

Influence de différents systèmes de culture sur la productivité de sols cultivés des Hautes Terres de Madagascar et conséquences pour le bilan de phosphore

H. Andriamaniraka⁽¹⁾, L. Rabeharisoa⁽²⁾, R. Michellon⁽³⁾, N. Moussa⁽⁴⁾ et C. Morel⁽⁵⁾

- 1) Université d'Antananarivo, École Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Agriculture, BP 175 Ankatso 101 Antananarivo, Madagascar - j_harilala@yahoo.fr
- 2) Laboratoire des Radio Isotopes, Service de la Radioagronomie, BP 3383, Route d'Andraisoro, 101 Antananarivo, Madagascar,
- 3) CIRAD/ONG Tafa, BP 266, 110 Antsirabe, Madagascar
- 4) ONG Tafa, BP 266, 110 Antsirabe, Madagascar
- 5) UMR INRA-ENITAB Transfert sol-plante et Cycle des Eléments Minéraux dans les écosystèmes cultivés (TCEM), BP 81, 33883 Villenave-d'Ornon cedex, France

RÉSUMÉ

L'accroissement de la fertilité naturelle des sols malgaches de « tanety » nécessite la mise au point de systèmes de culture qui assurent, simultanément à cet accroissement, la durabilité du fonctionnement de l'écosystème. Les cultures en semis direct sur couverture végétale, type mulch, (SCV) ont été proposées comme une alternative possible à des systèmes plus conventionnels basés sur le labour du sol. L'impact des SCV sur les rendements des cultures (succession maïs/soja), les teneurs du phosphore (P) dans les plantes et les bilans annuels, somme algébrique des flux annuels entrants (fertilisation minérale et organique) et sortants (exportations dans les organes récoltés) et cumulés de P ont été quantifiés pendant plusieurs années dans le dispositif expérimental d'Andranomanelatra. Deux régimes de fertilisation, fumier ($5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) seul ou fumier ($5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) + engrais minéral (NPK) + amendement calcique de dolomie, sont appliqués à deux systèmes de culture : système conventionnel et système SCV. La fertilisation minérale, toutes situations confondues, a pour conséquence un accroissement moyen annuel des rendements de 14 % alors que les systèmes SCV conduisent à un accroissement de 16 %. Le bilan cumulé de P (kg P ha^{-1}) dans l'agroécosystème sur la période d'expérimentation (8 ans) varie en faveur de la fertilisation minérale d'un facteur proche de 10 à 30 alors que dans les systèmes SCV ou labour il est peu affecté.

Mots clés

Productivité, bilan phosphore, sol cultivé, Madagascar, système de culture.

SUMMARY**INFLUENCE OF VARIOUS CROPPING SYSTEMS ON THE PRODUCTIVITY OF CULTIVATED SOILS OF THE HIGHLANDS OF MADAGASCAR AND THE EFFECTS ON THE PHOSPHORUS BALANCE**

The increase of the natural fertility of soils in Madagascar requires the development of cropping systems which ensure, at the same time with this increase, the durability of the ecosystem service. The cropping systems with direct seeding on permanent soil cover (systems SCV) were proposed as a possible alternative to more conventional systems based on the plowing of soil. Their impact on the crop yield (succession rice/soybean or maize/soybean), their phosphorus (P) content and the annual and cumulated P balance were quantified during several years in the field experiment of Andranomanelatra. The annual P balance is the difference between annual P inputs (applied as mineral and organic fertilization) and annual P outputs (P exports in the crop yield). Two modes of fertilization were applied every year: one is manure (5 t ha^{-1}); the other is also 5 t ha^{-1} of manure plus mineral fertilizer application of N, P, K and liming. The mineral fertilization, all confused cropping systems, increased yields by 14 % whereas the SCV systems increased yields by 16 %. The cumulated P balance (kg P ha^{-1}) in the agrosystem during the period of experimentation (8 years) highly increased (fold by 10-30) in favour of the mineral fertilization. The cropping systems did not strongly affect the cumulated P balance.

Key-words

Productivity, phosphorus balance, cultivated soil, Madagascar, cropping system.

RESUMEN**INFLUENZA DE DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DE SUELOS CULTIVADOS EN LAS ALTAS TIERRAS DE MADAGASCAR Y CONSECUENCIAS PARA EL BALANCE DEL FOSFORO**

El aumento de la fertilidad natural de los suelos malgaches de "tanaty" necesita el ajuste de sistemas de cultivo que aseguran, simultáneamente a este aumento, la durabilidad del funcionamiento del ecosistema. Se propusieron los cultivos en siembra directa sobre cobertura vegetal, de tipo "mulch" (SCV) como una alternativa posible a sistemas más convencionales basados sobre la labranza del suelo. Se cuantificaron el impacto des SCV, los rendimientos de los cultivos (sucesión maíz/soja), los contenidos en fósforos (P) en las plantas y los balances anuales, suma algébrica de los flujos anuales entrantes (fertilización mineral y orgánica) y salientes (exportaciones en los órganos cosechados), y cumulado del P durante varios años en el dispositivo experimental de Andranomanelatra. Se aplicaron dos regímenes de fertilización: estiércol ($5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) solo o estiércol ($5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) + abonos minerales (NPK) + enmiendo cálcico de dolomía a dos sistemas de cultivo: sistema convencional y sistema SCV. La fertilización mineral, todas situaciones confundidas, tiene como consecuencia un aumento medio anual de los rendimientos de 14 % mientras que los sistemas SCV permiten un aumento de 16 %. El balance cumulado de P (kg P ha^{-1}) en el agrosistema durante el periodo de experimentación (8 años) varía a favor de la fertilización mineral con un factor de 10 a 30 mientras que en los sistemas SCV o con labranza está poco afectado.

Palabras clave

Productividad, balance fosforo, suelo cultivado, Madagascar, sistema de cultivo.

L'insuffisance alimentaire à Madagascar est la conséquence de la stagnation de la productivité agricole et de l'augmentation de la population (3,01 p. 100 (United States Census bureau, International Programs Center, International database, 2008) : www.census.gov/ipc/www/idb/country/maportal.htm), qui devrait atteindre 24 millions d'habitants en 2015, alors que la surface agricole utile n'est actuellement que d'environ 3,5 millions ha. Même si une augmentation de la production agricole et rizicole est actuellement notée, elle ne parvient pas à subvenir aux besoins alimentaires de la population. Les fonds de vallée sont déjà largement occupés et cultivés, principalement en riz irrigué. Mais la région des Hautes Terres, autour de la capitale Antananarivo, possède de larges superficies peu valorisées pour l'agriculture. Les versants des collines, appelés « tanety », sont encore très peu exploités, alors qu'ils représentent plus de 50 % de la surface agricole utile de la région (Ramanankasina et Rabeharisoa, 2003). Pour pallier l'impossibilité d'accroître les surfaces cultivées dédiées aux cultures vivrières dans les sols de fonds de vallée, la tendance est de compenser cette contrainte par la mise en culture des sols de ces « tanety ». Ces terres sont marginales et peu fertiles à l'état naturel, leur topographie ajoutant des contraintes fortes d'exploitation. Presque 50 % des surfaces des « tanety » ont connu une dégradation significative de la fertilité de leurs sols en 10 ans (Ramanankasina et Rabeharisoa, 2003). Les raisons de la faible fertilité initiale de ces sols cultivés et de son déclin dans le temps sont multiples. La première des causes est que l'apport des éléments nutritifs aux sols est très inférieur aux exportations dues aux récoltes, voire à l'érosion, comme le prouvent les statistiques malgaches en matière d'utilisation des matières fertilisantes (MAEP, 2004). Selon Feller (2007), la consommation d'engrais minéraux (N, P et K) à Madagascar est nettement inférieure à 10 kg ha⁻¹ an⁻¹ alors que 5 à 10 fois plus serait nécessaire pour atteindre une productivité permettant de satisfaire les besoins alimentaires annuels humains.

La seconde cause est l'absence ou le peu d'investissement effectué par les paysans pour améliorer et protéger les sols. Les conséquences de la mise en culture sont souvent négatives. Ainsi la pratique du « tavy »¹, souvent utilisée pour mettre ces sols en culture, est source de graves problèmes de pertes de sol par érosion hydrique (Rakotondravelo, 2003). La productivité initiale est généralement faible et diminue encore au cours des années de culture avec la diminution de la teneur des éléments minéraux nutritifs assimilables dans les sols.

Des chercheurs du CIRAD et leurs partenaires ont proposé et étudié depuis plusieurs années des systèmes de cultures avec semis direct sur couverture végétale (SCV) imaginés pour

augmenter et maintenir la productivité de ces sols tout en les protégeant afin de minimiser les pertes des terres et de leurs nutriments par érosion (Séguy *et al.*, 2006; Husson *et al.*, 2006). Une protection efficace du sol par une couverture permanente du sol vise à : (i) obtenir une couche superficielle possédant une activité biologique intense favorable à l'obtention d'une structure du sol propice au développement racinaire ; (ii) accroître la teneur de la matière organique et la biodisponibilité des éléments nutritifs minéraux. Pour une agriculture fortement mécanisée, des gains importants de productivité ont été obtenus au Brésil avec les SCV et de faibles apports d'éléments minéraux pour le soja, le riz et le coton. Ainsi des accroissements moyens annuels de 0,7 t ha⁻¹ ou plus de graines de soja ont été observés sur une période de 5 ans (Séguy *et al.*, 2006).

Les facteurs susceptibles de limiter la production agricole naturelle des écosystèmes de type tanety sont multiples. Ainsi, dans les sols sous climats tropicaux, le phosphore (P) est le premier des facteurs limitants des rendements et nombre d'études illustrent des gains importants de productivité, incluant des apports de P, même modérés, obtenus dans des systèmes de culture en Colombie (Oberson *et al.*, 1999) ou à Madagascar (Rabeharisoa, 2007).

L'objectif de cet article est de présenter, pour différents systèmes de culture, certains à base de SCV et d'autres à base de labour, les variations de productivité et les différents flux impliqués dans le cycle de P afin de calculer et comparer les bilans annuels et cumulés de P. Ce travail repose sur l'utilisation des données issues d'un dispositif expérimental au champ, mis en place, suivi et géré par TAFA et CIRAD depuis 12 années.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Présentation du dispositif expérimental

Ce dispositif, situé dans les Hautes Terres de Madagascar, a été mis en place et suivi par l'ONG « Tany sy Fampandrosoana » (TAFA) avec l'appui du CIRAD depuis 1991. Il a fait récemment l'objet d'études sur le rôle du système de cultures sur le stockage de carbone, C, dans le sol (Razafimbelo, 2005). Le choix du dispositif et des traitements s'est donc tout naturellement imposé afin de bénéficier des informations déjà acquises. Les parcelles expérimentales étudiées appartiennent au dispositif d'Andranomanelatra situé dans la région d'Antsirabe, au cœur des Hautes Terres malgaches, à une altitude d'environ 1 600 m. Le climat y est de type tropical d'altitude humide et se caractérise par deux saisons distinctes : une saison sèche et fraîche de mai à septembre et une saison pluvieuse et chaude d'octobre à avril. La température moyenne annuelle est de 16 °C. La pluviosité annuelle moyenne est d'environ 1 400 mm mais peut varier de 1200 à 2400 mm en fonction de l'altitude (Michellon *et al.*, 2004).

¹ La pratique du « tavy » désigne en malgache la pratique de l'abattis-brûlis (slash and burn), qui est habituellement utilisée pour mettre en culture des sols sous forêt ou sous des anciennes jachères. Elle consiste à couper les ligneux puis à brûler la végétation après séchage.

Ce dispositif a été initié en 1991. Il a été implanté sur un sol ferrallitique argileux présentant des caractères andiques selon l'ancienne classification française (Zebrowski et Ratsimbazafy, 1979; CPCS, 1967), ce qui correspond à un Inceptisol suivant la classification pédologique américaine (Soil Taxonomy). Ces sols ne peuvent être considérés comme des Ferralsols suivant la classification FAO, ou des Oxisols suivant la Soil Taxonomy, à cause de l'absence d'un horizon d'accumulation d'argile (Razafimbelo, 2005). Les caractéristiques physico-chimiques de l'horizon 0 - 20 cm de chaque traitement sont présentées dans le *tableau 1*.

Le dispositif expérimental, dans lequel la surface des parcelles élémentaires est de 12,8 m², comprend de nombreux systèmes de culture, répétés 3 fois de façon aléatoire, incluant le mode de préparation des terres et des semis ainsi que des niveaux et des types de fertilisation variables. Dans le cadre de ce travail, nous avons sélectionné quatre systèmes de culture. La succession des cultures est une rotation biennale de maïs et de soja.

Les quatre systèmes de cultures

Ces systèmes de culture se différencient essentiellement par : (i) le mode de préparation du sol : semis direct sur couverture végétale (SCV) ou labour (Lb), (ii) et la fertilisation : Fumier seul (F1) ou Fumier avec engrais NPK et amendement calcique (F2) (*tableau 2*):

- Le labour est réalisé avec une bêche (angady) sur une profondeur de 20 à 25 cm. Avant le labour, les résidus de récolte sont coupés et exportés hors de la parcelle. Le sarclage après semis ou en cours du cycle se fait manuellement.
- Le système SCV est conduit avec une couverture morte; le sol est recouvert par des résidus de récolte qui sont restitués sur la parcelle chaque année après la récolte. Le sol n'est jamais travaillé et le semis est effectué directement dans la couverture après ouverture d'un simple trou. Avant semis et pendant le cycle de la culture on utilise un herbicide (gramoxone de 1,5 à 2 L ha⁻¹) pour lutter contre les adventices.
- Le traitement F1 consiste en un apport annuel 5 t ha⁻¹ de fumier de bovin et correspond à une pratique courante et recommandée en milieu paysan.
- Le traitement F2 consiste en un apport annuel 5 t ha⁻¹ de fumier de bovin plus une fertilisation minérale NPK et un amendement calcique sous forme de dolomie à raison de 500 kg ha⁻¹. Les quantités annuelles apportées sont signifiées au *tableau 2*.

Chaque système croise ainsi deux modalités de préparation du sol, semis direct sur couverture végétale (SCV) ou labour (Lb), et deux modalités de fertilisation.

Rendements des cultures

Les grains ont été récoltés à maturité et séparés des autres parties aériennes. Le poids de matière sèche (à 105 °C) de grains

récoltés est déterminé tous les ans. Pour le système SCV, la biomasse restituée sous forme de résidus de récolte (BRC) a été calculée à partir du rendement en grain (RG) en utilisant une équation spécifique à chaque culture :

- pour le maïs (Albrecht, communication personnelle): $BRC = 1,3411RG - 0,0586$

- pour le soja (Ghosh *et al.*, 2004 a et b): $BRC = 2,5949RG + 0,1269$

Détermination de la teneur du P dans les parties récoltées

Les grains de maïs et les graines de soja, récoltés à maturité pour chaque parcelle étudiée, ont été séchés à l'air avant d'être pesés. Une aliquote est stockée et archivée avant d'être broyée pour obtenir une poudre puis séchée à l'étuve à 60 °C avant analyse de la teneur du P.

Calcul du bilan de P

Les différents flux constitutifs du bilan sont listés dans la *figure 1*. Une méthode de calcul du bilan de P implique la connaissance : des flux d'entrée (fertilisants organiques ou minéraux), des flux de sortie sous forme de produits récoltés (grain, tige, feuille, gousses...) et des pertes hors parcelle et hors horizon des sols analysés sur 20 cm de profondeur. Le bilan de P, somme algébrique des différents postes, peut être calculé tous les ans à l'échelle de la parcelle de même que le bilan cumulé de phosphore, somme année après année des bilans annuels.

$$\text{Bilan de P} =$$

$$\text{Quantité totale de P apportée} - \text{Quantité totale de P exportée}$$

Analyses statistiques des données

L'effet du système de culture sur le rendement annuel et cumulé ainsi que sur les bilans P, annuel et cumulé, ont été analysés statistiquement par une analyse de variance à deux facteurs (SCV et Lb) et deux modalités de fertilisation (F1 et F2). L'effet des quatre traitements sur les données a également été analysé en comparant entre elles les moyennes avec un test t de Student. Les écarts sont considérés comme significatifs pour un seuil de probabilité inférieur à 0.05.

RÉSULTATS

Caractéristiques physico-chimiques des terres analysées (0-20 cm)

Les résultats pour les quatre traitements sont regroupés dans le *tableau 1*. La granulométrie des parcelles, réalisée en condition standard de dispersion (Afnor, 1999), indique que 45-60 % des

Tableau 1: Caractéristiques physico-chimiques de l'horizon (0-20 cm) pour les différents traitements à Andranomanelatra.**Table 1:** Physico-chemical characteristics of soil profile horizons (0-20 cm), Andranomanelatra.

		Lb_F1	Lb_F2	SCV_F1	SCV_F2
pH					
pH Eau sol	-	4.52	5.10	4.86	5.34
pH KCl N	-	4.20	4.48	4.23	4.58
Granulométrie					
Argile (< 2 µm)	g kg ⁻¹	535	458	607	582
Limons fins (2-20 µm)	g kg ⁻¹	223	245	187	224
Limons grossiers (20-50 µm)	g kg ⁻¹	65	100	57	49
Sables fins (50-200 µm)	g kg ⁻¹	88	85	60	53
Sables grossiers (200-2000 µm)	g kg ⁻¹	89	112	89	92
Carbone (C) Organique-Azote (N) Total du sol					
Carbone (C) organique	g kg ⁻¹	31.3	31.1	39.7	37.8
Azote (N) total	g kg ⁻¹	2.22	2.27	2.92	2.8
C/N	-	14.1	13.7	13.6	13.5
Matière organique	g kg ⁻¹	54.1	53.8	68.6	65.4
CEC, Proton (H+) Cobaltihexamine					
CEC cobaltihexamine	cmol kg ⁻¹	4.24	4.88	5.49	6.18
Protons (H+)	cmol kg ⁻¹	0.48	0.48	0.52	0.40
Ca, Mg, Na, K, Fe, Min, Al à la Cobaltihexamine					
Calcium (Ca)	cmol kg ⁻¹	0.32	1.50	1.33	3.20
Magnésium (Mg)	cmol kg ⁻¹	0.13	1.03	0.63	2.01
Sodium (Na)	cmol kg ⁻¹	0.011	0.009	0.017	0.014
Potassium (K)	cmol kg ⁻¹	0.099	0.206	0.242	0.415
Fer (Fe)	cmol kg ⁻¹	0.019	0.022	0.020	0.019
Manganèse (Min)	cmol kg ⁻¹	0.112	0.106	0.139	0.107
Aluminium (Al)	cmol kg ⁻¹	2.30	0.95	1.81	0.59
Si, Al, Fe Tamm en obscurité					
Silicium (Si)	g 100g ⁻¹	0.12	0.12	0.13	0.12
Aluminium (Al)	g 100g ⁻¹	1.26	1.18	1.19	1.09
Fer (Fe)	g 100g ⁻¹	0.38	0.37	0.39	0.36
Si, Al, Fe MEHRA-JACKSON					
Silicium (Si)	g 100g ⁻¹	0.13	0.12	0.14	0.13
Aluminium (Al)	g 100g ⁻¹	1.59	1.48	1.47	1.40
Fer (Fe)	g 100g ⁻¹	5.04	4.84	4.62	4.65
Phosphore (P ₂ O ₅) Total HF Sol					
Phosphore (P ₂ O ₅)	g 100g ⁻¹	0.138	0.153	0.150	0.177

Tableau 2: Quantités (kg ha⁻¹) apportées annuellement d'azote (N), de phosphore (P) et de potassium (K) pour les niveaux de fertilisation F1 et F2 dans le dispositif étudié.

Table 2: Nitrogen (N), Phosphorus (P) and Potassium (K) annual inputs (in kg ha⁻¹) of F1 and F2 fertilizer levels in the studied designs.

Culture	Désignation	N			P			K		
		Fumier	Engrais ^a	Total	Fumier	Engrais ^b	Total	Fumier	Engrais ^c	Total
kg ha ⁻¹										
Maïs/Soja	F1	50	-	50	6,1	-	6,1	64,2	-	64,2
Maïs	F2	50	99	149	6,1	29,5	35,6	64,2	41,8	106,0
Soja	F2	50	30	80	6,1	29,5	35,6	64,2	41,8	106,0

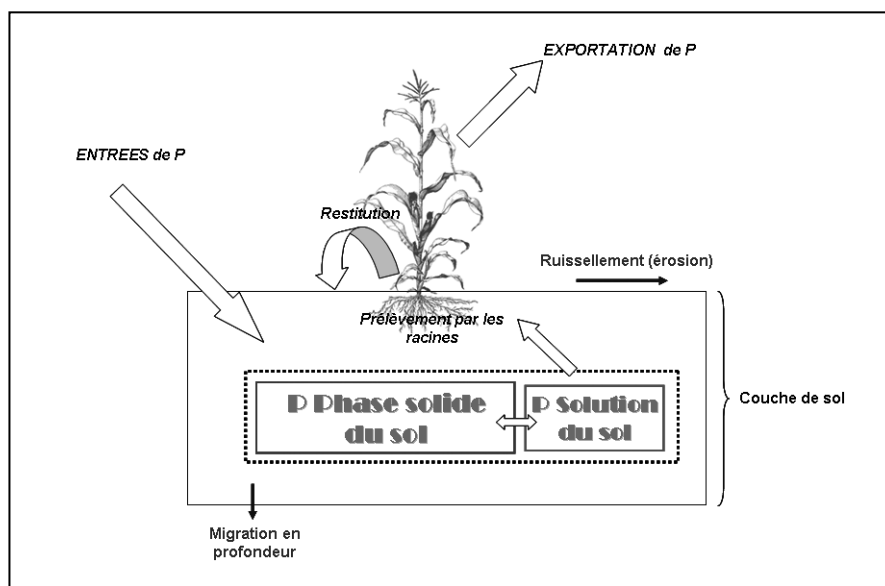
^a sur maïs, l'azote minéral a été apporté sous forme de phosphate d'ammoniaque avant le semis et de 100 kg ha⁻¹ d'urée 25 j après le semis. Un apport supplémentaire de 50 kg ha⁻¹ a été réalisé sur maïs 60 j après semis.

^b quelle que soit la culture, le phosphore minéral a été apporté à raison de 150 kg ha⁻¹ de phosphate d'ammoniaque à Andranomanelatra et Bema et de 100 kg ha⁻¹ à Beta.

^c le potassium a été apporté à raison de 80 kg ha⁻¹ de chlorure de potassium à Andranomanelatra et Bema et de 50 kg ha⁻¹ à Beta.

Figure 1 : Représentation schématique du cycle du phosphore dans un écosystème, fertilisé et cultivé sous grande culture.

Figure 1: Phosphorus cycle of fertilized and cultivated ecosystem under field crop.



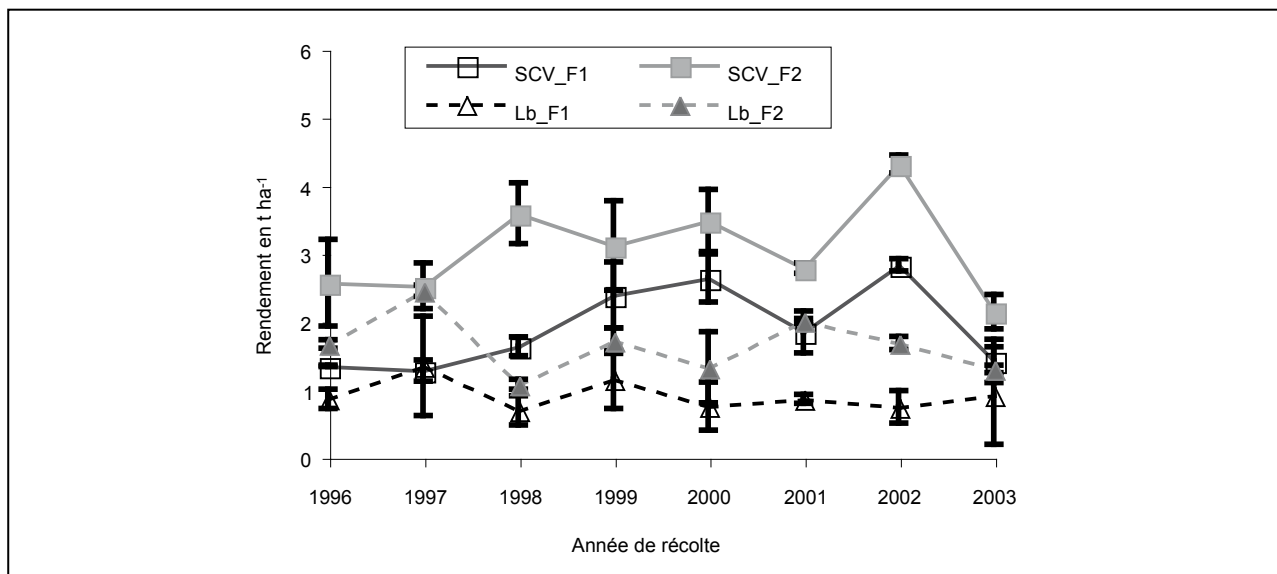
particules sont de taille inférieure à 2 µm (argiles), c'est dire que ces sols ont une texture argileuse. Le pH varie en fonction des traitements, surtout avec le niveau de fertilisation: avec le système labour, le pH est de 4,52 pour F1 et de 5,10 pour F2; avec le système SCV le pH est de 4,86 pour F1 et de 5,34 pour F2. Cette différence en F2 est expliquée par l'apport des dolomies à raison de 500 kg ha⁻¹ an⁻¹. La capacité d'échange de cations (CEC) est faible et varie également selon les traitements. Elle est plus élevée avec le système SCV et F2 par rapport au système labour et F1 (Lb_F1=4.24 cmol⁺ kg⁻¹, Lb_F2=4.88 cmol⁺ kg⁻¹, SCV_F1=5.49 cmol⁺ kg⁻¹ et SCV_F2=6.18 cmol⁺ kg⁻¹). La teneur de la matière organique est significativement différente dans les deux systèmes de culture, alors qu'elle ne l'est pas avec les modes de fertilisation (5,41 % en Lb_F1 contre 6,86 % en SCV_F1 et 5,38 % en Lb_F2 contre 6,54 % en SCV_F2).

Production de biomasse (grains et résidus de récolte)

L'évolution pluriannuelle de la moyenne (n= 3) des rendements est présentée pour les différents traitements dans la figure 2. Ne seront présentés que les résultats obtenus au cours de la période 1996 à 2003, soit 8 campagnes, les données étant incomplètes pour la période antérieure. Pour chaque traitement, on note une variabilité interannuelle élevée avec des rendements moyens variant de 0,6 t ha⁻¹ et 4,1 t ha⁻¹. De même, les différences entre traitements sont aussi très variables, de quelques centaines de kilogrammes à plusieurs tonnes par hectare. Cette variabilité élevée ne permet pas la mise en évidence d'écart significatifs de rendements entre les années d'étude en fonction de systèmes de culture testés. Pour lever cette difficulté, nous avons calculé le rendement cumulé pour chaque parcelle en additionnant le

Figure 2: Evolution pluriannuelle de la moyenne du rendement en grain ($t\ ha^{-1}$) en fonction des traitements dans une rotation culturale Maïs/Soja de 1996 à 2003.

Figure 2: Pluriannual evolution (from 1996 to 2003) of the grain yield ($t\ ha^{-1}$) of the different treatments of Maize/Soybean rotation in Andranomanelatra site.



rendement de chaque année sur la période d'expérimentation de 8 ans. La moyenne, et son écart-type, ont ensuite été calculés ainsi que l'ANOVA et la comparaison des traitements pour les différents dispositifs. L'ANOVA à deux facteurs et deux modalités, fertilisation à deux niveaux et système de culture avec deux modalités également, montre qu'il y a un effet significatif des deux facteurs avec interaction. Le traitement Lb_F1 est utilisé comme référence pour la comparaison des différents traitements (tableau 3). On note que le système SCV permet, en 8 ans, un gain de +104 % par rapport au système Lb (comparaison Lb_F1 et SCV_F1). Selon le tableau 3, le gain associé à la fertilisation la plus élevée (fumier avec engrais minéraux NPK et dolomie) est de 80 % (comparaison Lb_F1 et Lb_F2). L'effet de l'interaction des deux facteurs, système de culture et fertilisation, peut atteindre jusqu'à 60 %. L'effet des traitements sur la biomasse des résidus récoltés (tableau 3) est similaire à celui enregistré sur le rendement grain.

Les ions phosphates dans la solution du sol (Cp)

Dans le but de comprendre les origines de variations des rendements des cultures en fonction des traitements, nous présentons dans la figure 3 la valeur des concentrations, Cp, des ions phosphates dans la solution du sol. Les différences sont significatives quel que soit le traitement: 0,015 mg de P l⁻¹ pour SCV_F1, 0,004 mg de P l⁻¹ pour Lb_F1, 0,024 mg de P l⁻¹ pour SCV_F2 et 0,013 mg de P l⁻¹ pour Lb_F2.

Si la valeur de Cp ne suffit pas pour expliquer la biodisponibilité de P quelles que soient les conditions de culture, elle est néanmoins considérée comme un élément incontournable de la nutrition phosphatée des plantes depuis que Barber en a démontré le rôle majeur. La concentration des ions phosphate dans la solution de terre est une des composantes de la biodisponibilité du phosphore des terres, laquelle est totalement définie en déterminant le P dans la solution du sol + le P dans la phase solide du sol susceptible d'approvisionner la solution du sol par diffusion (Morel, 2002). La figure 4 montre une forte corrélation entre la concentration des ions phosphates dans la solution des terres et les rendements de cultures. Les études menées par Rabeharisoa *et al.* (2007) et Rabeharisoa *et al.* (2009) ont montré l'importance de Cp dans la gestion de la fertilité phosphatée et la détermination de la dynamique et de la biodisponibilité de P dans les sols cultivés de Madagascar.

Teneur de P dans les grains et les résidus de récolte

La teneur de P ne varie pas significativement entre les traitements (tableau 4): elle est de 4.0 kgP (t MS)⁻¹ pour le soja et de 1.7 kgP (t MS)⁻¹ pour le maïs. Ces valeurs sont cohérentes avec celles publiées par Pieri (1985) pour la teneur en P des graines de soja, comprise entre 5.5 et 6,1 kg P t⁻¹ et celle des grains de maïs, comprise entre 2.1 et 2,9 kg P t⁻¹. La teneur de P dans les résidus est de 1.1 kgP (tMS)⁻¹ pour le maïs et 0.3 kgP (tMS)⁻¹ pour le soja (Michellon *et al.*, 2003).

Figure 3 : Concentration des ions phosphates dans la solution de sol (Cp, mg P L⁻¹) selon les différents traitements dans le dispositif d'Andranomanelatra.

Figure 3 : Concentration of phosphate ions in the soil solution (Cp, mg P L⁻¹) in the different treatments in the experimental design of Andranomanelatra.

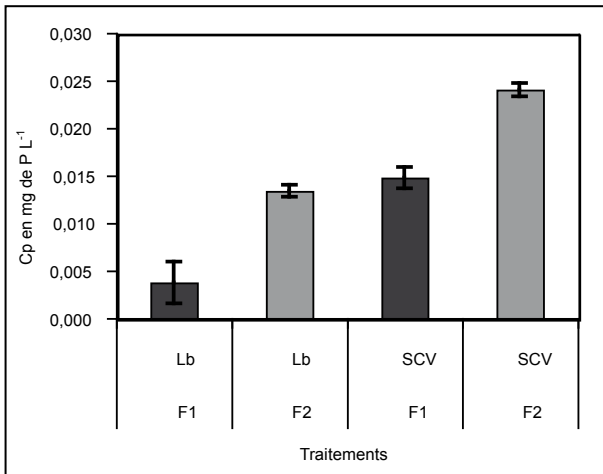


Figure 4 : Corrélation entre la concentration des ions phosphates et le rendement cumulé pendant 8 ans, Andranomanelatra.

Figure 4 : Correlation between concentration of phosphate ions and cumulated yields for 8 years, Andranomanelatra.

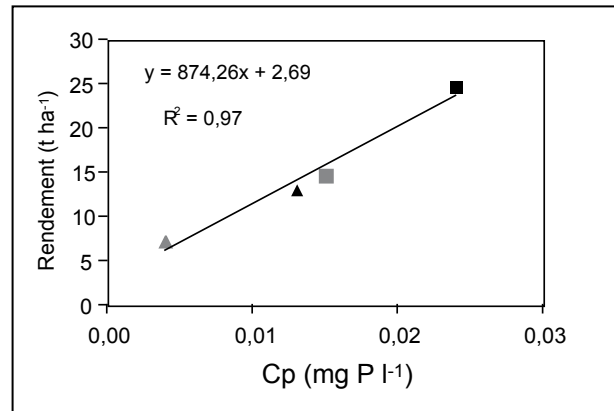


Tableau 3 : Moyennes et écart-types (n=3) du rendement en grains et des résidus de récoltes (t ha⁻¹) pour les différents traitements. Les valeurs ont été obtenues en cumulant les quantités récoltées obtenues de 1996 à 2003.

Table 3 : Means and standard deviations (n=3) of maize and soybean yields and residues quantities cumulated for 8 years.

	SCV_F1	SCV_F2	Lb_F1	Lb_F2
Rendement grains (t ha ⁻¹)	14,7 (±1,0) b	24,7 (±1,9) a	7,2 (±2,2) c	13,1 (±0,7) b
Résidus de récolte (t ha ⁻¹)	28,1 (±2,0) b	47,2 (±3,0) a	13,6 (±3,2) c	25,0 (±1,8) b
Δ rendement grains par rapport Lb_F1 (%)	+104%	+243%	0%	+82%

Tableau 4 : Quantités (kg ha⁻¹) exportées annuellement de phosphore (P) pour les niveaux de fertilisation F1 et F2 dans le dispositif étudié.

Table 4 : Phosphorus (P) annual outputs (in kg ha⁻¹) of F1 and F2 fertilizer levels in the studied designs.

Année de récolte	F1				F2			
	SCV	Lb			SCV	Lb		
		Pgrain	Présidu	P(g+r)		Pgrain	Présidu	P(g+r)
1996	2,3±0,0	3,4±0,6	0,7±0,1	4,1±0,7	4,3±1,1	6,6±0,2	1,3±0,0	7,9±0,2
1997	5,1±0,6	2,3±1,2	1,9±1,1	4,2±2,3	10,0±1,3	4,1±0,1	3,5±0,1	7,6±0,2
1998	2,8±0,2	2,7±0,9	0,6±0,2	3,3±1,1	6,1±0,8	4,2±0,3	0,9±0,1	5,1±0,4
1999	9,5±1,9	1,9±0,7	1,6±0,6	3,5±1,3	12,4±2,6	2,9±0,3	2,4±0,3	5,3±0,6
2000	4,5±0,6	3,0±1,4	0,6±0,3	3,6±1,7	5,9±0,8	5,2±2,1	1,1±0,4	6,3±2,5
2001	7,3±1,2	1,4±0,1	1,1±0,1	2,5±0,2	11,1±0,3	3,4±0,1	2,9±0,1	6,3±0,2
2002	4,8±0,2	2,9±1,0	0,6±0,2	3,5±1,2	7,3±0,2	6,7±0,4	1,3±0,1	8,0±0,5
2003	5,6±1,3	1,5±1,2	1,3±1,1	2,8±2,3	8,5±1,0	2,2±0,1	1,8±0,1	4,0±0,2

Tableau 5: Bilan annuel et cumulé sur 8 ans (kg ha^{-1}) de phosphore (P) pour les quatre traitements dans le dispositif étudié.**Table 5:** Annual balance and Cumulated balance of Phosphorus for 8 years (in $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) for the four treatments in the studied designs.

Année de récolte	Lb_F1	Lb_F2	SCV_F1	SCV_F2
	kg ha^{-1}			
1996	2,0±0,7	27,7±0,3	3,8±0,0	31,3±1,1
1997	1,9±2,3	27,9±0,3	1,0±0,6	25,6±1,3
1998	2,8±1,0	30,5±0,4	3,3±0,2	29,5±0,8
1999	2,6±1,3	30,3±0,6	-3,4±1,9	23,2±2,6
2000	2,5±1,7	29,3±2,5	1,6±0,6	29,7±0,8
2001	3,6±0,2	29,3±0,1	-1,2±1,2	24,5±0,3
2002	2,6±1,1	27,6±0,5	1,3±0,2	28,3±0,2
2003	3,3±2,3	31,6±0,2	0,5±1,3	27,1±1,0
Cumul	21,4 ($\pm 7,3$) b	234,1 ($\pm 3,3$) a	7,0 ($\pm 4,5$) b	219,1 ($\pm 21,2$) a

Les flux entrants de phosphore dans la parcelle

Les quantités d'éléments épandus chaque année sont présentées en fonction des traitements et des cultures (*tableau 2*). Pour la modalité F1 en système SCV et système labour, les 5 t ha^{-1} de fumier épandues chaque année apportent l'équivalent de 6,1 kg P ha^{-1} . Pour la modalité F2, la quantité de P apportée est identique pour les systèmes de culture comportant labour ou SCV. La quantité totale de P apportée dans le fumier et dans le phosphate d'ammoniaque est de 35,6 $\text{kg P ha}^{-1} \text{an}^{-1}$.

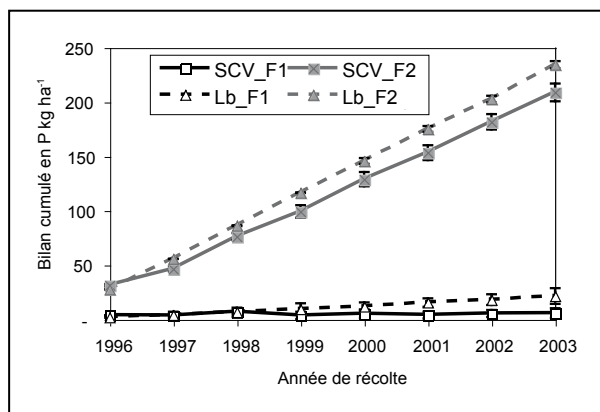
Les retombées atmosphériques de P par les poussières et les pluies ont été supposées négligeables. Elles ne sont généralement pas mesurées. Dans les rares cas où les apports de P par les retombées atmosphériques ont été mesurés, les valeurs obtenues montrent que ces apports sont faibles (Pieri, 1985) en comparaison du flux de P exporté par les récoltes.

Les flux sortants de P de la parcelle

Plusieurs flux peuvent entraîner du P à l'extérieur de la parcelle (*figure 1*):

- les exportations par les récoltes et, éventuellement, celles par les résidus de culture chaque fois qu'ils ne sont pas restitués au sol,
- le ruissellement et la migration de P vers la profondeur du profil.

Dans le cadre de cette étude, on suppose que les flux autres que ceux dus aux récoltes sont négligeables. Quant aux exportations annuelles dues aux récoltes en F2, elles sont supérieures à celles observées en F1 (*tableau 4*). De plus, bien que les résidus de récolte soient exportés dans le système avec labour, le flux de P exporté, somme de la quantité de P dans les grains récoltés et dans les résidus de récolte, dans ce système reste plus faible que dans le système SCV. Ce phénomène a pour origine que les rendements en SCV et F2 sont plus élevés que les rendements obtenus dans Lb et de F1.

Figure 5: Bilan cumulé en P (kg ha^{-1}) dans les quatre traitements pour le site d'Andranomanelatra.**Figure 5:** Cumulated P balance (kg ha^{-1}) of the four treatments of Andranomanelatra.

Les bilans annuels et cumulés de P

Les bilans annuels (*tableau 5*) sont très différents entre les deux niveaux de fertilisation phosphatée, mais pour un niveau donné, ils sont similaires pour les deux systèmes SCV et labour. Le bilan cumulé de P est présenté sur la *figure 5* et les moyennes et écart-types au *tableau 5*. Ce bilan cumulé de P est toujours positif (*figure 5*) mais diffère significativement entre les deux régimes de fertilisation. C'est dire qu'il ne doit pas conduire aux situations si souvent décrites des zones africaines sub-sahariennes à bilan négatif, dans lesquelles la pratique agricole a pour conséquence une lente diminution des fertilités chimiques (Sanchez *et al.*, 1997). La modalité F1 permet d'obtenir des bilans cumulés de P légèrement positifs avec une moyenne de l'ordre de 2 $\text{kg P ha}^{-1} \text{an}^{-1}$. Pour la modalité F2, le bilan cumulé de P est très excédentaire.

DISCUSSION

Sur la productivité de biomasse

La variabilité interannuelle des rendements peut s'expliquer soit par des sécheresses et des vents violents qui ont provoqué des dégâts mécaniques (dessèchement des feuilles) et c'est le cas du soja sur le système Lb, soit par l'attaque d'insectes (vers blancs) et de nouvelles maladies qui affectent les plantes en fin de cycle (rouille, complexe fongique, anthracnose, septoriose) provoquant ainsi une réduction importante des rendements (Michellon *et al.*, 2004).

Malgré ces variations l'effet des différents traitements sur les rendements est quantifiable. En effet, l'apport des engrais phosphatés à raison de $30 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ou l'adoption d'un système SCV permet de doubler le rendement (*tableau 3*). L'effet cumulé des engrais minéraux et SCV permet d'avoir des rendements 2,5 fois plus élevés qu'avec labour et fumiers (Lb_F1). Le gain de rendement est alors à l'origine non seulement dû à l'apport supplémentaire des engrais phosphatés dans le cas de F2, mais aussi à l'effet du système SCV qui permet de libérer progressivement du P disponible (*figure 3*). Malgré les besoins d'azote, le phosphore a été considéré comme premier facteur limitant pour les plantes (Rabeharisoa, 2007). La *figure 4* montre la corrélation existant entre la concentration des ions phosphates dans la solution du sol et le rendement. Dans ce système SCV, la concentration minimale indispensable à l'influx de P par le système racinaire est largement dépassée (*figure 3*). Ces sols ayant un potentiel de transfert de P entre phase solide de la terre et phase liquide très élevé (Rabeharisoa, 2004), le P phytodisponible ne serait plus limitant après quelques années de SCV surtout si on y ajoute des fertilisations minérales de base.

Sur les flux sortants de P de la parcelle

Concernant les transferts de P vers la profondeur du profil qui sont supposés négligeables, cette hypothèse est raisonnable compte tenu de la texture argileuse du sol, mais surtout de la présence élevée d'oxyhydroxydes de fer et d'aluminium cristallisés ou amorphes (*tableau 1*) qui sont connus pour posséder un pouvoir fixateur très élevé vis-à-vis du P (Frossard *et al.*, 1992, 1993). Un calcul rapide, volume d'eau lixivié (environ 500 mm) par la concentration de la solution de P en solution dans ce type de sol de l'ordre de $20 \mu\text{g P l}^{-1}$ (Rabeharisoa, 2004; Oberson *et al.*, 1999), montre que le P lixivié ne représente qu'une centaine de grammes de P par hectare.

L'hypothèse selon laquelle P ruisselé serait négligeable, en comparaison des apports et/ou des exportations, est moins solide, en particulier pour le système Lb plus susceptible d'érosion hydrique que le système SCV. Rasoloniaina (2005) a montré des ruissellements plus élevés (1 100 mm) sur Lb que sur SCV

(450 mm). Il est donc probable que les pertes de P par érosion hydrique/ruissellement diffèrent en particulier avec le mode de préparation et de semis du sol. D'ailleurs, plusieurs études ont souligné que les pertes de terre sont plus importantes en utilisant les techniques de préparation conventionnelle à base de labour que pour les techniques à base de semis direct. Ainsi, Silva *et al.* (1997), rapportent une perte annuelle, en moyenne sur 5 ans, de $40 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour une parcelle des Cerrados (savane) brésilienne sous climat tropical saisonnier ayant une pente de $0,04 \text{ m m}^{-1}$. Pour les systèmes à base de semis direct sur couverture permanente du sol, les pertes étaient environ 10 fois plus faibles. L'étude faite par Rasoloniaina en 2005 sur les hautes terres malgaches, dans les dispositifs de TAFE Antsirabe, a montré que la perte en terre est plus importante ($35 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) avec le système labour qu'avec celui de semis direct ($7,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$). Compte tenu de la teneur en P total de ce type de sol, en moyenne de $1000 \text{ kg P ha}^{-1}$ (Rabeharisoa, 2004), le flux annuel de P ruisselé est de $17,5 \text{ kg P ha}^{-1}$ pour le système labour et $3,75 \text{ kg P ha}^{-1}$ pour le SCV, le départ de P n'étant ici qu'une des conséquences négatives en tous points du départ de la terre.

Sur le bilan de P

L'effet du niveau de fertilisation P c'est-à-dire de l'apport supplémentaire très excédentaire, dans le traitement F2, par rapport aux exportations dues aux récoltes, des engrais phosphatés est significatif sur le bilan cumulé. Ce résultat tient au fait que le surplus de P apporté est très supérieur au P exporté dans le rendement. Par contre, l'effet du système de culture n'est significatif que dans une seule situation : le régime F2 du système SCV. Ce phénomène est dû à l'effet cumulé du système SCV et du niveau de fertilisation F2. Le sol est alors dans une situation d'accumulation de P, phénomène qui, s'il est maintenu et accentué, pourrait entraîner des désordres dans le fonctionnement du cycle biogéochimique de P. Les pertes de P des sols agricoles par érosion/ruissellement, et par lixiviation le long du profil, peuvent, sous conditions, représenter des flux qui ne sont plus négligeables. Ces flux sortants peuvent alimenter les eaux de surface en P et en autres éléments nutritifs majeurs, contribuant ainsi au déclenchement du processus d'eutrophisation et de ses effets néfastes sur la valorisation de ces eaux (Pellerin *et al.* 2005). Les risques dans le cas des tanety restent néanmoins hypothétiques tant le pouvoir fixateur, pour le phosphore, des oxydes de fer et d'aluminium est important.

CONCLUSION

Avec des apports d'engrais minéraux et d'amendements organiques et basiques ainsi qu'avec l'adoption du système de culture SCV, la productivité d'un sol et le bilan de P peuvent profondément changer. La modification de la concentration des ions phosphate

dans la solution du sol en fonction des différents traitements affecte les rendements de culture. Il ne s'agit pas uniquement de modification de la quantité de P pour la nutrition des plantes, avec ses répercussions sur la phytodisponibilité de P, mais aussi de répercussions sur la productivité de biomasse. L'application de la méthode de calcul des bilans en tenant compte les flux entrants et sortants de P a permis de voir le degré d'enrichissement ou d'épuisement du P dans les sols selon les traitements. Tout en sachant que les flux sortants de P sont dominés par les exportations dans les grains et dans la biomasse des résidus de récoltes (dans le cas de non restitution des résidus au sol) et que les flux entrants ne changent pas chaque année, les bilans annuels ont alors suivi l'évolution annuelle des rendements de culture. La comparaison des bilans entre les deux systèmes de culture SCV et labour était délicate en raison de la variabilité interannuelle élevée des rendements. Mais en faisant les bilans cumulés sur plusieurs années, la différence est, à l'évidence, au bénéfice du système SCV. Ce qui permet de dire qu'avec le système SCV et la fertilisation minérale de base, l'amélioration des fertilités phosphatées mesurées par le biais de la concentration des ions phosphates dans la solution du sol pourrait être espérée après quelques années de son installation. Autant la différence, aussi bien sur les rendements que sur les bilans de P, est très significative sur les deux régimes de fertilisation, autant les engrais minéraux ont aussi un effet marqué sur les équilibres nutritifs du sol. Cette étude a ainsi montré l'importance du système SCV dans la libération progressive des ions phosphates dissous dans la solution du sol permettant de lever les contraintes de biodisponibilité du phosphore dans ces sols à fort pouvoir fixateur vis-à-vis de cet élément.

BIBLIOGRAPHIE

- Afnor, 1999 - Recueil de normes françaises. Qualité de sols : protocole d'évaluation d'une méthode alternative d'analyse physico-chimique quantitative par rapport à une méthode de référence. Afnor, Paris La défense, France.
- CPCS, 1967 - Classification des sols, Commission de Pédologie et de Cartographie des sols. Document ronéoté, 96 p.
- Feller C., 2007 - Les sols tropicaux en semis direct sous couvertures végétales. Communiqué de presse (CD rom). Séminaire international à Madagascar 2007.
- Frossard E., Feller C., Tiessen H., Stewart J.W.B., Fardeau J.C., Morel J.L., 1992 - Can an isotopic method allow for the determination of the phosphate-fixing capacity of soils ? *Comm. Soil Sci. Pl. Anal.*, 23 : 367-377.
- Frossard E., Brossard M., Feller C., Rouiller J., 1993 - Pouvoir fixateur vis-à-vis des ions phosphate de sols tropicaux à argile 1 : 1. *Can. J. Soil Science*, 72 : 135-143.
- Ghosh P. K., Ajay, Bandyopadhyay K. K., Manna M. C., Mandal K. G., Misra A. K. et Hati K. M., 2004a - Comparative effectiveness of cattle manure, poultry manure, phosphocompost and fertilizer-NPK on three cropping systems in vertisols of semi-arid tropics. II. Dry matter yield, nodulation, chlorophyll content and enzyme activity. *Bioresource Technology*, 95, 85-93.
- Ghosh P. K., Ramesh P., Bandyopadhyay K. K., Tripathi A. K., Hati K. M., Misra A. K. et Acharya C. L., 2004b - Comparative effectiveness of cattle manure, poultry manure, phosphocompost and fertilizer-NPK on three cropping systems in vertisols of semi-arid tropics. I. Crop yields and system performance. *Bioresource Technology*, 95, 77-83.
- Husson, O., Séguy L., Michellon R. and Boulakia S., 2006 - Restoration of acid soil systems through agroecological management. Pp. 343-356. *In* : Biological approaches to sustainable soil systems. Ed. N. Uphoff *et al.* CRC Taylor & Francis.
- Michellon R., Moussa N., Rakotoniaina F., Fara Hanitriniaina J. C., Razakamiamanana, 2003 - Amélioration de la fertilité par écobuage : influence de la fréquence et de l'intensité de la combustion selon le type de sol de tanety, 36 p.
- Michellon R., Razanapary C., Moussa N., Andrianasolo H., Fara Hanitriniaina J. C., Razakamanantoanina R., Rakotovazaha L., Randrianaivo S., Rakotoniaina F., 2004 - Rapport de campagne 2002-2003 Hautes Terres et Moyen Ouest, 98 p.
- Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche (MAEP), 2004 - Lettre de Politique de Développement Rural à Madagascar.
- Morel C., 2002 - Caractérisation de la phytodisponibilité du phosphore du sol par la modélisation du transfert des ions phosphates entre le sol et la solution. HDR, 80 p.
- Oberson A., Friesen D.K., Tiessen H., Morel C., Stahel W., 1999 - Phosphorus status and cycling in native savanna and improved pastures on an acid low-P Colombian Oxisol. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 55:77-88.
- Pellerin S., Dorioz J.M., Morel C., 2005. Bilan environnemental du Phosphore. *In* : Sols et Environnement, Dunod, Paris, France.
- Pieri C., 1985 - Bilans minéraux des systèmes de cultures pluviales en zones arides et semi-arides. *L'Agronomie Tropicale* 40 : 1-20.
- Rabeharisoa L., Randriamanantsoa L., Andriamaniraka H., Morel C., 2009 - Use of ³²P to calibrate and simulate dynamics of plant-available phosphorus in cultivated Malagasy soils. *Soils Newsletter*, Vol. 32, N°1, July 2009.
- Rabeharisoa L., Morel C. et Vives A., 2007 - Phosphore en solution et gestion de la fertilité des ferralsols de « tanety » de Madagascar. *Bulletin de l'Académie Malgache*, Tome 84/2 Juillet-Décembre 2005, and ISSN 1728-4317.
- Rabeharisoa L., 2007 - Libérons le phosphore. Communication personnelle. AcNALS (Académie Nationale des Arts, des Lettres et des Sciences)
- Rabeharisoa L., 2004 - Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des hautes terres de Madagascar. Thèse de Doctorat de l'Université D'Antananarivo, Spécialité : science du sol. 202 p.
- Rakotondravelo J.C., 2003 - Les grands systèmes de culture des petites exploitations malgaches et les modes de reproduction de la fertilité des sols. Actes du Colloque scientifique international « Sol, environnement et développement » organisé dans le cadre de la célébration du centenaire de l'AcNALS. *Mém. Acad. Nat. Art Lett. Sc.*, 49
- Ramanankasina E. et Rabeharisoa L., 2003 - La terre, un héritage à bien gérer. Actes du Colloque scientifique international « Sol, environnement et développement » organisé dans le cadre de la célébration du centenaire de l'AcNALS. *Mém. Acad. Nat. Art Lett. Sc.*, 49 : 43-50.
- Rasoloniaina M., 2005 - Caractérisation des impacts de différents systèmes de culture en semis direct sur couverture végétale sur la réduction de ruissellements et érosions. Mémoire d'ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, 49 p.
- Razafimbelo T., 2005 - Stockage et protection du carbone dans un sol ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des hautes terres malgaches. Thèse de Doctorat en Science du Sol de l'ENSAM, 123 p.
- Sanchez, P. A. Shepherd, K. D. Soule, M. J., Place F. M. Bruesh, R. J., Izac, A.-M.N. Mokwunye, A. U. Kwesiga, F. R. Ndiritu, C. G. Woomer P. L. 1997 - Soil fertility replenishment an investment in natural resource capital. pp. 1-46. *Replenishment soil fertility in Africa*. SSSA special publication, 51, SSSA. Madison, WI.

- Séguy L., S. Bouzinac S. and O. Husson, 2006 - Direct-seeded tropical soil systems with permanent soil cover. Pp. 323-342. *In*: Biological approaches to sustainable soil systems. Ed. N. Uphoff *et al.* CRC Taylor & Francis.
- Silva MLN., Freitas PL., Blancaneau P., Curi N., Lima JM., 1997 - Relação entre parâmetros da chuva e perdas de solo e determinação da erodibilidade de um Latossolo Vermelho-escuro em Goiânia (GO). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 21, 131-137.
- Zebrowski C. et Ratsimbazafy C., 1979 - Carte pédologique de Madagascar au 1/100 000. Feuille Antsirabe. Paris, Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. www.census.gov/ipc/www/idb/country/maportal.html