total libéré par les résidus dans le système pendant le cycle cultural.**Figure 2:** Total nitrogen released by the residues in the system during the upland rice farming cycle.**Figure 3:** Cumul et écart-types de N minéralisé dans les cylindres *in situ* pour le profil de 0-30 cm sur l'ensemble du cycle du riz (kg. ha⁻¹)**Figure 3:** Mineralized nitrogen for the 0-30 cm soil profile sum and standard deviation inside *in situ* cylinders during the upland rice farming cycle (kg.ha⁻¹)

contre 195 kg ha⁻¹ équivalent à 1 kg ha⁻¹j⁻¹ pour celui de 4 ans. Cet avantage au SCV est très largement significatif à l'échelle de l'ensemble du cycle.

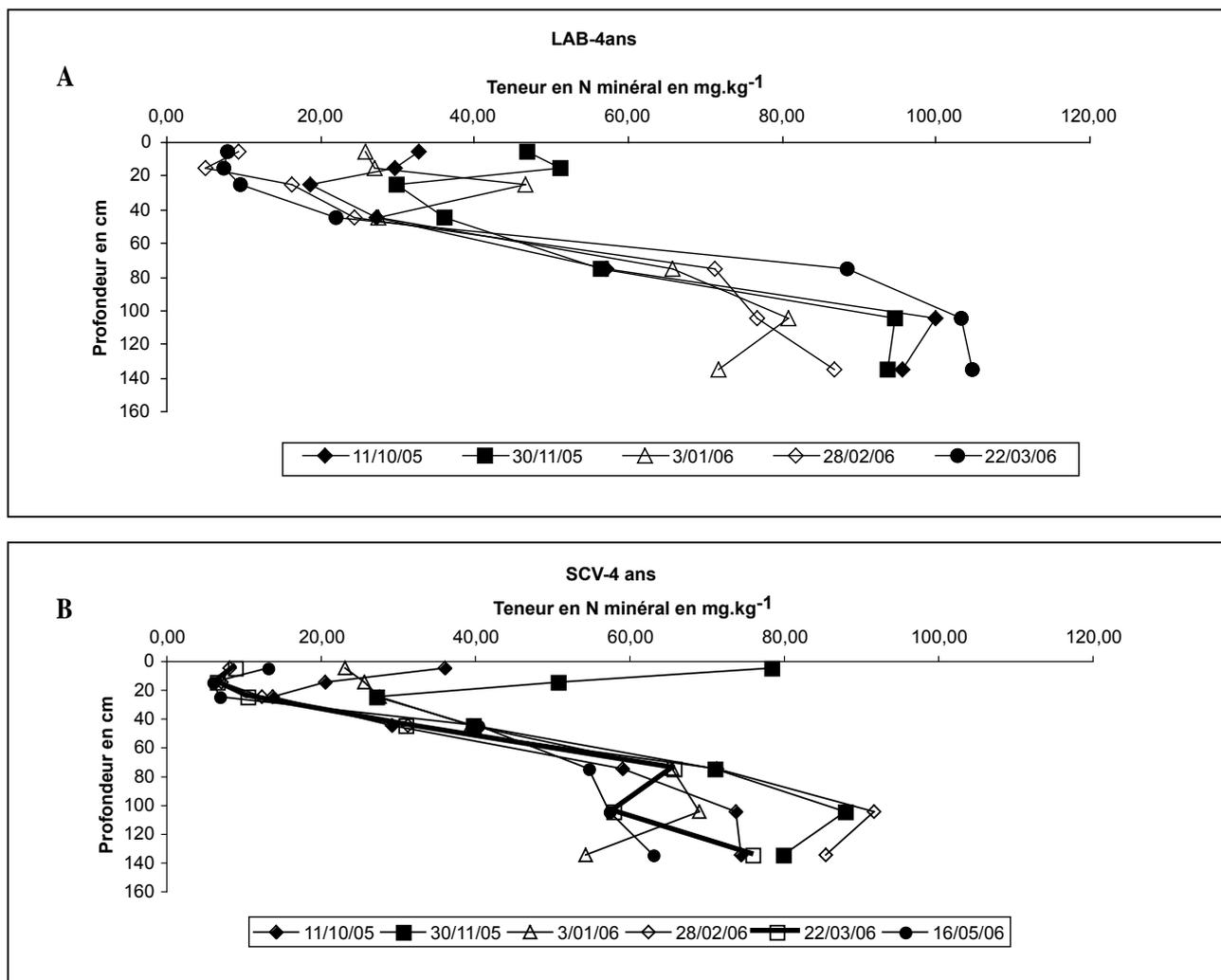
Ainsi est l'effet de l'âge du dispositif, même si la différence est ici un peu plus faible (+ 33 kg ha⁻¹ entre les deux dispositifs, confondue avec la différence de site).

Variation de N min sur l'ensemble du profil cultural

Suivant le mode de gestion du sol (SCV ou LAB), d'une part, et en fonction de l'âge du dispositif (4 ou 12 ans), d'autre part, la *figure 4* représente l'évolution dans le temps de la teneur en azote minéral dans le profil cultural de 0 à 150 cm de profondeur, pendant la période de mesure considérée du 11 octobre 2005 au 16 mai 2006. Nmin étant la somme de N-NH₄⁺ et N-NO₃⁻, déterminé par dosage par colorimétrie

Figure 4: Evolution dans le temps de la teneur en azote minéral dans le profil de sol, en fonction de l'âge des dispositifs et du mode de gestion du sol, a) sur le dispositif de 4 ans, et b) sur le dispositif de 12 ans.

Figure 4: The mineral nitrogen content evolution in the time ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) in the soil profile according to the devices age of the soil management style for a) the 4 year old experimental device and for b) the 12 year old experimental device.



automatique, respectivement selon la réaction de Berthelot et celle de Griess.

Sur le graphique de la *figure 4*, N min dans le profil cultural varie beaucoup suivant les dates d'observations, sans pour autant se distinguer statistiquement. Il n'y a qu'entre la date de début (30/11/05) et celle de fin de saison de pluies (16/05/06) que cette différenciation est significativement notable (*tableau 2*).

La *figure 4* met en outre en évidence que pour toute période et indépendamment de l'âge du dispositif et du mode de gestion du sol, une forte concentration de N minéral est observée aussi bien dans la zone intermédiaire (45 cm) que dans les horizons de profondeur du profil cultural du riz pluvial (75-135 cm). La forte quantité de N min en profondeur est

essentiellement sous forme N-NO_3^- . En effet, quels que soient les horizons considérés suivant les modes de gestion de sol et leur âge, N-NO_3^- représente en moyenne, 98 et 99 % de N min contre 2 et 1 % de N-NH_4^+ , respectivement dans les zones intermédiaires du profil et en profondeur. Dans les horizons de surface, cette proportion est, en moyenne de 75 % N-NO_3^- de N min et 25 % pour N-NH_4^+ . Aussi, suivant le *tableau 3*, la teneur en N minéral des horizons de surface (0-25 cm), est significativement moindre par rapport à ceux de profondeur (75-135 cm) et se distingue également de la zone intermédiaire (45 cm).

Se référant au *tableau 4*, la différence entre les stocks moyens, de $141 \text{ kg ha}^{-1} \text{Nmin}$ et $138 \text{ kg ha}^{-1} \text{Nmin}$, respectivement

Tableau 2: Moyenne de l'offre en N minéral par période sur l'ensemble du profil cultural tous modes de gestion du sol et tous âges confondus, Andranomanelatra dans le Vakinankaratra (Madagascar).

Table 2: Mineral nitrogen average offer per period on all farming profile for all soil management styles and for all ages at Andranomanelatra in Vakinankaratra.

Date de prélèvement	Moyenne de N minéral du profil en kg. ha ⁻¹
01/03/2006	147,21 ab*
16/05/2006	127,07 a
28/02/2006	131,63 ab
10/11/2005	132,87 ab
22/03/2006	147,44 ab
30/11/2005	151,15 b

* Les chiffres suivis de la même lettre ne sont pas significativement différents à $p < 0,05$.

Tableau 3: Moyenne de la teneur en N minéral suivant la profondeur du profil cultural tous mode de gestion du sol et tous âges confondus, à Andranomanelatra dans le Vakinankaratra (Madagascar).

Table 3: Mineral nitrogen average content according to the farming profile depth for all soil management styles and for all ages at Andranomanelatra in Vakinankaratra (Madagascar)

Profondeur du profil cultural en cm	Moyenne de N minéral en kg. ha ⁻¹
15	19,48 a*
5	22,78 a
25	26,45 a
45	164,02 b
105	238,45 c
75	241,26 c
135	244,39 c

* Les chiffres suivis de la même lettre ne sont pas significativement différents à $p < 0,05$.

pour LAB et SCV, n'est pas significative ($p < 0,05$). Par contre, la moyenne des stocks en N minéral se distingue significativement ($p < 0,05$) lorsqu'on compare l'âge des dispositifs (165 kg ha⁻¹ Nmin pour le dispositif de 12 ans contre 114 kg ha⁻¹ Nmin pour celui de 4 ans). On en déduit que la différenciation de l'offre en N minéral des 4 situations comparées (SCV-4ans, SCV -12ans, LAB -4 ans et LAB -12 ans) est plus imputable à leur différence d'âge qu'à celle de leur mode de gestion.

Tableau 4: Moyenne du stock de N minéral sur l'ensemble du profil de 0 à 135 cm suivant le mode de gestion du sol et l'âge, à Andranomanelatra dans le Vakinankaratra (Madagascar).

Table 4: Mineral nitrogen average stock on farming profile from 0 to 135 cm according to the soil management style and the age at Andranomanelatra in Vakinankaratra (Madagascar).

Modalité		Moyenne N minéral du profil en kg. ha ⁻¹
Mode de gestion	LAB	141 a*
	SCV	138 a
Age	12 ans	165 b*
	4 ans	114 a

* Pour la même modalité, les chiffres suivis de la même lettre ne sont pas significativement différents à $p < 0,05$.

Ainsi, les SCV plus âgés sont mieux pourvus en N minéral que les SCV plus jeunes. De même, les parcelles labourées depuis de nombreuses années présentent plus de N minéral que celles labourées plus récemment (tableau 5). La plus grande partie de ces différences entre les parcelles plus jeunes et celles plus âgées se situe dans la partie 25-75 cm du profil, généralement plus riche en azote minéral pour les plus anciennes.

Développement du système racinaire

Les profils racinaires, caractérisés uniquement sur le dispositif de 4 ans, par le nombre d'impacts racinaires cumulés par m² suivant la profondeur du profil cultural sont représentés par la figure 5.

Cette dernière montre que les racines sont abondantes dans les horizons de surface, de 0 à 15 cm, aussi bien sous SCV que sous LAB. On ne note pas non plus de différence importante, en termes de colonisation racinaire, entre les deux modes de gestion des sols entre 15 et 60 cm. En revanche, dans les couches de 60 à 80 cm (figure 5), le système en LAB présente plus de racines que celui en SCV. Des rares racines sont d'ailleurs observées pour SCV sur cette tranche, pour disparaître totalement à partir de 70 cm. Le nombre de racines diminue également nettement à partir de 60 cm de profondeur pour le LAB, pour disparaître totalement à partir de 80 cm. Il en découle que la zone majeure de prélèvement d'azote minéral par les racines atteint donc 70 et 80 cm respectivement, pour SCV et LAB.

Reliquat de N minéral au début (Ri) et à la fin du cycle cultural du riz (Rf) dans les horizons explorés par ses racines.

Suivant les résultats du suivi du profil racinaire présentés ci-dessus, la zone majeure de prélèvement d'azote minéral correspond donc aux horizons de 70 et 80 cm respectivement, pour SCV et LAB. Le tableau 6 présente le reliquat de N minéral

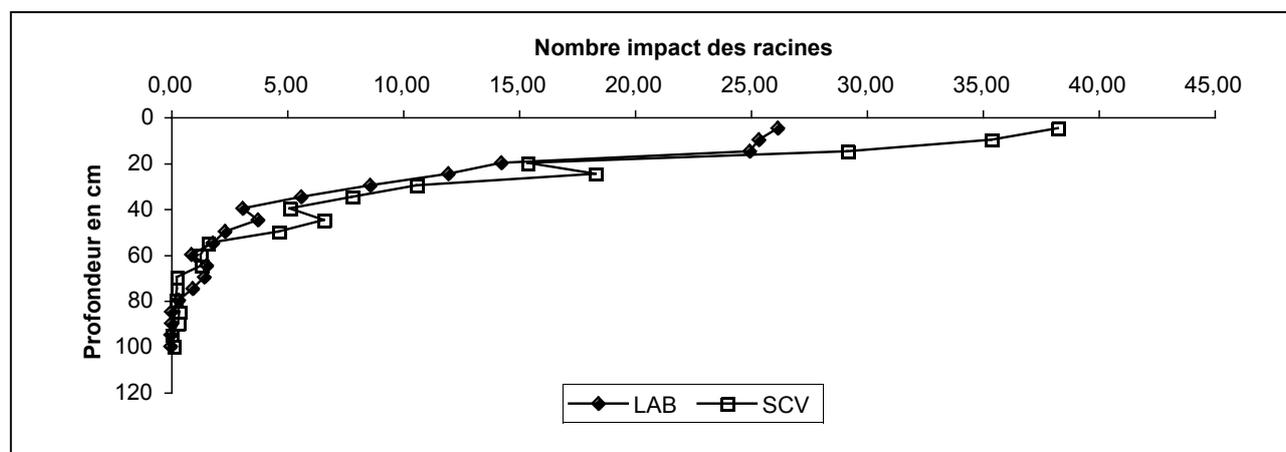
Tableau 5 : Quantité moyenne de N minéral (kg. ha^{-1}) de chaque horizon de sol des 4 situations comparées selon le mode de gestion de sol et leur âge, à Andranomanelatra dans le Vakinankaratra (Madagascar).

Table 5 : Mineral nitrogen average amount (kg. ha^{-1}) for each soil horizon of the 4 compared situations waccording to the soil management style and their age at Andranomanelatra in Vakinankaratra (Madagascar).

Profondeur en cm	LAB_4 ans	LAB_12 ans	SCV-4 ans	SCV_12 ans
5	20,65±14,02	15,04±8,95	25,28±24,22	30,15±25,95
15	16,92±14,23	22,44±5,94	16,70±14,91	21,88±16,79
25	18,87±12,75	40,03±15,26	13,89±7,44	32,99±15,85
45	74,22±15,34	223,55±71,90	103,56±15,25	254,73±62,53
75	196,12±34,43	293,95±42,27	189,48±19,34	285,49±34,24
105	259,54±30,18	297,83±53,13	203,85±40,64	273,04±39,01
135	260,49±31,62	236,20±69,52	201,71±32,02	279,16±49,51
Moyenne	121±108,91	161±128,92	108±87,34	168±127,94

Figure 5 - Nombre d'impacts racinaires du riz pluvial suivant la profondeur et selon le mode de gestion de sol, sur le dispositif de 4 ans.

Figure 5 - Upland rice root impacts number according to the soil depth and the soil management style for the 4 year old experimental device.



(R_i) et (R_f), respectivement au début du cycle cultural du riz (11/10/05) et à sa fin (16/05/06), pour les couches profondes de 70 cm pour SCV et de 80 cm pour LAB. On constate que l'azote a tendance à être sous utilisé en LAB-12 ans (légère accumulation) et sur-utilisé en LAB-4 ans (légère déplétion des stocks). Par contre en SCV on constate un maintien de ces stocks avant et après la culture quel que soit l'âge.

Sorties en azote minéral sur le cycle de riz pluvial

Exportation d'azote par la plante (N_{pi}).

Les résultats de l'analyse de la teneur en azote total de la biomasse aérienne prélevée sur les parcelles du dispositif de 4 et de 12 ans sont présentés dans le *tableau 7*.

On constate qu'il y a un lien direct entre productivité du riz, tant en grains qu'en biomasse, et ces exportations de N. Ce *tableau* met en évidence que l'absorption en azote est de façon générale plus faible sur le dispositif de 12 ans que sur celui de 4 ans, en relation avec les valeurs des biomasses produites (grain et paille) sur ces dispositifs. Par ailleurs, sur le dispositif de 4 ans, tant la croissance ou la production du riz que l'absorption en azote sont plus importantes en labour qu'en semis direct. Par contre c'est exactement le contraire sur le dispositif de 12 ans, les plantes ayant été fortement pénalisées en labour.

Pertes d'azote par ruissellement (N_{ru})

Les données sur la quantification des pertes en azote minéral dissout dans les eaux de ruissellement au cours du cycle cultural sont représentées sur la *figure 6*.

Tableau 6: Reliquat d'azote minéral au début (R_i) et à la fin du cycle cultural du riz (R_f) dans les horizons explorés par les racines du riz en kg. ha^{-1} en fonction de l'âge et du type de gestion des sols, à Andranomanelatra dans le Vakinankaratra (Madagascar).

Table 6: Mineral nitrogen remain at beginning (R_i) and the end of the upland rice farming cycle (R_f) on soil horizons explored by the rice roots (kg. ha^{-1}) according to the age and the soil management style at Andranomanelatra in Vakinankaratra (Madagascar).

Système	R_i	R_f
SCV_12 ans	272 a	263 a
LAB_12 ans	197 b	240 a
SCV_4 ans	148 c	142 b
LAB_4 ans	146 c	85 c

* Les chiffres suivis de la même lettre ne sont pas significativement différents à $p < 0,05$

Ce graphique révèle que le cumul de la quantité d'azote minéral dissout dans l'eau de ruissellement pour les quatre périodes considérées est toujours négligeable. Ces pertes sont quasiment nulles pour le SCV (0,16 kg/ha sur la période de suivi) et de toute façon toujours très faibles même pour le labour (1,69 kg/ha sur cette même période).

Pertes d'azote par drainage (Ndr)

Suivant le principe de conservation de la matière, Entrées = Sorties, les pertes d'azote par drainage sont ainsi estimées comme étant la différence entre les valeurs mesurées des entrées ($R_i + N_r + N_{\text{mos}}$) et celles des sorties ($N_{\text{ru}} + N_{\text{pl}} + R_f$) de N minéral dans chaque système, pendant le cycle cultural du riz. Ce que représente le *tableau 8*.

Ces pertes sont assez importantes, de l'ordre de 200 kg ha^{-1} pour les traitements en SCV alors qu'elles sont moindres sur les traitements labourés (de 50 à 100 kg ha^{-1}).

Tableau 7: Rendement en biomasse aérienne (grain et paille) et quantité d'azote absorbée par le riz pluvial à récolte sur les dispositifs de 4 ans et de 12 ans en fonction du type de gestion des sols, à Andranomanelatra dans le Vakinankaratra (Madagascar).

Table 7: Biomass yield (grain and straw) and nitrogen amount absorbed by upland rice at harvest time on the 4 years old and 12 years old experimental devices according to the soil management style at Andranomanelatra in Vakinankaratra (Madagascar).

Traitement	Poids grain à récolte (t ha^{-1})	Poids paille à récolte (t ha^{-1})	Quantité d'azote absorbé à récolte (kg ha^{-1})
LAB-4ans	2,39 ± 0,71	3,15 ± 0,51	62 ± 13
SCV-4ans	1,48 ± 0,90	1,86 ± 0,56	40 ± 19
LAB -12 ans	0,26 ± 0,21	1,05 ± 0,24	26 ± 4
SCV -12 ans	1,22 ± 0,88	1,99 ± 0,81	43 ± 11

Figure 6: Pertes totales en azote des eaux de ruissellement par période du cycle cultural (kg. ha^{-1}) en fonction du type de gestion des sols.
Figure 6: Total nitrogen losses by runoff per period of the upland rice farming cycle (kg. ha^{-1}) according to the soil management style.

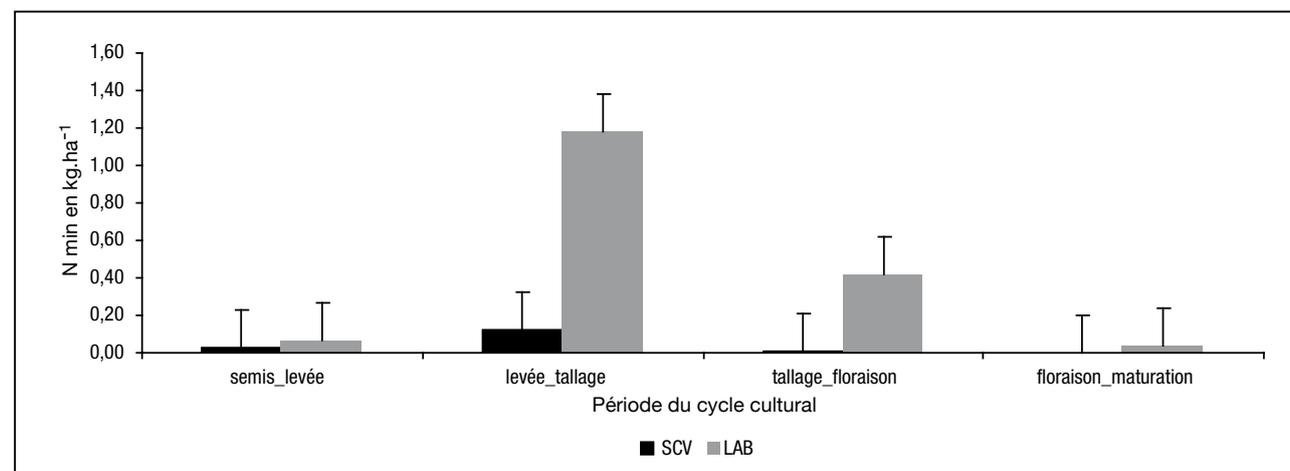


Tableau 8: Perte de N minéral par drainage (N_{dr}) en $kg. ha^{-1}$ en fonction de l'âge et du type de gestion des sols, à Andranomanelatra dans le Vakinankaratra (Madagascar).

Table 8: Mineral nitrogen loss by drainage (N_{dr}) ($kg. ha^{-1}$) according to the age and the soil management style at Andranomanelatra in Vakinankaratra (Madagascar).

Système	Entrées			total entrées	Sorties			total sorties	N_{dr}^*
	R_i^*	N_r^*	N_{mos}^*		N_{ru}^*	N_{pl}^*	R_f^*		
SCV_4ans	148	17	195	360	0	40	142	182	178
LAB_4ans	146	17	110	273	2	62	85	149	124
SCV_12 ans	272	34	228	534	0	43	263	306	228
LAB_12 ans	197	13	110	320	2	26	240	268	52

* R_i : Reliquat de N minéral au début du cycle cultural du riz; N_r : N total fourni par les résidus; N_{mos} : N minéral dans l'horizon 0-30 cm; N_{ru} : pertes de N minéral par ruissellement; N_{pl} : Exportation de N total par la biomasse aérienne de la plante; R_f : Reliquat de N minéral en fin du cycle cultural du riz.

Tableau 9: Bilan de l'azote minéral sur le cycle cultural du riz pluvial selon le mode de gestion du sol et l'âge de celui-ci, à Andranomanelatra dans le Vakinankaratra (Madagascar).

Table 9: Mineral nitrogen balance for the upland rice farming cycle according to the soil management style and its age at Andranomanelatra in Vakinankaratra (Madagascar).

		SCV_4ans	LAB_4ans	SCV_12 ans	LAB_12 ans
Entrées	R_i	148	146	272	197
	N_r	17	17	34	13
	N_{mos}	195	110	228	110
Total entrées		360	273	534	320
Sorties	N_{ru}	0	2	0	2
	N_{pl}	40	62	43	26
	R_f	142	85	263	240
	N_{dr}	178	124	228	52
Total sorties		360	273	534	320
Proportion entrée N minéral perdu par drainage en %		49	45	43	16
Proportion entrée N minéral consommée par la plante en %		11	23	8	8

Bilan de l'azote minéral sur le cycle du riz pluvial

Considérant les différents termes du bilan, suivant l'équation $R_i + N_r + N_{mos} = N_{ru} + N_{dr} + N_{pl} + R_f$, selon le mode de gestion du sol et l'âge des deux dispositifs, le bilan de l'azote minéral sur le cycle du riz pluvial est reporté dans le *tableau 9*.

Ce bilan met en évidence que pour les entrées de N minéral dans le système, la fourniture d'azote par les résidus (N_r) est assez faible. En revanche, celles constituées par le stock initial d'azote minéral disponible dans le sol en période de semis (R_i) et la quantité d'azote issue de la minéralisation pendant le cycle cultural (N_{mos}) sont importantes pour tous les traitements. Pour les sorties de N minéral du système, les pertes par drainage représentent une proportion importante des entrées d'azote dans le système. Elles se chiffrent à 49, 45, 43 et 16 %, respectivement pour SCV-4ans, LAB-4ans, SCV-12ans et LAB-

12 ans. Si on considère la quantité d'azote consommée par la partie aérienne des plantes, elle diffère suivant l'âge du mode de gestion du sol. Pour le dispositif de 4 ans, elle représente uniquement 11 et 23 % de l'offre d'azote minéral durant le cycle, respectivement pour SCV et LAB, et uniquement 8 % pour celui de 12 ans, aussi bien en SCV qu'en LAB. D'une manière générale, le bilan entrées-sorties ne démontre pas une bonne valorisation de l'azote par la plante cultivée, quels que soient le mode de gestion du sol et l'âge des dispositifs.

DISCUSSION

Caractéristiques générales du sol

Le sol du lieu d'étude présente une texture très nettement argileuse et ce sur l'ensemble du profil (*tableau 1*). Mais, du fait de l'absence d'un horizon d'accumulation d'argile et de l'enrobage des lithoreliques par des sesquioxydes de fer (Razafimbelo *et al.*, 2006), ce sol est considéré comme un Inceptisol, dans la classification américaine (Soil Survey Staff, 2003). De plus, les valeurs d'oxalfe, légèrement supérieur à 1 % dans la plupart des horizons et de la densité apparente, systématiquement inférieure à l'unité, ont permis à Razafimbelo *et al.* (2006), de le classer dans le sous groupe andique d'un « andic Dystrustept » de la Soil Taxonomy. L'ensemble de ces caractéristiques pourrait donc lui conférer une forte capacité d'échange anionique (Zelazny *et al.*, 1996), en partie liée à la présence d'oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium et aux argiles présentes. Ceci explique probablement en partie cette forte rétention d'azote nitrique dans les horizons intermédiaires à profonds, et sa faible valorisation par les cultures. En effet, même si une partie de l'azote minéralisé sous forme de nitrates peut se fixer au complexe absorbant qui tamponne ainsi les pertes par lixiviation, cet azote n'est pas forcément facilement mobilisable par les plantes de par la forte rétention anionique. Le stock de N minéral n'est donc pas forcément celui du N disponible (Zelazny *et al.*, 1996). Ce qui expliquerait la faible proportion d'azote absorbée par le riz pluvial par rapport à l'importance du stock initial de N minéral. Le sol est par ailleurs fortement carencé en phosphore. L'étude étant effectuée en conditions de non apport de fertilisation minérale d'appoint, la carence en phosphore conjuguée avec l'absorption limitée d'azote pourrait être à l'origine de la faible productivité en biomasse et en paddy du riz pluvial.

Dégradation et fourniture d'azote par les résidus

Il n'y a pas de différence significative de vitesse de minéralisation des résidus entre traitements. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Scopel *et al.* (2005) qui avaient trouvé que la vitesse de décomposition des résidus varie peu lorsque ces derniers restent en surface comme paillis protecteur. De même, Abiven *et al.* (2002) ont montré que le rythme de décomposition des résidus diffère en fonction des organes de la plante (racines ou feuilles), mais les résidus enfouis se décomposent à une vitesse similaire à celle de ceux laissés en surface. La dégradation légèrement plus lente des résidus en surface observée dans notre étude peut s'expliquer par un plus faible contact sol/résidus, donc une colonisation microbienne des résidus laissés en surface plus faible que celle des résidus

enfouis au labour. En ce qui concerne l'azote libéré par ces résidus dans le système pendant le cycle, l'effet prépondérant vient de la différence de quantité de résidus (quatre fois plus importante sous SCV que celle enfouie sur LAB.). Outre cet effet, toutefois, la colonisation microbienne moindre des résidus laissés en surface par rapport à ceux enfouis au labour, peut se traduire par un besoin initial en azote moins important de la biomasse microbienne. L'immobilisation de l'azote minéral est donc plus faible sous SCV qu'en système avec labour (Coppens *et al.*, 2006), si bien que la fourniture en N des résidus sous SCV devient supérieure à celle de ceux sous LAB. D'autres travaux rapportent également une colonisation plus importante des résidus en surface par des champignons (Six *et al.*, 2002) qui, ayant moins besoin d'azote que les bactéries, amèneraient à une moindre immobilisation du N minéral. Conformément à d'autres études (Reyes Gomes *et al.*, 2002, Sousa Junior *et al.* 2003), la grande majorité de l'azote des résidus est libérée dans les quarante-cinq premiers jours du cycle de culture, quel que soit le traitement.

Minéralisation de la MOS

Pour les systèmes en SCV, la minéralisation est près du double de celle en LAB sur l'ensemble du cycle. Cette supériorité va à l'encontre d'un certain nombre de travaux considérant que les conditions du milieu physique après labour sont favorables à la minéralisation de l'azote organique du sol. On observerait un pic de minéralisation surtout juste après le travail du sol, en raison d'une part de son effet direct sur l'aération du sol, activateur de la minéralisation et d'autre part de son effet indirect sur la diminution de stabilité des agrégats, rendant la matière organique, au sein de ces agrégats, plus accessible aux activités de la biomasse microbienne (Tan *et al.*, 2007, Reicovski, 1997). Par contre, elle est conforme à d'autres travaux ayant étudié en conditions tropicales la minéralisation *in situ* sous SCV, montrant également une plus grande minéralisation sur l'ensemble du cycle que sous systèmes conventionnels avec travail du sol (Reyes Gomes *et al.*, 2002). Ce résultat est en partie expliqué en premier lieu par une augmentation sur le long terme des stocks d'azote organique minéralisable sous SCV. En effet, Barthés *et al.* (2006) attestent un accroissement annuel des taux de C et N totaux en SCV, par suite de la formation d'un horizon de surface aux activités biologiques et à caractère humifère plus importants. Par ailleurs, Maltas *et al.* (2009) constatent une corrélation significative entre l'âge des SCV, la teneur en matière organique du sol, sa teneur en azote total et le rapport C/N sur les 30 premiers centimètres du profil cultural. Ces différences de teneur et de potentiel de minéralisation sont essentiellement dues à une biomasse restituée au sol systématiquement plus importante sous semis direct sans travail du sol que sous travail du sol conventionnel (Razafimbelo *et al.*, 2006; Corbeels *et al.*,

2006). Cet effet sur l'augmentation des stocks organiques sous SCV peut parfois être accentué par, à l'inverse, une dégradation du statut organique des sols sous labour à cause de l'érosion et d'une diminution des stocks de la matière organique du sol par minéralisation rapide, non compensée par des restitutions végétales comme cela a été constaté par d'autres auteurs dans les Cerrados au Brésil (Resck *et al.*, 1999). La différenciation avec le temps de stocks organiques sous semis direct explique probablement le fait qu'en SCV, la minéralisation est légèrement plus forte sur le dispositif plus âgé (+ 17 %) alors qu'elle est tout à fait comparable en labour sur les deux dispositifs d'âge différent. La minéralisation plus importante sous SCV est également explicable par les meilleures conditions d'humidité et de température tout au long de l'année dans la couche superficielle du sol (Reyes Gomes *et al.*, 2002; Metay *et al.*, 2007). Des auteurs rapportent enfin que les systèmes SCV permettent de reconstituer un pool d'azote organique labile, soit une source supplémentaire d'azote rapidement minéralisable (Mikha *et al.*, 2006).

Toutes les valeurs de minéralisation sont importantes, du même ordre que celles reportées dans des sols ferrallitiques des Cerrados brésiliens particulièrement favorables (Reyes Gomes *et al.*, 2002). Cependant les fortes variabilités entre cylindres doivent nous faire prendre ces valeurs absolues avec précaution. Des mesures de minéralisation potentielle en laboratoire devraient compléter cette approche *in situ* pour en confirmer les valeurs obtenues.

Profil de N min sur l'ensemble du profil cultural

L'allure générale des courbes du profil d'azote sur l'ensemble du profil cultural (*figure 4*) montre une moindre quantité d'azote dans les parties supérieures du profil. Ceci s'explique par une plus grande mobilisation de cet azote par les racines, plus particulièrement dans les 15 premiers cm où les racines sont plus nombreuses aussi bien en SCV que sous LAB. Par ailleurs ces courbes montrent une zone d'accumulation d'azote à partir des horizons intermédiaires entre 40 et 90 cm, bulbe qui se prolonge jusqu'en fin de profil à 150 cm. Cette concentration de N minéral en profondeur est plus particulièrement marquée en début du cycle cultural. En début de cycle, cette concentration marquée de l'azote, dans les zones intermédiaires et en profondeur, peut être imputée à l'azote disponible, issu de la minéralisation en début de cycle, qui non encore absorbé par le riz pluvial, à peine installé et aux faibles besoins, est entraîné vers la profondeur et alimente la zone d'accumulation. Toutefois, cette concentration de N minéral dans les horizons intermédiaires reste élevée sur l'ensemble du cycle et notamment en fin de cycle. Une première hypothèse pour expliquer ces fortes concentrations pourrait être le développement racinaire limité par la présence d'une couche compacte et son activité

inhibée par l'acidification du sol en profondeur, comme reporté par Noble *et al.* (2007) au Nord Est de la Thaïlande. Mais, comme les observations de profils racinaires montrent une colonisation satisfaisante jusqu'à 70 cm pour SCV et 80 cm pour le LAB, les fortes concentrations de N minéral observées dans la tranche comprise entre 40-70 cm et entre 40-80 cm, respectivement pour SCV et LAB, pourraient bien ne pas être uniquement dues à de l'azote libre dans la solution du sol mais être plutôt liées aux caractéristiques spécifiques de ces sols, à caractère andique et à forte capacité d'échange anionique évoqués précédemment (Cahn *et al.*, 1992; Nikolla *et al.*, 2001; Strahm *et al.*, 2006). Les différences de stock global sur le profil en azote minéral entre les traitements 4 ans et ceux de 12 ans pourraient bien être dus, malgré leur proximité, à une variabilité spatiale des caractéristiques physico-chimiques des sols entre les deux dispositifs. Toutefois cette différence ne devrait pas avoir de conséquences sur l'ensemble des dynamiques et bilans abordés ici.

Développement du système racinaire

La répartition générale des racines dans le profil cultural observée dans notre travail (abondante dans les horizons de surface, tendance à décroître vers la profondeur, indépendamment du mode de gestion de sol) est assez conforme à d'autres études du système racinaire (Scopel *et al.*, 2001; Dusserre *et al.*, 2009). Toutefois, la profondeur totale d'enracinement du riz pluvial (70 cm en SCV et 80 cm en LAB), est plus limitée que celle observée ailleurs par Reyes Gomes *et al.* en 2002, sur des sols ferrallitiques du Cerrados brésilien où les racines du riz pluvial atteignaient 120 cm de profondeur. Sans qu'aucun horizon réellement compacté n'ait été repéré dans nos profils, la densité apparente du sol a été reportée comme plus élevée sur ces sites entre 30-40 cm, et notamment sur le dispositif de 12 ans (Razafimbelo *et al.*, 2006). Ce léger changement de porosité pourrait être en partie responsable de la faible profondeur d'enracinement du riz pluvial dans notre condition expérimentale. Toutefois, il est fort probable que les systèmes profonds observés au Brésil soient plutôt liés à la porosité exceptionnelle des sols ferrallitiques argileux locaux (Reatto *et al.*, 1998) et aux fortes doses d'engrais utilisés par les producteurs intensifs de cette région.

Rendement en biomasse aérienne et exportation d'azote par la plante

La production de riz et les exportations d'azote sont restées limitées, particulièrement sur le dispositif de 12 ans, se situant à près de la moitié en comparaison avec les résultats de Reyes Gomes *et al.* (2002) qui, eux, travaillaient en situations hautement fertilisées au Brésil. Comme évoqué, précédemment, en dépit de l'offre importante en N minéral dans les horizons explorés

par les racines, celui-ci n'est pas forcément disponible pour la plante, si bien que la quantité d'azote consommée par le couvert demeure très faible, quels que soient le mode de gestion du sol et l'âge du dispositif. L'azote minéralisé par le système semble donc peu efficient. Ceci dit, le complexe de fixation anionique est, semble-t-il, si ce n'est saturé, au moins bien rempli dans les couches inférieures à 40 cm, et l'azote minéralisé devrait être tout de même partiellement valorisé. On peut donc se demander si cette faible valorisation n'est pas également due à l'action d'un autre facteur limitant, vraisemblablement minéral vu que les traitements ont été conduits en l'absence de toute fertilisation. Le manque de phosphore a souvent été pointé comme limitant pour ce genre de sols (Raunet, 1981). Cela pourrait expliquer également les faibles niveaux de productivité moyenne du riz, et notamment sur le traitement labouré de 12 ans à cause des forts processus d'érosion qu'il a connu depuis la mise en place de l'essai. Dans ce cas, la faible exportation d'azote par les plantes serait alors également une conséquence et non pas seulement une cause de la faible croissance et productivité des plantes. En contre partie, la supériorité de croissance générale et d'absorption d'azote par les plantes sur parcelle labourée du dispositif de 4 ans, pourrait être expliquée par une meilleure exploration de l'ensemble du profil cultural par les racines des plantes sur labour, la zone colonisée par les racines atteignant 10 cm de plus que celle du SCV. Par ailleurs, bien que la colonisation racinaire ne diffère pas au moment de la floraison pour les 2 modes de gestion du sol dans les horizons de surface (0-15 cm), généralement on constate une colonisation plus rapide de cette partie superficielle en début de cycle sous labour. En effet, le sol étant plus meuble le développement racinaire y est favorisé (Nicou *et al.*, 1993) permettant une croissance initiale plus vigoureuse et une production de biomasse finale plus importante. De même, le pic de minéralisation favorisé en début de cycle par le travail du sol accentue cette vigueur initiale des plantes (Reicovski, 1997; Séguy *et al.*, 1996). En SCV, en revanche, le sol est moins meuble, et le système racinaire est aussi plus lent à se mettre en place au départ, si bien que l'absorption d'azote au démarrage est moindre et peut se traduire par l'apparition de quelques chloroses azotées en début de cycle. En SCV, ce manque initial d'azote pourrait encore être accentué par une immobilisation plus importante d'azote en début de cycle liée à la difficulté de minéralisation des résidus quand ceux-ci sont riches en carbone, en particulier sur des sols faiblement pourvus en azote naturellement (Six *et al.*, 2002; Maltas *et al.*, 2009). Tout ceci s'est répercuté en définitive en de plus faibles absorptions d'azote et de production de biomasse sur les parcelles en SCV dans le dispositif de 4 ans. Pour le dispositif de 12 ans, la quantité d'azote absorbée par le riz pluvial sous labour est plus faible que celle en SCV de par une plus faible disponibilité de l'azote par le sol plus pauvre en MOS et vraisemblablement par l'action d'autres facteurs minéraux encore plus limitant sur

ces traitements fort dégradés. Par contre, inversement, l'offre en azote des systèmes en SCV s'améliore avec leur âge.

Bilan de l'azote minéral : pertes et efficience de l'azote

Cette étude a permis de quantifier les pertes potentielles en azote sous riz pluvial en fonction des systèmes de gestion des sols. De leur côté, les pertes d'azote par ruissellement restent très largement limitées dans nos conditions expérimentales. Néanmoins, les valeurs enregistrées confirment celles d'autres auteurs attestant que les pertes d'azote par ruissellement sont plus élevées sur sol labouré que sur sol cultivé sans travail de sol (Couture, 2005; Douzet *et al.*, 2010). Malgré cela le bilan entrées-sorties ne démontre pas une bonne valorisation de l'azote par la plante cultivée, quels que soient le mode de gestion du sol et l'âge des dispositifs. En effet, comme l'ont également constaté Scopel *et al.*, en 2005, dans les conditions pluvieuses du Cerrados brésilien, même en culture intensive les pertes par lixiviation sont importantes. Le début de cycle est particulièrement sensible puisque l'offre importante d'azote disponible dans le sol au moment du semis n'est pas suffisamment valorisée par la culture à peine installée (Reyes Gomes *et al.*, 2002). Dans les conditions des hautes terres malgaches, même plus tard au cours du cycle cultural, en raison des caractéristiques spécifiques de ce sol, d'une part, la croissance limitée des racines et la probable manifestation d'autres facteurs limitant nutritionnels d'autre part, la croissance des plantes reste limitée et l'azote mobilisé également. L'azote lixivié et définitivement hors de la portée de la plante constitue donc une perte régulière et importante qui doit être limitée rapidement, à la fois pour l'équilibre écologique et l'efficacité agronomique de ces systèmes, et pour ne pas avoir à compenser par de fortes et coûteuses fertilisations chimiques. Pour cela, il convient d'offrir au riz des conditions équilibrées de croissance prenant en compte l'ensemble des facteurs potentiellement limitants (physiques et nutritionnels), de manière à avoir rapidement un bon système racinaire capable de valoriser l'azote minéral disponible (Tardieu *et al.*, 1986). Cela suggère également de travailler sur une meilleure synchronisation de l'offre et de la demande pour remédier à cette situation (Meynard *et al.*, 1982). Ainsi, l'azote lixivié pourrait être mieux recyclé si le système intégrait des plantes de couverture à meilleur pouvoir d'enracinement et à forte production de biomasse en succession ou en relais avec le riz, capables d'utiliser l'azote disponible en fin ou en début de saison des pluies (Maltas *et al.*, 2009). Apparemment l'association maïs + soja, précédant le riz pluvial dans la présente succession culturale, n'a pas rempli cette fonction de façon satisfaisante. Les biomasses produites restent limitées et l'azote fourni par les résidus de cette association reste relativement modeste (de l'ordre de 17 kg ha⁻¹ indépendamment du mode de gestion

du sol, pour le dispositif de 4 ans, et de 34 et 13 kg. ha⁻¹, respectivement pour le système en SCV et celui en labour, pour le dispositif de 12 ans).

CONCLUSION

Les résultats de cette étude ont mis en évidence la forte présence de N minéral pour ces sols un peu particuliers (ferrallitiques, humifères mais aussi à caractère andique), d'une part et à la forte concentration de N minéral pour les horizons 60-150 cm, due probablement à l'adsorption des ions nitrates sur des charges anioniques, d'autre part. Ainsi, dans ces conditions pédologiques, bien que l'effet généralement reconnu des SCV et de leur âge sur l'amélioration de l'offre en azote minéral du sol ait été confirmé, ces caractéristiques spécifiques du sol n'ont pas permis pour autant une bonne valorisation de l'azote minéral disponible par la plante cultivée.

Des études plus fines sur les modalités de remise à disposition des nitrates par ces sols seraient utiles afin de mieux gérer la fertilisation azotée des cultures céréalières. De même, les interactions avec des amendements organiques seraient à approfondir afin de mieux valoriser les fumiers, généralement source principale de fertilisation des petits producteurs malgaches.

BIBLIOGRAPHIE

- Abiven S., Recous S., Reyes Gomes V. et Oliver R., 2002 - Impact of residue quality and location in soil on the C and N mineralization of residues from cropping system from Cerrados, Brazil. 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand.
- Andrianiasy M.M., 2003 - Les facteurs de blocage de développement de la région du Vakinankaratra Antsirabe. 20 pages
- Autray P. et Oliver R., 2001 - N available for maize (*Zea mays*) on living cover crops of *Chromolaena odorata* and *Pueraria phaseloides* in forest areas of Côte d'Ivoire. In: Garcia-Torres L., Benitez J. & Martinez-Vilela A., eds. Conservation agriculture, a worldwide challenge. Vol. 2. Proc. First world congress on conservation agriculture, 1-5 October 2001, Madrid, Spain. Roma: FAO; Brussels: European Conservation Agriculture Federation (ECAAF), pp. 395-399.
- Barthès B., Azontonde A., Blanchart E., Girardin C., Villenave C., Oliver R. et Feller C., 2006 - Effect of a legume cover crop on carbon storage and erosion in an ultisol under maize cultivation in southern Benin. Boca Raton: CRC Press, pp. 143-155.
- Strahm, Brian D., Harrison et Robert B., 2006 - Nitrate sorption in a variable charge forest soil of the Pacific Northwest. *Soil Science*, 171 (4): 313-321.
- Cahn M.D., Bouldin D. R., et Cravo M.S., 1992 - Nitrate sorption in the profile of an acid soil. *Plant and Soil*, 143, pp. 179-183.
- Chapuis-Lardy L., A. Metay, M. Martinet, M. Rabenarivo, J. Toucet, J.M. Douzet, T. Razafimbelo, L. Rabeharisoa et J. Rakotoarisoa, 2009 - Nitrous oxide fluxes from Malagasy agricultural soils. *Geoderma* 148: 421-427.
- Chopart J.L. et Siband P., 1999 - Development and validation of a model to describe root length density of maize from root counts and soil profiles. *Plant and Soil*, 214, pp. 61-74.
- Coppens F., Merckx R. et Recous S., 2006 - Impact of crop residue location on carbon and nitrogen distribution in soil and water-stable aggregates. *European Journal of Soil Science*, 57, pp. 570-582.
- Corbeels M., Scopel E., Cardoso A., Bernoux M., Douzet J.M. et Neto M.S., 2006 - Soil Carbon storage potential of direct seeding mulch-based cropping systems in Cerrados of Brazil. *Global Change Biology*, 12, pp. 1773-1787.
- Couture J.N., 2005 - Culture intercalaire dans le maïs : réduction importante de l'érosion. *Journal Vision Agricole Québec Canada*, 5 pages.
- Dabat M.H., Fabre P., Bockel J.M., Razafimandimby L., Rakotoarisoa J. et Rakotovoava J.M., 2000 - Diagnostic et perspectives de la filière riz à Madagascar. FAO-Unité de Politique de Développement Rural. Ministère de l'Agriculture. Ouvrage, 200 pages.
- Douzet J.M., Scopel E., Muller B., Rakotoarisoa J., Albrecht A. et 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 et gestion des sols (accepté).
- Dumas A., 1826 - *Annales de chimie*, 33, 342 p.
- Dusserre J., Audebert A., Radanielson A., Chopart J-L. 2009 - Towards a simple generic model for upland rice root length density estimation from root intersections on soil profile. *Plant and Soil*, 325 (1-2), pp. 277-288.
- Findeling A., Ruy S. et Scopel E., 2003 - Modelling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach. *Journal of hydrology*, 275(1-2), pp. 49-66.
- Hébert J. 1975 - Données récentes sur la fertilisation du blé. In *Techniques nouvelles de production du blé*. ITCF Ed., pp. 142-195.
- Jacquot M., Courtois B., 1983 - Le riz pluvial. Collection Technicien d'Agriculture Tropicale. Editions G P Maisonneuve et Larose. Agence de Coopération Culturelle et Technique, 30 p.
- Lacharme M., 2001 - La fertilisation minérale du Riz. Fascicule N°6, Ministère du Développement Rural et de l'Environnement. Direction de la Recherche Formation et Vulgarisation. Coopération française, 17 p.
- Maltas A., Corbeels M, Scopel E., Wery J. et Macena da Silva F.A., 2009 - Cover crop and Nitrogen effects on maize productivity in no tillage systems of the Brazilian Cerrados. *Agronomy Journal*, 101 (5), pp. 1036-1046.
- Metay A., Moreira J.A.A., Bernoux M., Boyer T., Douzet J.-M., Feigl B.E., Feller C., Maraux F., Oliver R. et Scopel E., 2007 - Storage and forms of organic carbon in a no-tillage under cover crops system on clayey Oxisol in dry land rice production (Cerrados, Brazil). *Soil and tillage research*, 94, pp.122-132.
- Meynard J.M., Boiffin J., Canell J. et Sebillotte M., 1982 - Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse - Types de réponse à la fumure azotée et application de la méthode du bilan prévisionnel. *Agronomie*, 1(9), pp. 795-806.
- Mikha M.M., Rice C.W. et Benjamin J.G., 2006 - Estimating soil mineralizable nitrogen under different management practices. *Soil Science Society of America Journal*, 70, pp.1522-1531.
- MAEP (Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche), 2003 - Monographie de la région du Vakinankaratra Antananarivo.
- Murayama N., 1979 - The importance of nitrogen for rice production. Ouvrage *Nitrogen and Rice*: pp 5-18.
- Nicou R., Charreau C. et Chopart J.L., 1993 - Tillage and soil physical properties in semi-arid West Africa. *Soil and Tillage Research*, 27, pp.125-147.
- Nikolla. P, Qafoku et Malcolm E.S., 2001 - Retention and transport of calcium nitrate in variable charge subsoil. *Soil Science*, 166 (5), pp 484-493.
- Noble A.D., Suzuki S., Soda W., Ruaysoognern S. et Berthelsen S., 2007 - Addressing soil physical and chemical constraints on a light textured sand using a permanent grass and legume pasture in Northeast Thailand. *International Water Management Institute Malaysia*.

- Raison R.J., Connel M.J. et Khanna P.K., 1987 - Methodology for studying fluxes of soil mineral-N *in situ*. *Soil Biology and Biochemistry*, 19 (5), pp. 521-530.
- Raunet M., 1981 - Le milieu physique de la région volcanique Ankaratra-Vakinankaratra-Itasy (Madagascar) Aptitudes à la culture du blé pluvial-Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières, pp. 17-38
- Razafimbelo T.M., Albrecht A., Basile I., Borschneck D., Bourgeon G., Feller C., Ferrer H., Michellon R., Moussa N., Muller B., Oliver R., Razanamparany C., Séguy L. et Swarc M., 2006 - Etude de différents systèmes de culture à couverture végétale sur le stockage du carbone dans un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar. *Etudes et Gestion des sols*, 13 (2), pp. 113-127.
- Reatto, A., Correia, J.R. et Spera, S.T., 1998 - Solos do bioma Cerrados. In: Matiko Sano S., Pedrosa de Almeida, S. (Eds.), *Cerrado, Ambiente e flora*, EMBRAPA-CPAC, Planaltina, DF, Brazil. pp. 47-88.
- Reicovski D.C., 1997 - Tillage-induced CO₂ emissions from soil. *Nutrients Cycle Agroecosystems*, 49, pp. 273-285.
- Rémy J.C. et Hébert J., 1977 - Le devenir des engrais azotés dans le sol. *C.R. Acad. Agric. FR.*, 63 (11), pp. 700-714.
- Resck D.V.S., Vasconcellos, C.A., Vilela, L., Macedo, M.C.M., 1999 - Impact of conversion of Brazilian Cerrados to cropland and pasture land on soil carbon pool and dynamics. In: Lal, R., Kimble, J.M., Stewart, B.A. (Eds.), *Global Climate Change and Tropical Ecosystems*. Adv. Soil Sciences. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 169-196.
- Reyes Gomez V.M., Findeling A., Marlet S., Oliver R., Maraux F., Alves Moreira J.A., Stone L.F., Douzet J.M., Scopel E. et Recous S., 2002 - Influence of no-tillage and cover plants on water and nitrogen dynamics in the Cerrados, Brazil, World congress of soil science. Bangkok: WCSS, 1disque optique numérique (CD-ROM).
- Séguy L., Bouzinac S., Trentini A. et Cortez N.A., 1996 - Brazilian agriculture in new immigration zones. *Agriculture et développement (English issue)*, 12, pp. 2-61.
- Scopel E., Tardieu F., Edmeades G. et Sébillotte M., 2001 - Effects of conservation tillage on water supply and rainfed maize production in semiarid zones of West-Central Mexico. Mexico: CIMMYT, NRG papers, 18 p.
- Scopel E., Douzet J.M., Silva M. F. A., Cardoso A., Moreira J.A.A., Findeling A. et Bernoux M., 2005 - Impacts des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale (SCV) sur la dynamique de l'eau, de l'azote minéral et du carbone du sol dans les Cerrados brésiliens -Cahiers d'Agriculture, 14 (1), pp. 71-75.
- Six J., Conant R.T., Paul E.A. et Paustian K., 2002 - Stabilization mechanism of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and soil*, 241
- Soil Survey Staff, 2003 - *Keys to Soil Taxonomy*. Washington, USA, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Sousa Junior J.G., Cardoso A.N., Silva F.A.M., Carvalho A.M. et Scopel E., 2003 - Quantificação e modelagem da dinâmica de decomposição de resíduos de espécies de adubos verdes no Cerrado. In "Producing in harmony with nature", II World congress on Sustainable Agriculture proceedings, Iguazu, Brazil, 10-15 of August.
- Stangel P.J., 1979 - Nitrogen requirement and adequacy of supply for rice production. *Ouvrage Nitrogen and Rice*: pp. 45-58.
- Tan Z., Lal R., Owens L. et Izaurrealde R. C., 2007 - Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. *Soil and Tillage Research*, 92, pp. 53-59.
- Tardieu F. et Manichon H., 1986 - Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. II-Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines. *Agronomie* 6, 415-425.
- UPDR (Unité de Politique de Développement Rural), 2005 - Situation de la consommation, de l'approvisionnement et de la distribution des engrais à Madagascar. Ministère de l'Agriculture.
- Zebrowski C. et Ratsimbazafy C., 1979 - Carte pédologique de Madagascar au 1/100000. Feuille Antsirabe. Paris- Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer.
- Zelazny L.W., Liming H.E. et Vanwormhoudt A.N., 1996 - Charge analysis of soils and anion exchange in *Methods of soils analysis part 3*. Chemical methods - SSA Book series N°5 Spark D.K. Ed. pp.1231-1253.

PUBLICATIONS ET DOCUMENTS PUBLIÉS PAR L'AFES

Revue

Science du Sol

Revue scientifique publiée de 1952 à 1993.

Elle comporte 300 à 400 pages par an. Un index est présenté tous les ans dans le quatrième numéro.

A cessé de paraître fin 1993. Certains numéros disponibles.

La Lettre de L'Association

Publiée quatre fois par an, ce journal annonce les nouvelles de l'association, les réunions nationales et internationales ; il donne des critiques d'ouvrages, de thèses, de la documentation, etc.

La Lettre est envoyée à chaque adhérent de l'association : elle accompagne l'adhésion.

Rédacteur en chef : F. Féder.

Etude et Gestion des Sols

Revue trimestrielle, francophone traitant de la connaissance et de l'usage des sols.

Rédacteur en chef : D. Arrouays.

Rédacteurs en chef Adjoints : D. Baize, D. Schwartz

Secrétariat de rédaction : F. Héliès, C. Laveuf, J.-P. Rossignol.

Le Comité éditorial est composé de trente six membres de France et de pays francophones.

Ouvrages

Le Livre Jubilaire (1984)

Point sur les acquis à cette date en matière de science du sol et de pédologie.

Fonctionnement hydrique et comportement du sol (1984)

Podzols et podzolisation

par D. Righi et A. Chauvel : ouvrage publié en coédition par l'AFES et l'INRA, avec le concours du CNRS, de l'ORSTOM, et de la région Poitou-Charentes (1987).

Micromorphologie des sols/ Soil micromorphology

par N. Fédoroff, L.M. Bresson, Marie Agnès Courty, publié par l'AFES avec le concours du CNRS, de l'INAPG, de l'INRA, du Ministère de l'Environnement et de l'ORSTOM (1985) (épuisé).

Carte mondiale des sols et sa légende (1984)

Présentée sous forme numérique.

Le Référentiel Pédologique

par D. Baize et M.-C. Girard, (Coord.) AFES, Association Française pour l'Etude du Sol (FRA), Editions Quae, Versailles (FRA) ; 2009. 405 p. - Collection Savoir-Faire.

Synthèse nationale des analyses de terre : Période 1990-1994

par C. Walter, C. Schwartz, B. Claudot, P.-Aurousseau et T. Bouedo, avec le concours du ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

Actes du XVI^e Congrès Mondial de Sciences du Sol, Montpellier - Août 1998

