

Sommaire

REMERCIEMENTS	i
RESUME	iii
ABSTRACT	iv
Sommaire	v
Liste des abréviations	vii
Liste des Tableaux	viii
Liste des Figures	ix
Liste des Annexes	x
INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : PROBLEMATIQUE, OBJECTIFS, HYPOTHESES ET INDICATEURS	4
1.1 Problématique	4
1.2 Objectifs	7
1.3 Hypothèses	7
1.4 Indicateurs	9
DEUXIEME PARTIE : ETAT DE CONNAISSANCES	10
2.1 Sols ferrallitiques	10
2.1.1 Répartition géographique	10
2.1.2 Sols ferrallitiques à Madagascar	11
2.2 Phosphore, un élément essentiel à la vie	12
2.2.1 Généralités	12
2.2.2 Contrôle de la disponibilité du phosphore dans les « Ferralsols »	13
2.3 Formes du phosphore dans le sol	17
2.3.1 Phosphore minéral ou phosphore inorganique (Pi)	17
2.3.2 P organique (Po)	17
2.4 Fonctionnement des écosystèmes cultivés	19
2.4.1 Fertilité des systèmes conventionnels	19
2.4.2 Fertilité des écosystèmes cultivés en SCV	19
2.4.3 Utilisation des légumineuses dans les jachères ou en interculture dans les systèmes céréaliers	21
TROISIEME PARTIE: MATERIELS ET METHODES	22
3.1 Présentation du dispositif expérimental	22
3.2 Description du dispositif expérimental	24
3.2.1 Systèmes de culture	26
3.2.2 Mode de gestion du sol	26
3.2.3 Mode de fertilisation	26
3.3 Prélèvements du sol	28
3.4 Analyses au laboratoire	29
3.4.1 Détermination du P dans la solution du sol ou P hydrosoluble (Pi _{eau})	29
3.4.2 Détermination du phosphore assimilable	29
3.4.3 Détermination du P total dans le sol	30
3.4.4 Dosage colorimétrique des ions phosphates	30
3.4.5 Calcul et expression des résultats	31

3.5 Analyses statistiques des données.....	31
QUATRIEME PARTIE : RESULTATS et INTERPRETATIONS	33
4.1 Statistiques descriptives.....	33
4.1.1 Pi _{hydrosoluble}	33
4.1.2 Pi _{résine}	34
4.1.3 P Olsen.....	34
4.1.4 P total	36
4.2 Analyse de la variance pour chaque date	37
4.2.1. A T1.....	37
4.2.2 A T5.....	40
4.2.3 A T9.....	43
4.2.4 Comparaison maïs - plantes associées à T9	44
4.3 Analyse diachronique	46
4.3.1 Evolution des effets de la gestion du sol : SCV et LB	46
4.4 Comparaison sur la teneur en Pi _{résine} entre les plantes légumineuses et le maïs	49
CINQUIEME PARTIE : DISCUSSIONS, LIMITES et PERSPECTIVES	50
5.1 SUR LES RESULTATS ET LES HYPOTHESES.....	50
5.1.1 Hypothèse 1	50
5.1.2 Hypothèse 2	52
5.1.3 Hypothèse 3	53
5.2 Limites de l'étude et perspectives	54
CONCLUSION	56
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	57
ANNEXES.....	I
ABSTRACT	
RESUME	

Liste des abréviations

C/N	: Rapport du carbone sur azote
C/P	: Rapport du carbone sur phosphore
CEC	: Capacité d'Echange Cationique
CIRAD	: Centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le
CPCS	: Carte Pédologique de Madagascar-Classification Développement
FM	: Fumure organique + Fumure minérale
FOFIF	: Centre National de Recherches Appliquées au Développement Rural
Fu	: Fumure Organique
IRD	: Institut de Recherche pour le Développement
LB	: Labour
LRI	: Laboratoire des Radioisotopes
mg P	: Milligramme (1 mg P = 2,29 mg P ₂ O ₅)
MO	: Matière Organique
P	: Phosphore
pH	: potentiel Hydrogène
Pi	: Phosphore Inorganique
Pi_{eau}	: Phosphore inorganique hydrosoluble
Pi_{OI}	: Phosphore inorganique de l'Olsen
Pi_{res}	: Phosphore inorganique de la résine
Po	: Phosphore Organique
P_{OI}	: Phosphore total de l'Olsen
Po_{OI}	: Phosphore organique de l'Olsen
P_{tot}	: Phosphore total du sol
SCRiD	: Système de Culture et Riziculture Durable
SCV	: Semis direct à Couverture végétale Permanente
TSP	: Triple Super Phosphate

Liste des Tableaux

Tableau 3-1 : Dénomination des systèmes de culture.....	27
Tableau 3-2 : Dénomination des systèmes de culture au niveau des plantes légumineuses	27
Tableau 4-1 : Présentation des résultats statistiques de l'analyse de la variance de différents traitements pour T1	38
Tableau 4-2: Tableau récapitulatif de la significativité (Mean $\pm$ error standard for the main effects or LS; groupe) à T1.....	39
Tableau 4-3 : Présentation des résultats statistiques de l'analyse de la variance de différents traitements pour T5	41
Tableau 4-4 : Tableau récapitulatif de la significativité (Mean $\pm$ error standard for the main effects or LS; groupe) à T5.....	42
Tableau 4-5: Présentation des résultats statistiques de l'analyse de la variance de différents traitements pour un seul paramètre $Pi_{résine}$ pour la huitième année	43
Tableau 4-6: Tableau récapitulatif de la significativité (Mean $\pm$ error standard for the main effects or LS) à T9	44
Tableau 4-7: Présentation des résultats statistiques de l'analyse de la variance de différents traitements pour un seul paramètre $Pi_{résine}$ au niveau des plantes légumineuses à T9	45
Tableau 4-8: Tableau récapitulatif de la significativité (Mean $\pm$ error standard for the main effects or LS) à T9	45

Liste des Figures

Figure 2-1: Différents types de sols dans le monde.....	10
Figure 2-2: Carte Pédologique de Madagascar-Classification (CPCS)	12
(Source : Delenne et Peletier, 1981)	12
Figure 2-3: Compartimentation du phosphore et notion de disponibilité (A : adsorbé, B : soluble, C : séquestré, E : éléments totaux)	13
Figure 2-4 : Fixation et disponibilité du phosphore suivant le pH	16
Figure 2-5: Comparaison de l'écosystème cultivé en SCV et de l'agriculture conventionnelle avec labour	20
Figure 3-1: Localisation de la commune d'Andranomanelatra.....	22
Figure 3-2: Courbe ombrothermique de la zone d'étude d'Andranomanelatra sur la matrice SCRiD de 2002-2011	23
Figure 3-3 : Profil pédologique du sol Andranomanelatra.....	23
Figure 3-4 : Plan du dispositif expérimental	25
Figure 3-5 : Photo du prélèvement des échantillons de sol à cylindre	28
Figure 3-6 : Photo de la spectrophotométrie en ultraviolet (190-1100 nm) (Metertech SP8001).....	31
Figure 4-1 : Distribution en $Pi_{\text{hydrosoluble}}$ en fonction du temps.....	33
Figure 4-2: Distribution en $Pi_{\text{résine}}$ en fonction du temps.....	34
Figure 4-3: Distribution en Pi_{olsen} en fonction du temps	35
Figure 4-4: Distribution en Po_{olsen} en fonction du temps	36
Figure 4-5: Distribution en P total en fonction du temps	37
Figure 4-7 : Evolution des effets de SCV et LB sur Po_{olsen} de T1 à T5	46
Figure 4-6 : Evolution des effets de SCV et LB sur Pi_{olsen} de T1 à T5	46
Figure 4-9 : Evolution des effets de SCV et LB sur $Pi_{\text{résine}}$ de T1 à T9	47
Figure 4-8 : Evolution des effets de SCV et LB sur P total de T1 à T5	47
Figure 4-11 : Evolution des effets de la fertilisation sur $Pi_{\text{résine}}$ de T1 à T9	48
Figure 4-10 : Evolution des effets de la fertilisation sur Pi_{olsen} de T1 à T5.....	48
Figure 4-13 : Effet des Fu et FM sous des plantes légumineuses et de maïs sur le $Pi_{\text{résine}}$ du sol.....	49
Figure 4-12 : Effet de SCV et LB sous des plantes légumineuses et de maïs sur le $Pi_{\text{résine}}$ du sol	49

Liste des Annexes

Annexes 4-1 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc A à T1	I
Annexes 4-2 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc B à T1	II
Annexe 4-3 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc C à T1	III
Annexe 4-4 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc D à T1.....	IV
Annexe 4-5: Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc A à T5.....	V
Annexe 4-6 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc B à T5	VI
Annexe 4-7 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc C à T5	VII
Annexe 4-8 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc D à T5.....	VIII
Annexe 4-9 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc A à T9.....	IX
Annexe 4-10 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc B à T9.....	X
Annexe 4-11 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc C à T9	XI
Annexe 4-12 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc D à T9.....	XII
Annexe 4-13 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux de blocs A et B au niveau des plantes de légumineuses à T9.....	XIII
Annexe 4-14 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux de blocs C et D au niveau des plantes de légumineuses à T9.....	XIV

INTRODUCTION

Madagascar est un pays agricole : 73,8% des malgaches ont des activités rurales ; les surfaces arables permanentes couvrent 3 500 000 ha des terres (Rakotondravelo, 2003).

La région rurale des Hauts Plateaux se caractérise essentiellement par des densités d'occupation des terres très inégales en fonction de la qualité des sols, par de très faibles rendements agricoles et par une très forte dégradation du milieu naturel. Le système de production dominant sur les hautes terres est centré sur la riziculture irriguée depuis la royauté Merina jusqu'à nos jours. Depuis l'indépendance, une large part des actions conduites par les pouvoirs publics dans le domaine agricole a été orientée vers l'intensification rizicole dans les grandes plaines et les bas fonds. Face à une pression démographique périurbaine croissante, le système de production rizicole n'est plus en mesure de répondre aux besoins vivriers et monétaires de la plupart des familles paysannes. Ceci est d'autant plus marqué, du fait de la crise économique sans précédent que connaît Madagascar depuis une vingtaine d'années, de la faiblesse des ressources monétaires des agriculteurs et des conditions désastreuses du marché, qui remettent en cause l'acquisition d'intrants que nécessitent les pratiques rizicoles intensives qui ont été vulgarisées. Dans ces conditions, la riziculture de bas fonds, qui est un trait essentiel de la vie économique, sociale et culturelle, ne suffit plus à assurer l'auto consommation familiale et les stratégies paysannes visent à diversifier les sources de nourriture et de revenus monétaires des exploitations au delà de la riziculture irriguée, notamment par la conquête des *tanety* (*versants de collines*). Les agriculteurs doivent alors entreprendre la colonisation du vaste réservoir de sols de *tanety*, composés pour une large part de sols ferrallitiques (Ferralsols) développés sur roches acides, de très faible fertilité naturelle, qui produisent très peu, sans autres intrants que le fumier.

Les caractéristiques spécifiques des Ferralsols font tout particulièrement ressortir les problèmes de fertilité des sols agricoles. Leur utilisation continue favorise leur dégradation progressive. Ceci est particulièrement vrai en zone tropicale, notamment dans les pays en développement comme Madagascar, où des systèmes de gestion du sol assez rudimentaires, avec des faibles apports d'engrais, conduisent à un appauvrissement des sols (Rabeharisoa, 2004), entraînant principalement par une baisse des rendements agricoles. Ces sols sont caractérisés notamment par une forte acidité, une faible teneur en matière organique (MO), une forte rétention du phosphore (P) par les constituants des sols tels que les sesquioxides de fer (Fe) et d'aluminium (Al), se traduisant par une très faible teneur en P assimilable par les plantes, malgré une forte teneur en P total. De plus, suite à leur mise en culture, les sols deviennent très facilement

érodables, conduisant à une accélération des pertes en éléments nutritifs (Razafindramanana, 2011).

Dans ces sols, la faible disponibilité du phosphore reste un des problèmes majeurs (Rabeharisoa, 2004 ; Andriamaniraka, 2009). En effet, l'acidité du sol limite très fortement la disponibilité du phosphore inorganique pour les plantes, du fait de l'augmentation de sa sorption sur les sesquioxides de Fe et Al (Dubus et Becquer, 2001).

Afin de s'adapter aux conditions de déficience phosphatée, les plantes peuvent développer divers mécanismes afin : i) d'améliorer leur potentiel d'acquisition ou d'absorption de P par extension des surfaces racinaires (densité et longueur racinaire), synthèse et exsudation d'acides organiques, optimisation des gènes transporteurs des ions phosphates et phosphatase, symbiose mycorhizienne (Vance, 2001 ; Bünemann, 2003) ; et ii) d'améliorer l'efficacité d'utilisation du P par la conservation et la remobilisation des ressources phosphatées, par l'augmentation du taux de croissance par unité de phosphore (Vance, 2001).

L'utilisation de certaines plantes peut favoriser certaines de ces stratégies. Les légumineuses sont reconnues plus efficaces dans l'extraction du P du sol par rapport aux cultures céréalières, efficacité liée à divers mécanismes notamment l'acidification de la rhizosphère et l'exsudation d'acide organique (Tang *et al.*, 2004). Elles peuvent alors stocker le P dans leur biomasse aérienne et ensuite le restituer au sol sous forme de résidus de culture. De plus, les légumineuses, par la fixation symbiotique d'azote, sont des sources importantes d'azote pour le système de culture. Les graminées, par leur enracinement profond et dense peuvent également avoir une action bénéfique sur le recyclage de P.

Par ailleurs, certains systèmes de culture, tels que les « systèmes de cultures en semis direct, sans travail du sol sous couverture végétale » ou SCV, commencent à trouver leur place comme alternative dans la restauration des sols dégradés des pays tropicaux et conséquemment dans l'amélioration de la productivité végétale. Ces systèmes ont été proposés comme une alternative afin de réduire l'érosion du sol et d'améliorer la fertilité du sol dans de nombreux pays tropicaux, comme Madagascar depuis le début des années 1990 (Chapuis-Lardy *et al.*, 2009). Ces systèmes intègrent généralement des plantes à fort potentiel de production de biomasse, notamment des légumineuses et des graminées, pour accroître les teneurs en MO des sols, afin de restaurer la fertilité du sol en termes de stock de carbone organique (C) et d'éléments nutritifs (N, P...), de propriété physique et de déterminants biologiques, notamment la biomasse et les activités microbiennes.

Bien que seul le phosphore inorganique soit accessible aux plantes, l'amélioration de sa biodisponibilité pour les cultures reste un objectif majeur, notamment dans les sols tropicaux.

En particulier, le rôle du phosphore organique, qui réagit beaucoup moins avec le sol que le phosphore minéral et qui est une source de P après sa minéralisation, ou les effets des diverses plantes utilisés dans les systèmes de cultures tel que le SCV, restent encore des objectifs de recherche importants pour le développement d'une agriculture durable. Ainsi notre travail est organisé en cinq parties :

- Problématique, objectifs, hypothèses et indicateurs ;
- Etat de connaissance ;
- Matériels et méthodes ;
- Résultats et interprétations ;
- Discussion, limites et perspectives.

PREMIERE PARTIE : PROBLEMATIQUE, OBJECTIFS, HYPOTHESES ET INDICATEURS

1.1 Problématique

L'agriculture, qui constitue une des principales ressources pour assurer l'alimentation de l'ensemble de la population, doit poursuivre l'augmentation de la productivité des écosystèmes exploités, mais le faire de façon durable sur un plan environnemental et économique (Tilman *et al.*, 2002). En effet, le *développement durable* a pour objectif de préserver les ressources naturelles et de promouvoir des voies de développement qui répondent à la satisfaction des besoins présents sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs (Bruntland, 1987). Le défi posé à la recherche est donc de proposer de nouveaux modèles d'agriculture, visant une conservation maximale de la biodiversité et des processus de régulation naturels au sein des agro-écosystèmes (Plantegenest *et al.*, 2007). Pour ce faire, la stratégie de la recherche doit prendre en compte à la fois, les objectifs et contraintes des agriculteurs, et construire avec eux, d'autres façons de cultiver les sols qui permettent de les exploiter dans la réalité économique d'aujourd'hui, soit au moindre coût avec une utilisation minimum d'intrants, tout en améliorant leur capacité de production à long terme. Par exemple, les techniques de semis direct sur couvertures végétales mortes ou vivantes, mises au point au Brésil aussi bien en grande culture mécanisée que pour la petite agriculture familiale, peuvent permettre de relever ce défi (Seguy *et al.*, 1996, 1999).

La production céréalière malgache, notamment de riz, s'est développée principalement à partir de systèmes rizicoles irrigués dans les vallées. Le développement de la riziculture nécessite d'accroître les cultures de riz pluvial, notamment sur les *tanety*, les collines caractéristiques des Hautes Terres de Madagascar. Actuellement, l'aménagement des *tanety* fait partie des alternatives qui apporteront des solutions à une insuffisance d'espace agricole pour répondre aux besoins de production face à la pression démographique, surtout près des grandes villes des Hauts Plateaux. Néanmoins, leur exploitation plus intensive et durable est subordonnée avant tout, à la restauration de la fertilité, puis à son entretien au moindre coût, avec des techniques qui permettent aussi de contenir et réguler les flux hydriques et de matières solides au niveau des unités de paysages. En effet, le contrôle de l'érosion sur les *tanety* est une priorité absolue pour pouvoir à la fois, améliorer leur fertilité et protéger les infrastructures rizicoles, à l'aval.

Les sols des Hautes Terres de Madagascar, en dehors de ceux des bas fonds, sont principalement des sols ferrallitiques (ou Ferralsols). Ces sols sont caractérisés :

[Problématique, objectifs, hypothèses et indicateurs]

- par de faibles teneurs en P biodisponible, c'est-à-dire en ions phosphates qui peuvent être prélevés par la plante (Morel *et al.*, 2006), associée à une forte capacité de fixation de ces ions par les oxyhydroxydes de Fe et d'Al cristallisés et amorphes (Frossard *et al.*, 2006);
- par un niveau d'acidité du sol parfois élevé (pH entre 4 à 6), avec des teneurs en aluminium échangeable à la limite du seuil de toxicité pour la plante ($1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de sol pour le maïs) (Rabeharisoa, 2004) ;
- par une faible teneur en C organique sous sols cultivés (1 à 2%) (Rabeharisoa, 2007).

Sur ces sols, le rendement en riz pluvial est faible, de l'ordre de $0,8$ à 1 t ha^{-1} en général (Rabeharisoa, 2007). Le phosphore est un des principaux facteurs limitant de la production (Pichot *et al.*, 1972). Dans ces sols, le phosphore est associé aux minéraux argileux, comme la kaolinite, et surtout les oxydes et hydroxydes de fer (goethite, hématite) et d'aluminium (gibbsite). La minéralogie contrôle pour une large part les différentes formes du phosphore présentes dans le sol :

- le P inorganique de la solution du sol, disponible immédiatement pour la plante (Morel *et al.*, 2000), se trouve à de très faibles concentrations, de l'ordre de $0,003 \text{ mg P L}^{-1}$ dans certain Ferralsols sous culture (Andriamaniraka, 2009), alors que sa concentration varie entre $0,1$ à 2 mg P L^{-1} dans la plupart des sols ;
- le P labile dans la phase solide du sol, c'est-à-dire la fraction du P du sol disponible à court terme pour les microorganismes ou la végétation (Cross et Schlesinger, 1995), a pour origine les ions P dissous et les groupements associés à la phase solide du sol susceptibles de passer en solution, qui correspond essentiellement aux phosphates adsorbés à la surface des argiles, des hydroxydes, des carbonates, et même en partie des apatites et des phosphates de Fe et d'Al ;
- Le P dans la fraction non-labile de la phase solide du sol, très peu disponible même à long terme, qui est contenu dans les minéraux, des précipités à la surface des minéraux et des composés organiques stables.

La plupart des études concernant la nutrition phosphatée du riz ont considéré seulement le phosphore inorganique (Pi), parce que ceci est la forme prélevée par les racines. Cependant, le phosphore organique (Po), associé aux matières organiques des sols, est aussi une source potentielle de phosphore labile, après sa minéralisation (Turner, 2006).

Les systèmes SCV ont été développés dans le cadre de la conservation du système agricole. Ils ont des effets bénéfiques sur l'érosion, la capacité de rétention en eau des horizons de surface, la stimulation des activités biologiques, l'amélioration de la porosité du sol et l'infiltration de

[Problématique, objectifs, hypothèses et indicateurs]

l'eau (Fisher *et al.*, 2002 ; Scopel *et al.*, 2005; Bertol *et al.*, 2007; Blanchart, *et al.*, 2007 ; Singh, 2007 ; Saha *et al.*, 2010). Surtout, ils favorisent, d'une part, l'accumulation de grandes quantités de matières organiques à la surface (mulch) et dans le sol. Le SCV minéralise lentement une grande quantité de biomasse et produit beaucoup plus de l'humus (Corbeels *et al.*, 2006) et, d'autre part, il favorise le recyclage des éléments nutritifs ou « pompes biologiques » et la mobilisation du phosphore par le biais des plantes de couverture (Seguy *et al.*, 2009).

Du fait de la nature de ces sols, qui adsorbent fortement le P, ainsi que de la faible disponibilité et des coûts élevés des engrais phosphatés, il est indispensable d'améliorer l'efficacité de l'utilisation du P par les cultures pour assurer la durabilité et la conservation du fonctionnement des agrosystèmes. Ceci nécessite une compréhension préalable des mécanismes impliqués dans la disponibilité des éléments minéraux, leur mobilité et leur accessibilité dans le sol. Depuis longtemps et jusqu'à maintenant, la détermination des différentes formes du phosphore et sa disponibilité dans les sols des régions intertropicales est un des problèmes les plus irritants qui préoccupent les chercheurs.

A cet effet, des essais agronomiques suivi par l'Unité de recherche en partenariat "Systèmes de Culture et Rizicultures Durables" (SCRiD), associant le FOFIFA, l'Université d'Antananarivo et le CIRAD, ont été mise en place à Andranomanelatra pour tester les systèmes SCV et, entre autre, essayer de trouver une réponse favorable à la disponibilité du P dans le sol. Un dispositif expérimental centré sur des systèmes contrastés à base de riz pluvial, permettant d'analyser les différents facteurs des systèmes cultureux (SCV-labour, intrant et restitution des matières organiques à base des graminées et légumineuses) et d'expliquer leur fonctionnement et leur évolution sur la teneur en P disponible après T1, T5 et T9.

Les analyses de sol réalisées sur des échantillons provenant des diverses modalités testées doivent nous permettre de caractériser la disponibilité et les formes du phosphore :

- en fonction des systèmes de culture : labour et système sous couverture végétale (SCV) ;
- en fonction des intrants : apport de fumure organique ou apport de fumure mixte, organique et minérale ;
- en fonction de restitution des débris organiques à base de graminées ou de légumineuses.

Dans ces conditions, la question suivante mérite une discussion : dans le domaine de l'agriculture de conservation, comment évoluent la disponibilité et les formes du P du sol à long terme ?

1.2 Objectifs

L'objectif de la présente étude est de déterminer les teneurs de P disponible ($Pi_{\text{hydrosoluble}}$, $Pi_{\text{résine}}$) et les fractions organiques (Po) et inorganiques (Pi) de P labile (P_{Olsen}), ainsi que les teneurs totales de P, dans des systèmes de culture (labour vs semis direct sous couverture végétale, fumure organique vs fertilisation mixte) sur le sol de *tanety* de T1 à T9 sur une profondeur de 0-5 cm, pour une amélioration du système de culture vers une agriculture durable.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Caractériser les différentes formes et les quantités du phosphore ($Pi_{\text{hydrosoluble}}$, $Pi_{\text{résine}}$, Pi_{Olsen} , Po_{Olsen} et P total) en fonction des systèmes de culture (type de travail du sol ; apports de fumure organiques et minérales ; restitutions organiques à base de graminées et légumineuses) aux temps T1, T5 et T9 pour une profondeur de 0-5 cm;
- Déterminer si les apports constituent un facteur déterminant de la disponibilité du P du sol en fonction des apports exogènes (fumiers...) ou des résidus de culture et des systèmes culturaux aux temps T1, T5 et T9 pour une profondeur de 0-5 cm;
 - Comparer les concentrations de P de différents modes d'usage du sol et de fertilisation suivant l'effet diachronique aux temps T1 à T9 pour une profondeur de 0-5 cm.

1.3 Hypothèses

Les hypothèses relatives se basent sur la disponibilité du phosphore dans le sol en fonction du travail du sol, des intrants et restitution des graminées et légumineuses. Elles sont de trois ordres :

➤ ***H1 : les systèmes culturaux (SCV-labour, apports de fumure organique et minérale, restitution organique à base de graminées et légumineuse) influent sur les formes et les quantités du P disponible ou labile dans le sol***

Pour le système cultivé, le phosphore apporté au sol subit de multiples transformations et passe entre les différents compartiments minéraux, organiques et microbiens. Seule une petite fraction du phosphore présent dans le sol est susceptible d'être absorbée par les racines et participer à la nutrition des cultures. Cette fraction, souvent appelée phosphore biodisponible ou assimilable, est d'une importance capitale puisqu'elle conditionne la fertilité des sols (Morel, 2002).

Dans la plupart des systèmes agricoles, l'application de P dans les sols est nécessaire pour assurer la productivité des plantes, mais la part de P ajouté, qui est prélevée par les plantes, est

[Problématique, objectifs, hypothèses et indicateurs]

faible. Dans les sols acides à fort pouvoir de fixation de P, plus de 80% de P apporté est immobilisé dans la fraction non labile et n'est plus disponible dans l'année qui suit l'apport de l'engrais. Ces formes de P ne peuvent pas être prélevées par les plantes à cause des processus d'adsorption, de précipitation ou bien de conversion sous forme organique.

Toutefois, il a été montré que l'augmentation des teneurs en matière organique des sols induisait généralement une amélioration de la disponibilité du P pour les plantes, du fait d'une diminution de la sorption du P sur les phases minérales réactives (Haynes et Mokolobate, 2001; Guppy *et al.*, 2005) ou, plus directement, au travers de la minéralisation de P organique labile (Turner, 2006 ; Achat *et al.*, 2010).

➤ ***H2 : les matières organiques, issues d'apports exogènes (fumiers...) ou des résidus de culture ont des effets bénéfiques sur la disponibilité du phosphore, en particulier en augmentant les quantités de phosphore organique labile des sols***

Pour le système cultivé, le phosphore apporté au sol subit de multiples transformations et passe entre les différents compartiments minéral, organique et microbien. La fraction organique du phosphore varie largement suivant les types de sol et les pratiques agricoles puisqu'elle est habituellement comprise entre 20 et 80 % du phosphore total. Puisque le phosphore des résidus organiques est libéré par l'activité biologique du sol sous la forme d'ions phosphoriques (HPO_4^{2-} ou H_2PO_4^-), il peut être disponible plus longtemps pour la culture, selon les conditions qui favorisent la minéralisation.

Pour les diverses matières organiques (MO), la minéralisation et la libération du phosphore organique (Po) qu'ils contiennent n'est pas aussi rapide en comparant avec le P minéral des engrais ou P inorganique (Pi). Le phosphore organique est l'objet d'une lente minéralisation qui le rend progressivement disponible dans le sol (Andriamaniraka, 2009). Les processus microbiens c'est-à-dire que le critère biologique représentatif des processus microbiens peut être décrit par le rapport des formes organiques C/P, de façon analogue au rapport C/N, (Parent et Khiari, 2003). Si le rapport C/N est supérieur à 23, l'azote est immobilisé dans la fumure (Mafongoya *et al.*, 2006). Jusqu'à un rapport C/P critique, qui varie entre 501 à 112, la biomasse microbienne immobilise le P (Enwezor, 1976). De ce fait la minéralisation et l'immobilisation dépend de la qualité de la MO apportée au sol : chimique, physique et biologique. Par exemple, le fumier essentiellement constitué à partir de paille de riz, est pauvre en P et assez peu minéralisable du fait de sa pauvreté en N et P. A l'inverse, les légumineuses avec un C/N plus faible sont susceptible de se minéraliser plus rapidement, 82 à 86% des pailles sont décomposés dans un peu de temps (Yadvinder-Singh *et al.*, 2005)

➤ **H3 : les travaux du sol (SCV – labour) ont un impact sur la disponibilité du P**

Le système de culture semis direct avec couverture végétale a un effet positif sur la quantité des ions phosphates dans la solution du sol par rapport à celui de labour. Il a été montré récemment que le SCV limitait à la fois la sorption du P inorganique et du P organique sur les constituants du sol (Pavinato *et al.*, 2010), ce qui favorise à la fois l'augmentation de la disponibilité du P_i pour les plantes et la minéralisation du P_o par les microorganismes du sol. Donc, l'augmentation des teneurs en ions phosphates dans la solution du sol pourrait être obtenue par l'accroissement des teneurs en matière organique dans les systèmes de culture à couverture végétale (Andriamaniraka, 2009). En outre, le SCV limite les pertes de terre et des éléments minéraux associés par érosion, du fait de la protection de la surface du sol par la couverture végétale. En effet, l'étude faite par Rasoloniaina (2005) sur les hautes terres malgaches, dans les dispositifs de l'ONG TAFA à 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 le système SCV ($7,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$). Compte tenu de la teneur en P total de ce type de sol, en moyenne 500 mg P kg^{-1} (Rabeharisoa, 2004), le flux annuel de P errodé est de $17,5 \text{ kg P ha}^{-1}$ pour le système labour et de $3,8 \text{ kg P ha}^{-1}$ pour le SCV.

1.4 Indicateurs

Les indicateurs de vérifications des hypothèses sont :

- H1 est vérifiée par la comparaison des teneurs de $P_{i \text{ hydrosoluble}}$, $P_{i \text{ résine}}$, $P_{i \text{ Olsen}}$, $P_{o \text{ Olsen}}$ et P total en mg kg^{-1} , dans le sol suivant les systèmes culturaux (travail du sol, intrants et restitutions organiques à base de graminées et des légumineuses) aux temps T1, T5 et T9, pour une profondeur de 0-5cm du sol ;
- H2 est vérifiée par la comparaison des teneurs de $P_{i \text{ hydrosoluble}}$, $P_{i \text{ résine}}$, $P_{i \text{ Olsen}}$, $P_{o \text{ Olsen}}$ et P total à T1, T5 et T9 (mg kg^{-1}), pour une profondeur de 0-5cm du sol. En particulier une augmentation des teneurs en $P_{i \text{ hydrosoluble}}$ et $P_{o \text{ Olsen}}$ organique est espérée suite aux apports organiques ;
- H3 est vérifiée par la comparaison des teneurs de $P_{i \text{ hydrosoluble}}$, $P_{i \text{ résine}}$, $P_{i \text{ Olsen}}$, $P_{o \text{ Olsen}}$ et P total stocké dans le sol à T1, T5 et T9 (mg kg^{-1}), pour une profondeur de 0-5 cm du sol. En particulier, il est attendu un enrichissement pour les diverses formes du P dans l'horizon de surface sous SCV, du fait de l'accumulation de MO en surface et de la non incorporation des intrants (minéraux et organiques) par le labour.

DEUXIEME PARTIE : ETAT DE CONNAISSANCES

2.1 Sols ferrallitiques

2.1. 1 Répartition géographique

Les sols ferrallitiques typiques et les sols ferrallitiques lessivés, appelés respectivement Oxisols et Ultisols dans la classification américaine (Soil Survey Staff, 1998) et Ferralsol dans la classification de la FAO (IUSS-WRB, 2006), représentent plus de 15 % de la surface de la terre, 7,5 % pour les premiers et 8,5 % pour les seconds (Buol et Eswaran, 2002). Ils sont dominants dans toute la zone intertropicale (Figure 2-1).

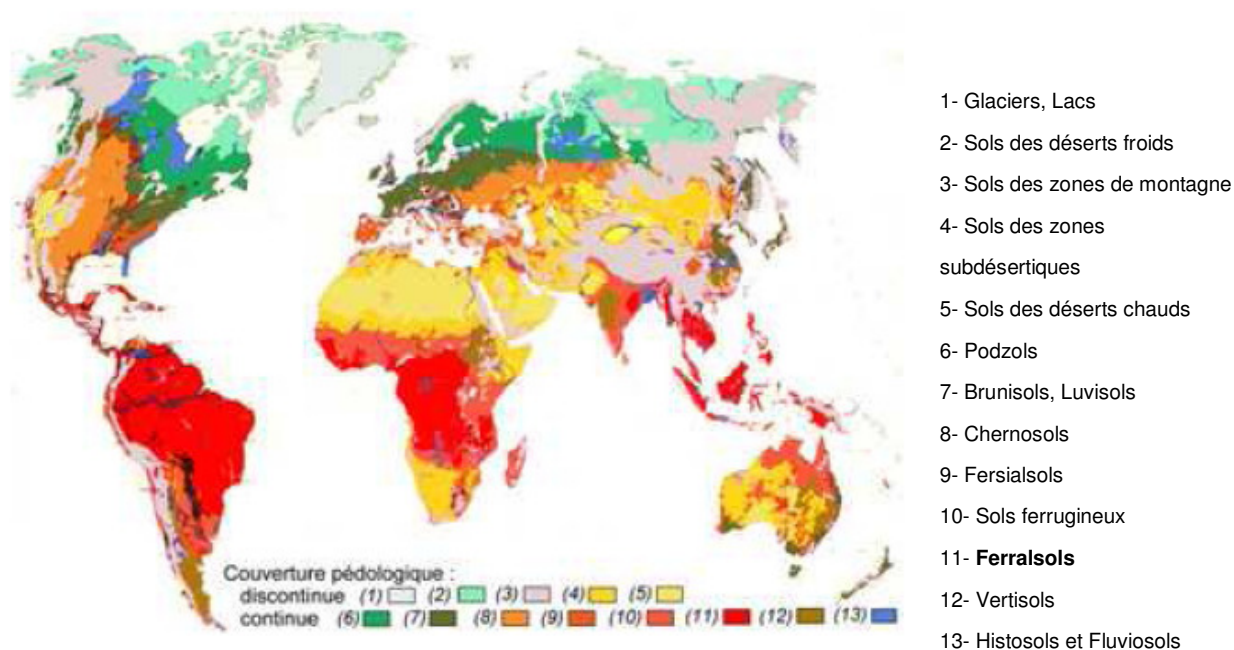


Figure 2-1: Différents types de sols dans le monde

(Source : Legros, 2007)

La définition générale des sols ferrallitiques a été précisée par Aubert (1965) et Aubert et Segalen (1966). Les sols ferrallitiques de Madagascar entrent dans le cadre de cette définition. Ce sont des sols profonds, caractérisés par une altération très poussée des minéraux primaires. Les minéraux argileux sont constitués essentiellement par de la kaolinite ; l'illite, lorsqu'elle est présente, ne s'observe que dans les sols rajeunis. Ils ont une forte teneur en sesquioxydes de fer

(goethite, hématite) et d'aluminium (gibbsite). Ces sols peuvent se former directement à partir de la roche-mère, mais, le plus souvent, ils se constituent à partir d'un manteau d'altération ancien, profond et lixivié (Bourgeat, 1970).

Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Ki) est inférieur ou égal à 2. La couleur généralement vive des horizons supérieurs est liée à la présence de fortes quantités de sesquioxydes de fer individualisés. Dans les sols et horizons jaunes, le fer existe presque exclusivement sous forme de goethite. Dans les sols et horizons rouges il existe, en partie, sous forme de goethite, mais, dans ce cas, on note une proportion variable, mais toujours importante, d'hématite (Segalen, 1969).

2.1.2 Sols ferrallitiques à Madagascar

La figure 2-2 montre que près de 75% de la superficie totale de Madagascar est occupée par les sols ferrallitiques et les sols ferrugineux. Les sols ferrallitiques évoluent essentiellement sur les Hautes Terres et sur la partie orientale. Ils existent essentiellement sur socle cristallin et sur épanchements volcaniques. Deux types de sols ferrallitiques se distinguent, les sols du type ferrallitique brun jaune développé sur les surfaces d'aplanissement généralement plus riche en goethite (région humide des Hautes Terres et de l'Est) et ceux du type ferrallitique brun rouge formé à partir des glaciaires d'érosion quaternaire, qui correspondent à une évolution très poussée et récente du relief, sur la bordure occidentale des Hautes Terres (Moyen-Ouest). Ces derniers sont issus des formations quaternaires ayant une zone d'altération moins profonde et plus riches en minéraux primaires généralement riches en hématite et en composés de fer amorphes non cristallisés (République de Madagascar, 2005). Les sols ferrugineux longent plutôt la côte Ouest et Sud-ouest de l'île. Les sols hydromorphes, souvent aménagés en rizières de bas fond, sont très éparpillés et ne représentent que 2,6% de la superficie.

Du fait de l'importance de leur superficie, et de caractéristiques physiques favorables, les sols ferrallitiques et ferrugineux sont très exploités pour l'agriculture à Madagascar. Sur les zones de *tanety* des Hautes Terres, outre des formations arbustives (savanes souvent fortement dégradées par le pâturage et l'exploitation du bois), les sols ferrallitiques sont surtout dédiés à des cultures vivrières comme le maïs, le manioc, la patate douce, le riz pluvial,...

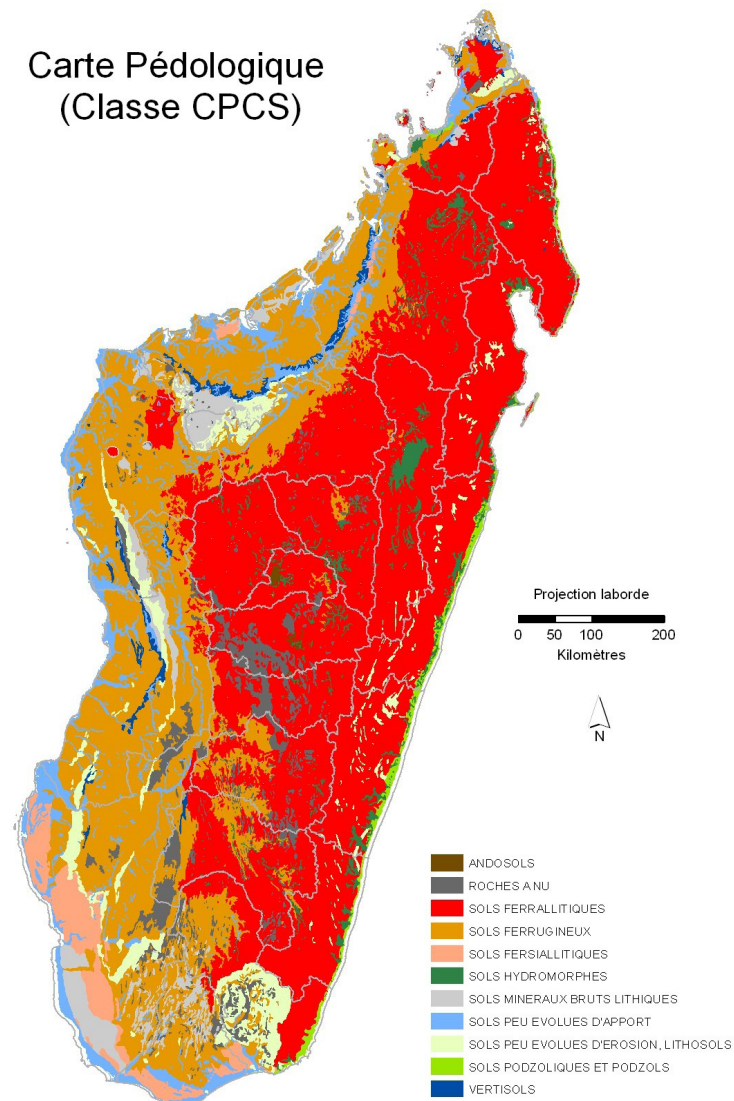


Figure 2-2: Carte Pédologique de Madagascar-Classification (CPCS)
(Source : Delenne et Peletier, 1981)

2.2 Phosphore, un élément essentiel à la vie

2.2.1 Généralités

Le phosphore est présent chez tous les organismes vivants. Chez les végétaux, il constitue un composant majeur et un élément minéral essentiel. Il joue un rôle important dans le métabolisme énergétique, ainsi que dans la synthèse et le métabolisme des glucides. Il participe à la composition du noyau cellulaire et se concentre dans les organes reproducteurs du végétal.

Le phosphore est absorbé par les plantes depuis la solution du sol, sous forme sous forme d'ions phosphates solubles : de dihydrogénophosphate (H_2PO_4^-) et accessoirement sous forme

d'hydrogénophosphate (HPO_4^{2-}) et orthophosphate (PO_4^{3-}), ces deux formes dépendant du pH de la solution. D'autres formes comme les pyrophosphates, les métaphosphates et certains phosphates organiques solubles peuvent être absorbés, mais leur minéralisation dans les milieux naturels les confine à un rôle secondaire (Tisdale et Nelson, 1975). Les caractéristiques des sols, qui contrôlent la teneur en phosphate de la solution du sol, vont donc jouer un rôle majeur dans le contrôle de la disponibilité du P et dans la capacité des plantes de le prélever.

Dans les milieux dotés de conditions extrêmes de pH, très acides ou très calcaires, les phosphates évoluent vers des formes cristallisées insolubles et, par conséquent, sont soustraits au cycle biologique ; ce processus est nommé rétrogradation. En milieu calcaire, la rétrogradation du P, se produit par formation de phosphates tricalciques, associés au calcaire actif. Ces composés sont particulièrement insolubles. Ces processus sont majeurs dans de nombreux sols calcaires des zones tempérées et méditerranéennes. Toutefois, ils sont secondaires dans les sols ferrallitiques et, par conséquent, nous ne détaillerons pas ces processus dans ce travail.

2.2.2 Contrôle de la disponibilité du phosphore dans les « Ferralsols »

Dans les sols ferrallitiques, la dynamique du phosphore est largement déterminée par la minéralogie (contenu d'argiles et d'oxy-hydroxydes), les teneurs en matière organique et le pH. (Fardeau et Conesa, 1994).

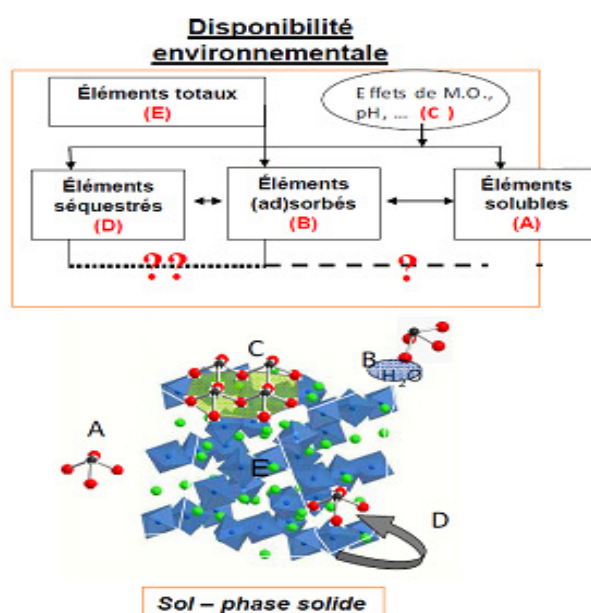


Figure 2-3: Compartimentation du phosphore et notion de disponibilité (A : adsorbé, B : soluble, C : séquestré, E : éléments totaux)

(Source : Becquer, 2005 ; Raous, 2011).

2.2.2.1 Minéralogie

Les constituants minéraux des Ferralsols sont principalement représentés par deux phases : la phase cristallisée et la phase amorphe. La phase cristallisée est constituée par les argiles (kaolinite), les oxydes de fer bien cristallisés (goethite FeOOH ; hématite Fe_2O_3), les oxydes d'aluminium (gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$), et le quartz (SiO_2) tandis que la phase amorphe est composée essentiellement d'oxyhydroxydes de fer et d'Al et des gels colloïdaux (Dabin, 1971; Sanchez *et al.*, 1997). Dans les sols acides, l'adsorption du phosphore est généralement attribuée aux oxyhydroxydes de fer et d'aluminium, ainsi qu'aux argiles de type 1:1 (Sanyal *et al.*, 1981; Fontes et Weed, 1996). En considérant cette capacité, une classification peut être effectuée. Ainsi, on trouve en ordre décroissant les oxy-hydroxydes amorphes, la goethite, la gibbsite, la kaolinite et finalement la montmorillonite.

a. Kaolinite

La fraction dominante pour l'argile est la kaolinite (Giller et Wilson, 1991). Les sols ferrallitiques contiennent principalement la kaolinite ($\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$), phyllosilicate à structure 1:1 constituée de feuillets de deux couches : l'une de tétraèdre et l'autre d'octaèdre, une CEC comprise entre 5 et $10 \text{ cmol}^+.\text{kg}^{-1}$ de sol (Rabeharisoa, 2004) et une surface spécifique supérieure à $15 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (Fallavier, 1996). Ainsi, les feuillets de kaolinite chargés négativement peuvent complexer aussi bien les oxydes que les hydroxydes de fer qui sont chargés positivement. D'après Fripiat et Gastuche (1952) (cités par Chatelin, 1974), 12 à 15 % de Fe_2O_3 sont nécessaires pour obtenir la saturation des surfaces de la kaolinite. Par ailleurs d'autres types d'argile, notamment les halloysites, peuvent être présents dans des sols ferrallitiques (Ségalen, 1995 ; Legros, 2007), principalement dans les sols ferrallitiques à caractère andique. D'autres auteurs ont montré que les anions orthophosphates pouvaient s'adsorber sur d'autres minéraux argileux que la kaolinite (Soon, 1991). Toutefois, les teneurs d'autres argiles, telles que le mica ou la montmorillonite, sont souvent négligeables dans les Ferralsols.

b. Oxydes

La fraction granulométrique des argiles peut être majoritairement constituée de sesquioxydes dans certains sols tropicaux (Gallez *et al.*, 1976). Le rôle crucial des sesquioxydes dans la rétention des anions orthophosphate a été mise en évidence assez précocement (Sree Ramulu *et al.*, 1967; Larsen, 1967). Dans les sols tropicaux, la fixation du phosphore est principalement due aux quantités importantes de sesquioxydes de fer et d'aluminium (Uehara et Gillman, 1981).

Des sesquioxydes de fer en quantités variables adsorbent les anions orthophosphate dans des proportions identiques, dans le cas où l'adsorption est ramenée à l'unité de surface adsorbante

(Huang et Violante, 1986 ; McLaughlin *et al.*, 1981 ; Borggaard, 1983). Par ailleurs, les composés amorphes adsorbent plus les anions orthophosphate que les formes cristallisées (Fontes et Weed, 1996). Gorbunov *et al.* (1961) ont montré par ailleurs qu'un hydroxyde de fer amorphe adsorbait 108 fois plus d'anions orthophosphate qu'une goethite bien cristallisée. Rajan et Perrott (1975) ont montré aussi que l'augmentation de la cristallisation des gels d'aluminium aboutit à une plus faible rétention du phosphore. Selon Vo Dinh Quang *et al.* (1996), l'adsorption sur les oxydes de fer bien cristallisés peut même apparaître négligeable face à l'adsorption sur les constituants du fer non ou mal cristallisés. Cette différence a été attribuée à la faible surface spécifique des oxydes de fer (Willet *et al.*, 1978).

2.2.2.2 Composés organiques

La compréhension du rôle de la matière organique dans l'augmentation de la bio-disponibilité du P dans les sols agricoles est importante pour le développement de nouvelles pratiques agronomiques permettant d'augmenter l'efficacité des engrais phosphatés tout en réduisant les risques environnementaux.

La matière organique influence positivement l'assimilation du phosphore par la plante (Dalton et Russell, 1952 ; Hue, 1991). Une fraction importante des résidus organiques est minéralisée par l'activité biologique et libère les éléments solubles, notamment des ligands organiques, tandis qu'une partie est transformée en produits humiques. Les ligands organiques produits ou certaines molécules de l'humus et la lignine ont la capacité de se combiner avec l'Al et le Fe et affectent les réactions d'adsorption, de précipitation et de solubilisation du phosphore dans le sol. Iyamuremye et Dick (1996) rapportent qu'en plus de favoriser la compétition des acides organiques pour les mêmes sites de fixation que le P, la matière organique entraîne aussi l'augmentation des charges négatives dans le sol. Par conséquent, ce phénomène réduit l'attraction électrostatique de cet élément et permet de le maintenir en solution (Rabetokotany, 2007). Plusieurs études ont démontré que l'utilisation d'engrais de ferme seuls ou combinés à des engrais minéraux permet d'en augmenter la bio-disponibilité pour la plante tout en produisant une augmentation des rendements (Sharif *et al.*, 1974 ; Giardini et Pimpini, 1992). Par exemple, Moshi *et al.* (1974), ont démontré que la quantité de fertilisants phosphatés requis dans un Oxisol du Kenya pour atteindre 0,2 mg P L⁻¹ dans la solution du sol passait de 90 à 22 kg P ha⁻¹ lorsque la concentration de carbone organique dans le sol augmentait de 3,8% (profil cultivé) à 6,8% (profil forestier). Il apparaît donc que les amendements organiques ont un impact sur les formes du P dans le sol. La plus grande disponibilité de cet élément, d'une part, liée à la présence de matière organique pourrait faire diminuer les quantités d'engrais minéraux phosphatés utilisées en agriculture.

2.2.2.3 Effet du pH

La composition de la solution affecte surtout la charge variable du sol. En général, dans les sols qui contiennent des constituants non cristallisés, comme la matière organique, une petite fraction des oxydes et hydroxydes de Fe et d'Al entretiennent une grande charge de surface nette. La nature et la concentration des cations et des anions dans la solution du sol affectent la charge variable par le biais de l'adsorption spécifique et le mécanisme d'équilibre de charge électrostatique (Rabeharisoa, 2004). A pH < 5,5, le phosphore est fixé par le Fe du sol, entre pH 5,5 et 6, le phosphore tend à être fixé par l'Al. Par contre au dessus de pH 7, le phosphore ajouté au sol réagit avec le calcium pour former des composés insolubles (Figure 2-4). En effet, l'augmentation du pH augmente la charge nette positive, résultant de l'augmentation de l'adsorption d'anions à pH élevé et des cations à bas pH.

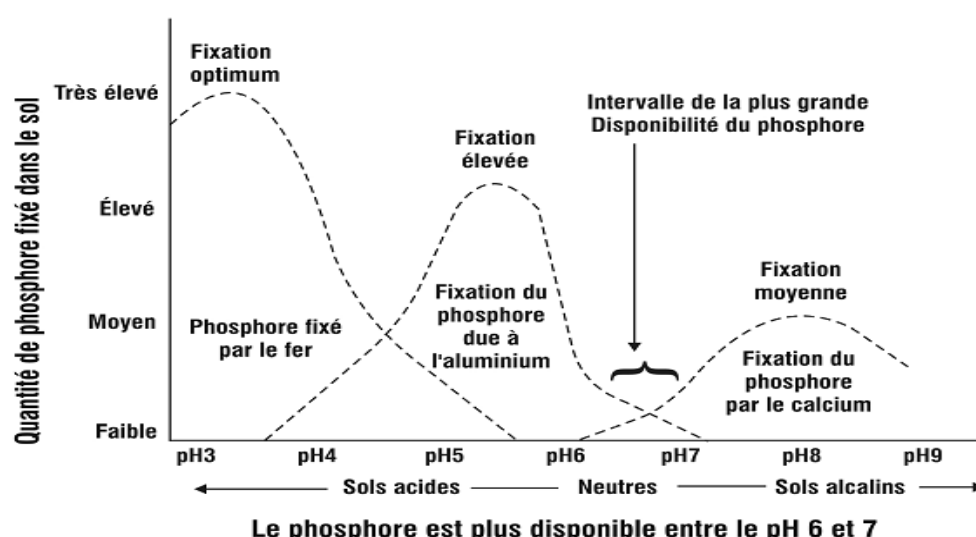


Figure 2-4 : Fixation et disponibilité du phosphore suivant le pH

(Source : <http://www.ccse-swcc.nb.ca/CA-6FR>)

Lorsqu'on ajoute de la dolomie au sol, elle peut diminuer considérablement l'adsorption des anions orthophosphates par les sols tropicaux (Lopez-Hernandez et Burnham, 1974). L'effet d'un apport de carbonate de calcium sur l'adsorption d'anions orthophosphates est double : d'une part, l'augmentation de pH augmente la répulsion entre les anions orthophosphates et les particules de sol deviennent plus électronégatives ; d'autre part, le chaulage stimule la décomposition de la matière organique et donc la libération d'anions organiques, susceptibles de rentrer en compétition avec les anions orthophosphates pour les sites d'adsorption (Martini *et al.*, 1974).

2.3 Formes du phosphore dans le sol

Le phosphore élémentaire est très réactif chimiquement et il ne se retrouve pas à l'état pur dans la nature. Il est toujours en combinaison avec d'autres éléments. La plupart de ces composés ne sont pas disponibles pour les plantes puisqu'ils sont insolubles.

2.3.1 Phosphore minéral ou phosphore inorganique (Pi)

Le phosphore existe dans les sols sous diverses formes minérales, souvent peu solubles, incluant les phosphores dans la solution et la phase solide du sol (Hinsinger, 2001 ; Hinsinger *et al.*, 2007). Les plantes absorbent le P sous forme d'ions « phosphates » ou phosphore dissous, que leurs racines acheminent vers le cytoplasme à travers la membrane cellulaire (Achat, 2009). Lorsque les engrais minéraux phosphatés, tel que le superphosphate triple (TSP), sont ajoutés au sol, ils se dissolvent rapidement et réagissent avec le calcium (sols à pH > 5,3) et les hydroxydes de fer et d'aluminium (sols à pH < 5,3) et sont adsorbés ou précipités pour former des composés peu solubles. En fait, l'importance de l'adsorption ou de rétrogradation varie selon le pH et les teneurs en aluminium (Al), fer (Fe) et calcium (Ca) des sols. L'ensemble de ces mécanismes expliquent que les concentrations de P sont généralement très faibles dans les Ferralsols.

2.3.2 P organique (Po)

Le phosphore est également présent dans le sol sous forme organique. Il peut être subdivisé en deux formes majeures : le Po labile, qui représente les matières organiques végétales ou animales ou microbiennes du sol ; le Po organique stable, qui est moins réactif et plus résistant à la minéralisation (Andriamananjara, 2011).

La teneur en Po varie très largement suivant la nature des sols, leur usage (grande culture, prairie, forêt...) et les systèmes de culture (Tiessen *et al.*, 1994). Ainsi, la teneur des sols en Po varie entre 20 et 80 % (Harrison, 1982). La synthèse de données publiées sur la teneur en Po montre que dans les régions de climats tempérées (Morel, 2002) :

- pour les sols cultivés de longue date sous grande culture, elle est stable sur une échelle pluriannuelle de temps et représente en moyenne 20% du P total;
- dans les sols sous prairie, le Po représente une proportion beaucoup plus importante du P total du sol, de l'ordre de 60%, due à la fois à une teneur en P total plus faible et aussi à une teneur en Po plus élevée.

Les données permettant de quantifier le Po dans les sols tropicaux sont peu nombreuses. Une étude menée au Brésil par Chapuis-Lardy *et al.* (2001) montre que les teneurs en Po varient

entre 63 et 194,7 mg P kg⁻¹. Pour le cas d'un sol ferrallitique sur socle cristallin de Madagascar, Andriamahady (1980) donne des teneurs de Po correspondant, en général, à 31-36% du P total. Pour les régions d'Ambaiboho, Anjomakely, Anosiboribory, Beforona et Imerimandroso, la proportion de Po est de 14 à 28% du P total, selon Turner (2006).

Dans un sol fortement désaturé, la disponibilité du P dans le sol est limitée par la sorption ou fixation des ions phosphates au niveau de sesquioxides (Pushparajah, 1998), et par les composés phosphatés organiques qui sont sujets à une rétention au niveau des constituants des sols (Turner, 2006), ce qui limite leur minéralisation par les microorganismes du sol et une réduction du P par l'adsorption du P au niveau de surface fixateur des minéraux. Néanmoins, leur minéralisation progressive est une source de Pi pour les plantes. En effet, la minéralisation du carbone organique augmente les activités microbiennes, tout en incorporant du P, résultant à une diminution de la teneur en P organique et une diminution du P inorganique adsorbé dans le sol (Perrott *et al.*, 1990; Afif *et al.*, 1995 ; Chen *et al.*, 2000).

Une addition de la matière organique au sol améliore la structure et la porosité du sol, mais aussi réduit la sorption au niveau de la surface des minéraux (Appelt *et al.*, 1975 ; Heng, 1989; Agbenin et Tiessen, 1995 ; Linnquist *et al.*, 1997 ; Wang *et al.*, 2001), et accroît la teneur en P inorganique dans la solution du sol (Guppy *et al.*, 2005). L'interaction de la matière organique avec le P dans le sol influe potentiellement sur les réactions de sorption de différentes manières (Saunders, 1965). D'une part, un effet direct de compétition entre les produits organiques (substances humiques, acides organiques) et le P pour les sites de fixation (Sibanda et Young, 1986) peut conduire à la formation de complexes avec les métaux (Fe et Al des oxydes du sol) et ainsi augmente le P dans la solution du sol (Lopez-Hernandez *et al.*, 1979; Traina *et al.*, 1987 ; Fox et Comerford, 1990, 1992 ; Bolan *et al.*, 1994). D'autre part, un effet indirect, du fait de la modification des propriétés de surface des sols, peut contribuer à la modification de la sorption du P (Appelt *et al.*, 1975; Heng, 1989 ; Agbenin et Tiessen, 1995 ; Linnquist *et al.*, 1997 ; Wang *et al.*, 2001).

Par contre, l'introduction de la matière organique du sol peut à la fois augmenter et diminuer le pH du sol. La diminution de la disponibilité du P dans le sol peut donc être affectée par une variation du pH du sol (Sumner et Farina, 1986; Mokolobate et Haynes, 2001).

En effet les facteurs contrôlant l'immobilisation de Pi en Po et la minéralisation de Po en Pi dans le sol sont au niveau de l'horizon : la végétation, la biomasse microbienne, la faune du sol et les propriétés du sol, et à un niveau plus général : le type de sol, le climat et le type d'utilisation du sol (OFEFP, 2004).

2.4 Fonctionnement des écosystèmes cultivés

2.4.1 Fertilité des systèmes conventionnels

Dans les systèmes conventionnels, la baisse progressive de la capacité de stockage des éléments nutritifs dans le sol (en particulier du fait de la baisse du taux de matière organique qui influence fortement la capacité d'échange cationique du sol) fait qu'une partie considérable des éléments nutritifs doit être apportée aux cultures, parfois même sans passer par le sol comme dans le cas des engrais foliaires. Les pertes par ruissellement superficiel et lixiviation sont fortes du fait de la grande solubilité de certains engrais, de la rapide minéralisation de la matière organique et du faible enracinement des plantes, tout comme celles liées à l'érosion (facilitée par le travail du sol) et celles par volatilisation sur un sol nu exposé à des températures élevées. La fertilité du système est peu stable et ses performances reposent largement sur des apports extérieurs (quand ils sont accessibles aux agriculteurs). Elles chutent rapidement après l'arrêt des apports d'engrais, d'autant plus que les autres composantes de la fertilité du système "sol" sont souvent défaillantes (en particulier du fait de la faible activité biologique, du faible taux de matière organique et de l'instabilité de la structure du sol), et que les pertes du système sont importantes (Seguy, *et al.*, 2009).

2.4.2 Fertilité des écosystèmes cultivés en SCV

Dans les écosystèmes cultivés en SCV, les éléments nutritifs sont, comme dans un écosystème forestier, concentrés majoritairement dans la biomasse (phytomasse, litière et microflore du sol) qui approvisionne les horizons superficiels du sol. Les plantes cultivées puisent la majeure partie des éléments nutritifs qui leur sont nécessaires dans la litière et les premiers centimètres du sol. La fertilité est globale au système sol/plantes et n'est pas limitée au sol. Grâce aux réserves (dans la phytomasse et la matière organique du sol) et aux faibles pertes, la fertilité des systèmes SCV est stable. Le maintien de cette fertilité est assuré par (Seguy, *et al.*, 2009) (Figure 2-5) : (i) un turn-over rapide de la matière organique et une activité biologique intense qui permettent d'optimiser les processus d'humification et de minéralisation. Grâce à ce turn-over rapide, la production annuelle de biomasse peut être importante, même sur des milieux pauvres ; (ii) un taux de matière organique élevé (entretenu par la forte production de biomasse) et en conséquence une capacité d'échange cationique (CEC) élevée, un pouvoir tampon et une capacité de rétention des éléments nutritifs importants ; (iii) la fixation d'azote atmosphérique, par des légumineuses, lorsqu'elles sont utilisées comme plante de couverture, mais aussi par des bactéries libres (type *Azotobacter sp.*, *Azospirillum sp.*, *Arthrobacter sp.*, etc.) et/ou des champignons du type trichodermes et actinomycètes, stimulés par les exsudats racinaires des plantes (comme l' *Eleusine coracana* ou les brachiarias pour *Azotobacter sp.*) ; (iv)

l'extraction des éléments fixés ou en très faible quantité dans le sol, par association des plantes avec des mycorhizes et/ou stimulation sélective (par les exsudats racinaires) de populations de champignons et/ou de bactéries libres du sol capables de remplir cette fonction de mobilisation des éléments nutritifs (champignons du genre *Trichoderma* et bactéries des genres *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Bacillus*, *Agrobacterium*, *Rhizobium*, *Burkholderia*, etc. pour le phosphore, bactéries du genre *Bacillus* pour le potassium et le manganèse, *Thiobacillus* pour le cuivre, etc.). Cette fonction est spécifique des "pompes biologiques", plantes utilisées en couverture qui ont des aptitudes variées à influencer le milieu, (v) le maintien de conditions redox et de pH favorables, qui stimulent les différentes populations de la microflore ; (vi) le maintien d'une structure favorable à l'enracinement des plantes en profondeur ce qui permet l'exploration d'un grand volume de sol et (vii) une minimalisation des pertes, que ce soit par érosion, par lessivage, par lixiviation et par volatilisation (Figure 2-5).

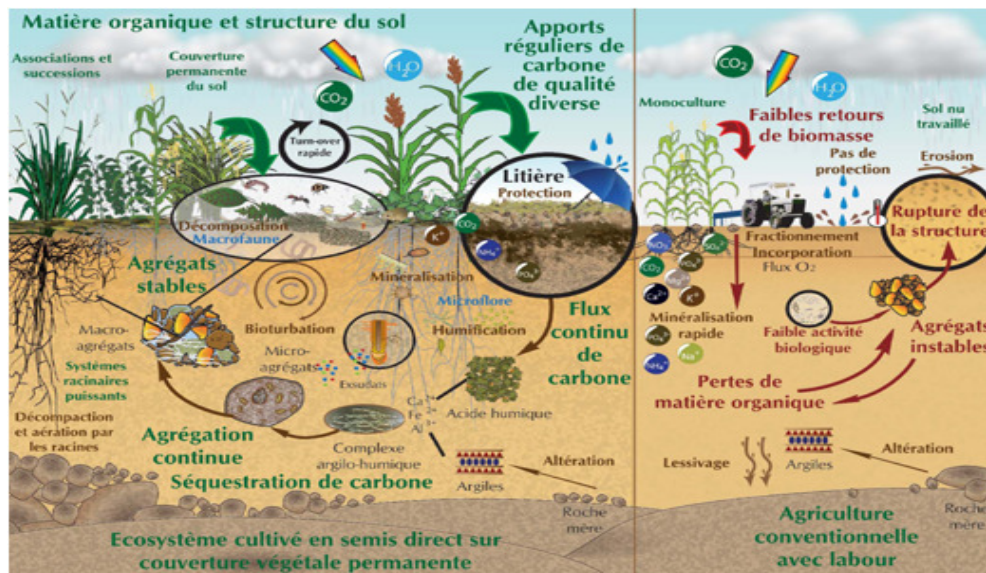


Figure 2-5: Comparaison de l'écosystème cultivé en SCV et de l'agriculture conventionnelle avec labour

(Source : Seguy, *et al.*, 2009)

Les meilleurs systèmes qui associent une très forte production de biomasse tout au long de l'année (et en particulier lors des pics de minéralisation), l'utilisation de plantes aux systèmes racinaires très profonds (en particulier en saison sèche) et l'apport de fertilisation minérale sur les plantes de couverture (au système racinaire profond) plutôt que sur la culture ont des niveaux de pertes très faibles, voire nulles (Oliviera *et al.*, 2011). Au delà d'une amélioration de la fertilité des sols, certains couverts végétaux (graminées du genre *Brachiaria* et légumineuses des genres *Cassia*) permettent de remplir (via leur forte production de biomasse même en

condition de forte acidité, qu'ils tolèrent très bien) une fonction de neutralisation de l'acidité (et par là de l'aluminium) même sur les sols ferrallitiques les plus désaturés (Seguy, *et al.*, 2009).

2.4.3 Utilisation des légumineuses dans les jachères ou en interculture dans les systèmes céréaliers

La spécialisation accrue des systèmes céréaliers au Nord et la pression démographique au Sud ont induit une généralisation des monocultures céréalières posant, à long terme, des problèmes agronomiques. L'utilisation des légumineuses en interculture ou sur la jachère répond aux objectifs généraux des plantes de couverture : rompre la monoculture, produire un fourrage directement pâturable par des petits ruminants, et chercher à valoriser la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique de la légumineuse pour en faire bénéficier la céréale suivante (Shipley *et al.*, 1992; Corre *et al.*, 1997) Cette approche s'est matérialisée à grande échelle avec le système du « ley farming », succession céréales-légumineuses annuelles pâturées qui s'est largement développé en Australie (Puckridge et French, 1983) mais qui n'a cependant pas trouvé sa place dans les systèmes de production du bassin méditerranéen (Nordblom *et al.*, 1994).

Face à la réduction de la fertilité du sol en N et à la faible disponibilité des engrais azotés qui constituent des facteurs importants du déclin de la production agricole chez les petits fermiers (Sanchez, *et al.*, 1997; Rabearisoa, 2004), les légumineuses peuvent être une source majeure d'N. Outre l'usage de légumineuses fourragères, largement utilisés comme plantes de couvertures dans les systèmes SCV, l'intégration de légumineuses à graines peut également être une réponse au souci de la conservation durable, tout en étant une ressource alimentaire importante pour les populations comme pour le bétail. De plus, l'utilisation de légumineuses a montré, en milieu paysan, une amélioration de la fertilité phosphatée du sol et, par la suite, de la productivité agricole (Obaid-ur-Rehman *et al.*, 2006, Andriamananjara, 2011). Cette plante a une aptitude à mobiliser le P du sol couplée avec l'utilisation des amendements organiques et minéraux, ayant un intérêt particulier dans la recherche de système de culture durable pour les sols déficient en P (Iyamuremye *et al.*, 1996 ; Vanlauwe, *et al.*, 2000 ; Horst *et al.*, 2001 ; Pypers *et al.*, 2005).

TROISIEME PARTIE: MATERIELS ET METHODES

3.1 Présentation du dispositif expérimental

L'étude a été menée dans la région de Vakinankaratra, plus précisément dans la commune d'Andranomanelatra, à une altitude de 1600 m, dans une expérimentation située à la latitude 19°47'S et la longitude 47°06'E (Figure 3-1).

Le climat de la région est du type subtropical avec deux saisons distinctes : une saison sèche et froide, de mai à septembre, et une saison humide, d'octobre à avril. La température moyenne annuelle est de 16°C avec des températures minimales pouvant atteindre des valeurs négatives pendant la saison sèche, et maximales de 31°C pendant la saison humide. La pluviosité annuelle moyenne est de 1400 mm (Michellon, *et al.*, 2004).



Figure 3-1: Localisation de la commune d'Andranomanelatra

(Source : Auteur)

(Le cadre en rouge c'est la zone du PCP-SCRid, le lieu de prélèvement des échantillons et le trait en noir est la RN7)

Selon les données de la station météorologique automatique « CIMEL » du PCP-SCRid, implantée au sein de la matrice Andranomanelatra de 2002 à 2011, la température moyenne annuelle est de 17,9°C avec des températures pouvant atteindre 12,8°C en juillet, et de 19,7°C en janvier. Et la moyenne du total annuelle de la pluviométrie sur 9 ans est de 1407 mm (figure 3-2).

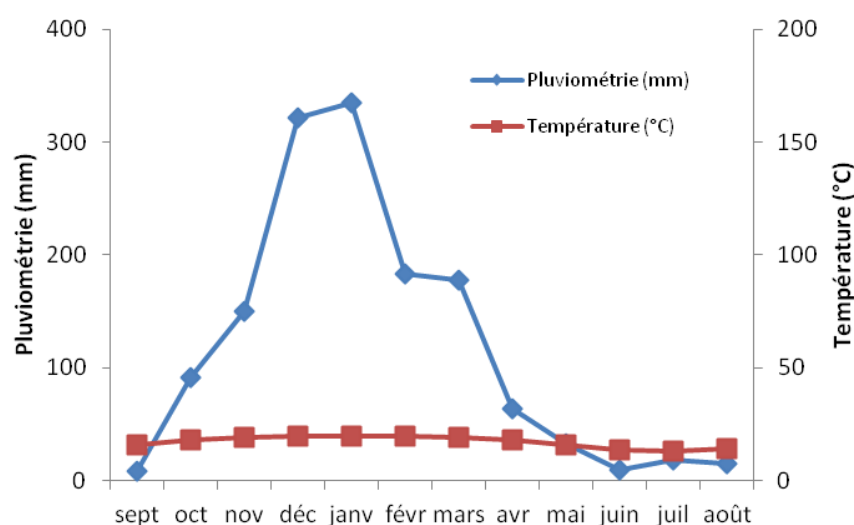


Figure 3-2: Courbe ombrothermique de la zone d'étude d'Andranomanelatra sur la matrice SCRiD de 2002-2011 (bilan de 9ans)

(Source : Station météo CIMEL / PCP-SCRiD)

D'après Razafimbelo (2005), le profil observé correspond à un profil polygénétique correspondant à une superposition de 2 types de matériaux superposés, nommés I et II, qui ont subi des évolutions pédogénétiques successives. Le matériau I correspond à un dépôt de sédiments assez récents, l'horizon I C/R. L'horizon sus-jacent I (B) comporte encore des lithoreliques de ces sédiments originels. Les horizons I A et I (B) sont de texture argileuse. La porosité (macro- et microporosité) est assez bonne sur l'ensemble des horizons du sol I, même si une couche un peu compactée est observée au niveau de l'horizon I (B) (Figure 3-3). Les horizons II (B) et II C/R contiennent, des matériaux très hétérogènes, bariolés, de couleurs rouge, marron et noir, résultant de l'altération de la roche ou des sédiments originels.

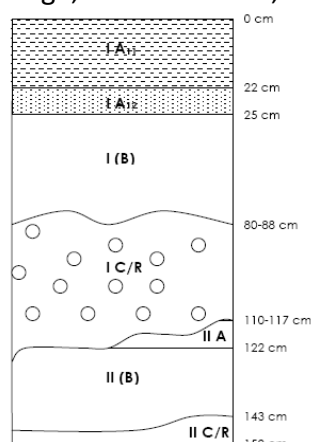


Figure 3-3 : Profil pédologique du sol Andranomanelatra

(Source : Razafimbelo, 2005)

Les horizons supérieurs du sol I ((horizons I A₁₁, I A₁₂ et I (B)) montrent des pH et des taux de saturation du complexe d'échange (TS) relativement bas, et la CEC est de l'ordre de 14 cmol_c kg⁻¹ d'argile. Le sol a été classé par Zebrowski et Ratsimbazafy (1979) (classification française, CPCS) comme un sol ferrallitique fortement désaturé, typique, rajeuni, humifère, sur matériau volcanique acide. Toutefois, ce sol ne peut être considéré comme un Oxisols (ou Ferralsols dans la classification FAO) du fait de l'absence d'un horizon d'accumulation d'argile, et de l'enrobage des lithoreliques par des sesquioxides de fer. Il s'agit d'un andic Dystrustept dans la Soil Taxonomy. Il appartient au sous-groupe andique.

3.2 Description du dispositif expérimental

L'essai agronomique d'Andranomanelatra, suivi par l'Unité SCRiD depuis 9 ans (2002-2011) sert de support expérimental. Cet essai, installé sur une parcelle de 3,2 ha, vise à comparer des systèmes de culture en vue de la mise au point de SCV. Cet essai (Figure 3-1) intègre des systèmes de cultures intégrant des céréales en rotation (riz et maïs) avec des cultures de graminées fourragères (éleusine (S2)) ou de légumineuses à graine (haricot (S1) ; soja (S3)) en association avec le maïs. Deux types de travaux du sol sont réalisés : un labour à l'*angady* ; un semis direct sur couverture végétale. Dans le premier cas, les résidus de culture sont exportés ; dans le second cas, ils sont restitués au sol sous forme de mulch. Deux types de fumure sont également comparées : une fumure uniquement organique (Fu) correspondant à l'apport de 5 t ha⁻¹ de fumier ; une fumure organo-minérale (FM), avec un apport organique identique au précédent, auquel s'ajoute un apport d'engrais minéraux (500 kg ha⁻¹ de dolomie + 300 kg ha⁻¹ NPK (11-22-16) + 100 kg ha⁻¹ urée). Ces divers facteurs sont combinés dans un essai factoriel constitué de 4 blocs, pour avoir 4 répétitions. Un bloc comprend 30 parcelles, mais, pour ce travail, seuls 24 parcelles ont été considérées. Les 24 parcelles ont été prélevées en juin 2003, après un cycle cultural, où l'ensemble des parcelles avaient été labourées (y compris les parcelles laissées ensuite en SCV), puis en 2007 et 2011, soit après 1, 5 et 9 ans de culture. Le plan détaillé du dispositif expérimental est présenté dans la Figure 3-4.

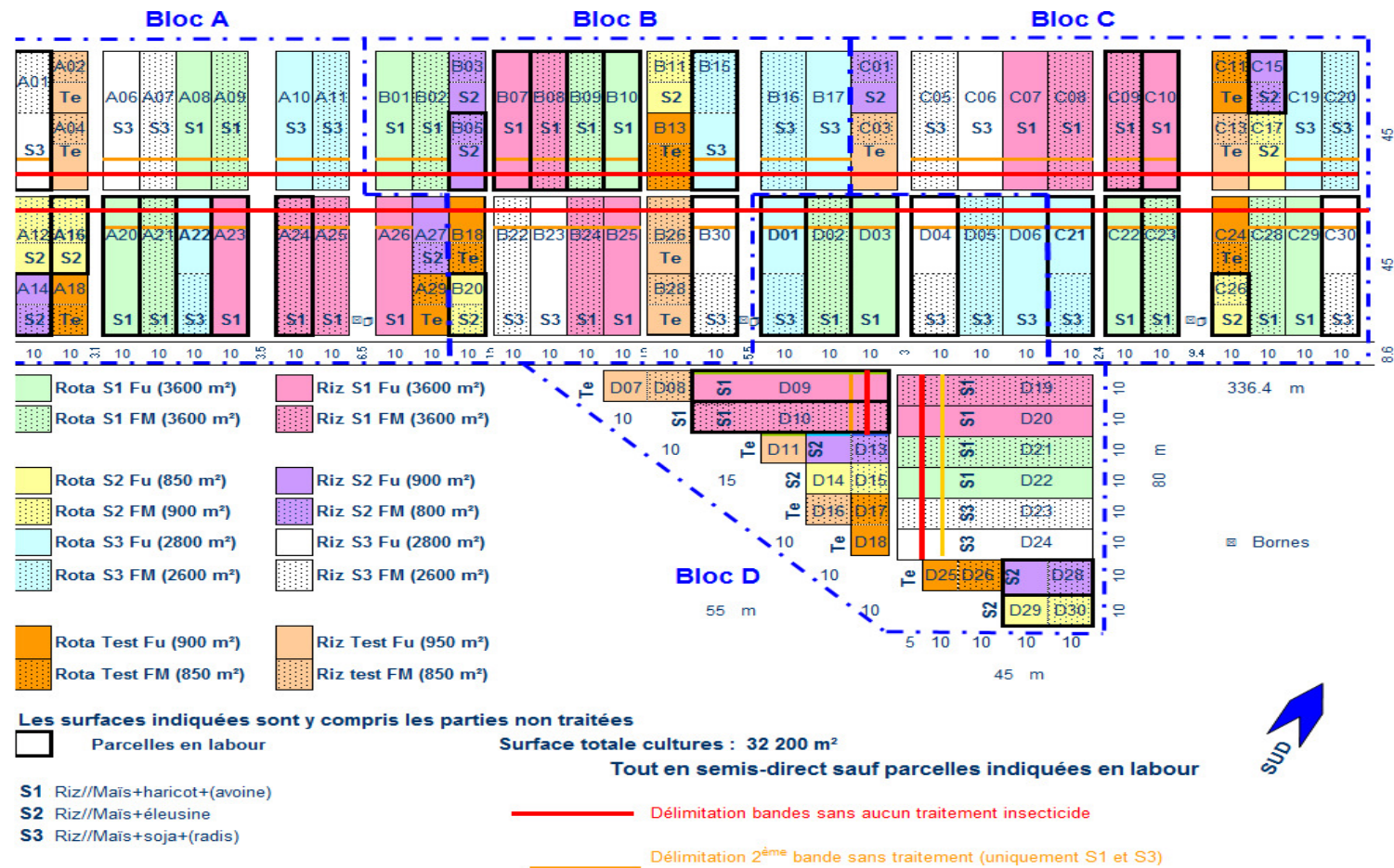


Figure 3-4 : Plan du dispositif expérimental

(Source : PCP/SCRID Andranomanelatra, 2011)

Ce dispositif expérimental teste à la fois divers systèmes de culture, modes de gestion du sol et fertilisation suivant une analyse diachronique (tableau 3-1 et 3-2).

3.2.1 Systèmes de culture

- S1 : riz // maïs + haricot + (avoine)
- S2 : riz // maïs + éleusine
- S3 : riz // maïs + soja + (radis fourrager)

Le riz (variété F161) est semé en monoculture dans le cadre d'une rotation biennale avec du maïs. Il est cultivé en quinconce avec 6 à 8 graines par poquet, un écartement de 20 cm x 20 cm et une densité de 250 000 poquets par hectare.

Le maïs est semé simultanément, en association avec une plante de couverture (haricot, éleusine ou soja), avec 2 graines par poquet en quinconce, un écartement de 40 cm x 40 cm et une densité de 62 500 pieds par hectare. La culture se trouve intercalée à 1m par rapport aux plantes de couvertures.

L'avoine et le radis fourrager sont semés en dérobée dès maturité du haricot (variété « le lingot blanc Soafianarana ») ou jaunissement des feuilles de soja (variété « cometa »).

3.2.2 Mode de gestion du sol

Deux modes de gestion du sol sont à comparer : le système traditionnel avec labour ou retournement des terres à l'aide de l'*angady* ou de la charrue à bœufs, les résidus de récolte sont exportés hors de la parcelle. Ce système est très répandu dans la majorité des exploitations agricoles malgaches. L'autre mode de gestion consiste à un semis direct sur couverture végétale où les résidus de récolte sont restitués à la parcelle pour minimiser la perte de la fertilité du sol (Razafindramanana, 2011).

3.2.3 Mode de fertilisation

Deux types de fumure sont également comparés :

- Une fumure uniquement organique correspondant à l'apport de 5 t ha⁻¹ (Fu) ;
- Et une fumure organique, identique à la précédente, à laquelle s'ajoute un apport d'engrais minéraux (FM) (500 kg ha⁻¹ la dolomie + 300 kg ha⁻¹ NPK (11-22-16) + 100 kg ha⁻¹ d'urée).

Tableau 3-1 : Dénomination des systèmes de culture

Systèmes	Mode de gestion	Rotation	Plante de couverture	Fertilisation
LB Riz Fu	LB	Riz // Maïs + S3	Soja	Fu
LB Riz FM	LB	Riz // Maïs + S3	Soja	FM
Riz S3 Fu	SCV	Riz // Maïs + S3	soja	Fu
Riz S3 FM	SCV	Riz // Maïs + S3	Soja	FM
Rota S3 Fu	SCV	Maïs + S3 // Riz	Soja	Fu
Rota S3 FM	SCV	Maïs + S3 // Riz	Soja	FM
Rota S3 Fu	SCV	Maïs + S3 // Riz	Soja	Fu
Rota S3 FM	SCV	Maïs + S3 // Riz	Soja	FM
Rota S2 FM	SCV	Maïs + S2 // Riz	Eleusine	FM
Rota S2 Fu	SCV	Maïs + S2 // Riz	Eleusine	Fu
LB Riz S2 Fu	LB	Maïs + S2 // Riz	Eleusine	Fu
LB Riz S3 FM	LB	Riz // Maïs + S3	Soja	FM
LB Rota S2 FM	LB	Maïs + S2 // Riz	Eleusine	FM
LB Rota S2 Fu	LB	Maïs + S2 // Riz	Eleusine	Fu
LB Rota S1 Fu	LB	Maïs + S1 // Riz	Haricot	Fu
LB Rota S1 FM	LB	Maïs + S1 // Riz	Haricot	FM
LB Rota S3 Fu	LB	Maïs + S3 // Riz	Eleusine	Fu
LB Rota S3 FM	LB	Maïs + S3 // Riz	Eleusine	FM
LB Riz S1 Fu	LB	Riz // Maïs + S1	Haricot	Fu
LB Riz S1 FM	LB	Riz // Maïs + S1	Haricot	FM
Riz S1 FM	SCV	Riz // Maïs + S1	Haricot	FM
Riz S1 Fu	SCV	Riz // Maïs + S1	Haricot	Fu
Riz S2 Fu	SCV	Riz // Maïs + S2	Eleusine	Fu
Riz S2 FM	SCV	Riz // Maïs + S2	Eleusine	FM

LB : Labour

SCV : Système à Couverture Végétale Permanente

FM : fertilisation Mixte (5 t.ha⁻¹ Fu + 500 kg.ha⁻¹ dolomie + 300 kg.ha⁻¹ NPK + 100 kg.ha⁻¹ urée)

Fu : Fumure organique (5 t.ha⁻¹)

Voici un autre tableau qui décrit un autre système tiré à partir du tableau ci-dessus pour une comparaison systématique de ces mêmes traitements mais seulement au niveau des parcelles à rotation à T9.

Tableau 3-2 : Dénomination des systèmes de culture au niveau des plantes légumineuses

Systèmes	Mode de gestion	Rotation	Plante de couverture	Fertilisation
Rota S3 Fu	SCV	Maïs + S3 // Riz	Soja	Fu
Rota S3 FM	SCV	Maïs + S3 // Riz	Soja	FM
Rota S3 Fu	SCV	Maïs + S3 // Riz	Soja	Fu
Rota S3 FM	SCV	Maïs + S3 // Riz	Soja	FM
Rota S2 FM	SCV	Maïs + S2 // Riz	Eleusine	FM
Rota S2 Fu	SCV	Maïs + S2 // Riz	Eleusine	Fu
LB Rota S2 FM	LB	Maïs + S2 // Riz	Eleusine	FM
LB Rota S2 Fu	LB	Maïs + S2 // Riz	Eleusine	Fu
LB Rota S1 Fu	LB	Maïs + S1 // Riz	Haricot	Fu
LB Rota S1 FM	LB	Maïs + S1 // Riz	Haricot	FM
LB Rota S3 Fu	LB	Maïs + S3 // Riz	Soja	Fu
LB Rota S3 FM	LB	Maïs + S3 // Riz	Soja	FM

LB : Labour

SCV : Système à Couverture Végétale Permanente

FM : fertilisation Mixte (5 t ha⁻¹ Fu + 500 kg ha⁻¹ dolomie + 300 kg ha⁻¹ NPK + 100 kg ha⁻¹ urée)

Fu : Fumure organique (5 t ha⁻¹)

3.3 Prélèvements du sol

Puisqu'il s'agit d'une étude diachronique, les échantillons sont prélevés à trois dates : les échantillons collectés en juin 2003 (T1), après 5 années de cultures en 2007 (T5) et un échantillonnage a été réalisé à la fin du cycle cultural 2010-2011, en avril 2011, soit après 9 années de culture (T9). L'échantillonnage a été prévu, à l'origine, pour suivre l'évolution des stocks de carbone et d'azote des sols. Il a été réalisé aux profondeurs suivantes : 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 et 30-40 cm, comme préconisé par les normes internationales (IPCC, 2006), à l'aide de cylindres de 250 cm³ (8 cm de diamètre et 5 cm de hauteur) pour 0-5 et 5-10cm, et de 500 cm³ (8 cm de diamètre et 10 cm de hauteur) pour 10-20, 20-30 et 30-40cm. A T1 et T5, les prélèvements ont été réalisés selon une grille 10 m x 10 m. Ces échantillons ont été récupérés dans la pédothèque du LRI pour être analysés. A T9, dans les parcelles associant le maïs et les cultures associées, des échantillons supplémentaires ont été prélevés : les échantillons de la grille 10 x 10 m ont été collectés sous maïs ; des échantillons supplémentaires ont été également collectés sous la culture associée (haricot, éleusine ou soja), afin de comparer les sols sous maïs ou sous plante de couverture. Au total, 384 échantillons du sol ont été prélevés, correspondant aux 24 traitements pour 4 blocs. Mais on ne traite seulement les 0-5 cm de profondeur, avec 96 échantillons pour T1, T5 et T9 ; 48 échantillons supplémentaires sous la culture associée (au niveau des plantes légumineuses) à T9.

Au laboratoire, les aliquotes sont passés à l'étuve à 105°C durant 48 heures afin de déterminer l'humidité pondérale. Le reste des échantillons est séché à l'air libre et à l'ombre. Ils sont ensuite tamisés à 2 mm puis, une fraction est broyée à 0,2 mm pour les analyses au laboratoire.



Figure 3-5 : Photo du prélèvement des échantillons de sol à cylindre

(Razafindramanana, 2009)

3.4 Analyses au laboratoire

Les analyses des échantillons de sol ont été réalisées au Laboratoire des Radiosotopes (LRI) dans le cadre d'un projet mené par le LRI en collaboration avec l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et l'Unité SCRiD Antsirabe.

Dans un premier temps, les analyses porteront sur les échantillons de surface (0-5 cm) de T1, T5 et T9. Le P labile sera déterminé par des extractions à l'eau (P_{eau}) (Beckett et White, 1964 ; Holford, 1997), par des résines échangeuses d'anions (P_{res}) (Van Raij *et al.*, 1986 ; McLaughlin *et al.*, 1993), par la méthode Olsen, permet de quantifier le P inorganique labile mais aussi le P organique labile (Cross et Schlesinger, 1995), et par la méthode de quantification de toute la fraction totale de P dans le sol puis le dosage colorimétrique des ions phosphates par la méthode au vert malachite, qu'est la méthode habituellement la plus utilisée au SRA/LRI du fait de sa plus grande sensibilité dans le sol très fixateur de P étudié (Morel, 2002). Dans ce cas la limite de détection est de $0,9 \mu\text{g P L}^{-1}$ et la limite de quantification est de $3,6 \mu\text{g P L}^{-1}$ (Bühler *et al.*, 2003). Malgré le peu de temps imparti, les échantillons sols ont été analysés pour ces différents paramètres pour T1, T5; pour T9 seul le P_{res} a été analysé.

3.4.1 Détermination du P dans la solution du sol ou P hydrosoluble (P_{eau})

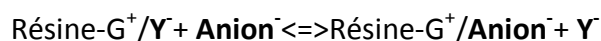
Il donne une indication de la teneur en phosphore de la solution du sol à l'équilibre. L'extraction est faite sur 1g d'échantillon de sol broyé à 0,2mm, mélangé à 10 ml d'eau distillée. Après agitation pendant 16 heures et filtration avec des filtres millipores jetables de $0,25\mu\text{m}$ le P est dosé dans la solution d'extraction.

3.4.2 Détermination du phosphore assimilable

Deux méthodes ont été utilisées pour estimer le phosphore disponible.

➤ Les résines anioniques

Cette méthode consiste à utiliser des bandes de résines échangeuses d'anions. La résine anionique, chargée positivement, est saturée par un anion, qui s'échange avec les anions en solution selon la réaction suivante :



Où G^+ est un radical chargé positivement et Y^- , un ion saturant la résine pour maintenir son électroneutralité (HCO_3^- , dans notre cas).

Le principe de cette méthode repose sur le transfert de P présent en solution vers la surface d'une résine provoquant l'apparition d'un gradient de concentration entre la phase solide du sol et la solution et une désorption subséquente de P de la phase solide du sol (Frossard *et al.*, 2004).

➤ **La méthode Olsen**

La méthode consiste à extraire le phosphore du sol par une solution de bicarbonate de sodium (NaHCO_3) 0,5 M à pH 8,5. Le phosphore minéral (P_{OI}) est mesuré dans l'extrait par colorimétrie. Le phosphore total de l'extrait (P_{OI}) est ensuite déterminé après neutralisation du bicarbonate avec du HCl 0,5M et une minéralisation à l'acide perchlorique à 105°C pendant 2h. Le phosphore organique (P_{Ooi}) est calculé par différence entre le phosphore total et le phosphore minéral ($\text{P}_{\text{Ooi}} = \text{P}_{\text{OI}} - \text{P}_{\text{OI}}$).

3.4.3 Détermination du P total dans le sol

Cette méthode consiste à déterminer la totalité des formes de phosphore dans la solution du sol (formes ioniques, molécules organique et inorganique) par digestion à l'acide perchlorique.

3.4.4 Dosage colorimétrique des ions phosphates

La méthode utilisée, dite au vert malachite, est basée sur la méthode de John (1970) qui est reprise par Martin et Morel (2002).

➤ **Principe et théorie :**

La détermination des ions phosphates en solution s'effectue en deux étapes. La première consiste en une hydrolyse des phosphates présents dans l'échantillon. Dans la seconde étape, les ions orthophosphates réagissent avec les ions molybdates pour former un complexe phosphomolybdate dans un milieu acide et qui se combine avec du vert malachite, qui forme un complexe coloré, mesuré à une longueur d'onde de 610 nm.

➤ **La gamme d'étalonnage:**

Il faut trouver la relation entre l'intensité de la coloration et la concentration en phosphore dissous. La première opération consiste à cerner le domaine d'applicabilité de la méthode, c'est à dire la gamme de concentration où on pourra appliquer la loi de Beer-Lambert, généralement pour une absorbance inférieure à 1.

Le but est de tracer une courbe d'étalonnage à l'aide d'une gamme de concentration connue en mesurant ainsi leur absorbance. Une fois tracée, la courbe d'étalonnage permettra de définir la concentration inconnue d'une solution à partir de la détermination de la densité optique.

La gamme étalon est définie entre 0 et 0,5 mg P L⁻¹ car au-delà de ces valeurs la relation entre absorbance et quantité de P n'est plus linéaire. Cette gamme étalon doit être préparée pour chaque série de manipulation des échantillons.

➤ Lecture au colorimètre

Le principe de l'utilisation de la spectrophotométrie pour l'analyse quantitative est basé sur le fait que l'intensité d'absorption est fonction de la concentration de la particule qui absorbe (ou qui émet) de la lumière.

Lorsque d'une lumière monochromatique d'intensité I_0 traverse un milieu homogène, l'intensité de la lumière émergente « I » décroît selon une fonction exponentielle lorsque l'épaisseur l du milieu absorbant augmente. Si on étudie principalement des solutions, la loi de Beer-Lambert fait intervenir les concentrations et s'exprime sous la forme suivante :

$$\log \left(\frac{I_0}{I} \right) = \epsilon c L = D$$

Où : « ϵ » est le coefficient d'extinction molaire ($\text{mol L}^{-1} \text{cm}^{-1}$) ;

« c » est la concentration de la solution (mol L^{-1}) ;

« L » est le chemin optique (cm).

Le rapport I/I_0 est appelé la transmission et notée T , celle-ci est reliée à la densité optique (DO). Un spectre d'absorption présente la variation de l'absorption par rapport à un échantillon incolore en fonction de la longueur d'onde.



Figure 3-6 : Photo de la spectrophotométrie en ultraviolet (190-1100 nm) (Metertech SP8001)

3.4.5 Calcul et expression des résultats

Le calcul de la concentration des ions phosphates dans la solution de sol est effectué grâce au logiciel Excel, à partir de la régression linéaire calculée à partir de la gamme étalon.

3.5 Analyses statistiques des données

Une analyse descriptive des résultats obtenus est réalisée dans un premier temps. Les résultats sont présentés sous forme de « boîte à moustache », ce qui permet de donner une représentation graphique des principales données statistiques et de leur distribution. Cette méthode permet également de vérifier s'il y a des valeurs aberrantes qui peuvent biaiser le calcul. Ces données ont été éliminées des calculs ultérieurs.

Ensuite, les données seront soumises à des analyses de variances (ANOVA), ce qui permettra de vérifier si les effets testés sont statistiquement significatifs. Nous avons effectué deux types d'analyses de la variance¹ : (i) l'analyse des effets des traitements (sans interaction) et (ii) analyse de l'interaction entre les traitements.

Dans les cas où des effets significatifs ont été observés, des comparaisons de moyennes entre les traitements ont été effectuées par le test de Tukey. Les résultats sont alors présentés sous forme d'histogrammes.

¹ Dans la discrimination des différents groupes le seuil $P = 5\%$ a été retenu.

QUATRIEME PARTIE : RESULTATS et INTERPRETATIONS

4.1 Statistiques descriptives

Les résultats des teneurs en P des horizons de surface des sols (0-5 cm) sont présentés sous forme de boîte à moustache pour l'ensemble des traitements pour chaque date de prélèvement (T1, T5 et T8). Ceci permet de représenter la variabilité des résultats obtenus pour l'ensemble des échantillons dans tout l'ensemble des traitements en fonction du temps. Ces boîtes présentent les résultats statistiques suivant : minimum (losange bleu inférieur) ; 1^{er} quartile (la partie inférieure de la boîte), médiane (ligne médiane ou le deuxième quartile), moyenne (+), le 3^{ème} quartile (la partie supérieure de la boîte), moitié (premier à troisième quartile), quatrième quartile (troisième au trait horizontal supérieur) et maximum (losange bleu supérieur).

4.1.1 Pi hydrosoluble

La Figure 4-1 montre une plus grande variabilité des teneurs à T1 par rapport à T5. Pour T1, les échantillons se trouvent entre une variabilité allant de 0 à 0,21 mg P kg⁻¹. La moitié des échantillons se trouve, entre 0,009 et 0,05 mg P kg⁻¹ et un quatrième quartile de 0,05 à 0,11 mg P kg⁻¹, avec un maximum de 0,21 mg P kg⁻¹.

Pour T5, les échantillons ont une variabilité de 0 à 0,16 mg P kg⁻¹, avec une moitié de 0,003 à 0,03 mg P kg⁻¹, et un quatrième quartile de 0,03 à 0,08 mg P kg⁻¹, avec un maximum de 0,16 mg P kg⁻¹. Constatons que la distribution de la teneur en Pi_{hydro} pour ces deux graphiques ne sont pas symétriques, avec une distribution des échantillons plus allongée vers les grandes valeurs, d'où leurs médianes inférieures aux moyennes (avec 0,02 mg P kg⁻¹ inférieur à 0,04 mg P kg⁻¹ pour T1 et 0,01 mg P kg⁻¹ inférieur à 0,03 mg P kg⁻¹ pour T5).

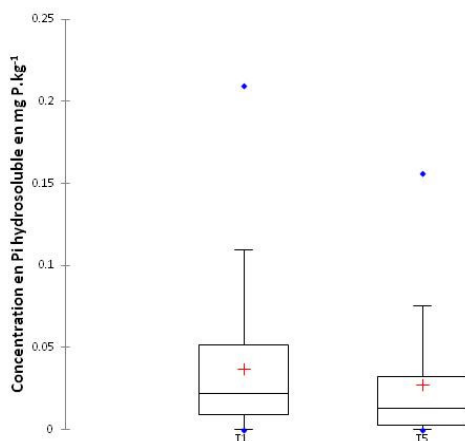


Figure 4-1 : Distribution en Pi_{hydrosoluble} en fonction du temps

4.1.2 $Pi_{\text{résine}}$

La Figure 4-2 montre la distribution des concentrations en $Pi_{\text{résine}}$ dans les différents traitements à T1, T5 et T9. Elle présente une augmentation de la variabilité des teneurs en $Pi_{\text{résine}}$ de T1 à T9. Les teneurs à T1 se trouvent entre 0,78 et 15,03 mg P kg⁻¹ passant de 0,63 à 20,73 mg P kg⁻¹, à T5; pour arriver jusqu'à 0 à 23,59 mg P kg⁻¹ pour T9. Pour T1, la moitié des échantillons se trouvent entre 3,88 et 8,15 mg P kg⁻¹ et un quatrième quartile de 8,15 à 14,55 mg P kg⁻¹, avec un maximum de 15,03 mg P kg⁻¹. Ensuite pour T5, la moitié des échantillons se trouve entre 4,21 et 8,97 mg P kg⁻¹, avec un quatrième quartile qui se situe entre 8,97 et 16,12 mg P kg⁻¹, et un maximum de 20,73 mg P kg⁻¹. Enfin pour T9, la moitié des échantillons se trouve entre 3,13 et 10,15 mg P kg⁻¹ avec un quatrième quartile de 10,15 à 20,70 mg P kg⁻¹ et un maximum de 23,59 mg P kg⁻¹.

Signalons que ces trois graphiques sont également tous dissymétriques, avec des médianes inférieures aux moyennes correspondantes, tel qu'à T1, 5,75 mg P kg⁻¹ inférieur à 6,32 mg P kg⁻¹; à T5, 6,01 mg P kg⁻¹ inférieur à 7,04 mg P kg⁻¹ et à T9, 5,27 mg P kg⁻¹ inférieur à 7,03 mg P kg⁻¹.

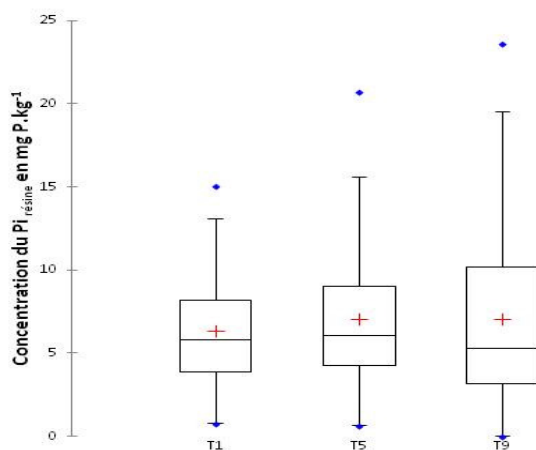


Figure 4-2: Distribution en $Pi_{\text{résine}}$ en fonction du temps

4.1.3 P_{Olsen}

4.1.3.1 Pi_{Olsen}

La Figure 4-3 montre la distribution des concentrations en Pi_{Olsen} dans les différents traitements à T1 et T5. A T1, les échantillons se trouvent entre une variabilité allant de 3,34 à 28,48 mg P kg⁻¹. La moitié des échantillons se trouve, entre 9,46 et 13,59 mg P kg⁻¹ et un quatrième quartile de 13,59 à 19,80 mg P kg⁻¹, avec un maximum de 28,48 mg P kg⁻¹. A T5, les échantillons se trouvent entre une variabilité allant de 2,70 à 28,07 mg P kg⁻¹, la moitié

des échantillons est de 7,65 à 11,08 mg P kg⁻¹, et un quatrième quartile se trouvant entre 11,08 et 16,22 mg P kg⁻¹, avec un maximum de 28,07 mg P.kg⁻¹.

Signalons que ces deux graphiques sont également tous dissymétriques, avec des médianes inférieures aux moyennes correspondantes, tel qu'à T1, 11,32 mg P kg⁻¹ inférieur à 12,22 mg P kg⁻¹; à T5, 9,27 mg P kg⁻¹ inférieur à 9,99 mg P kg⁻¹.

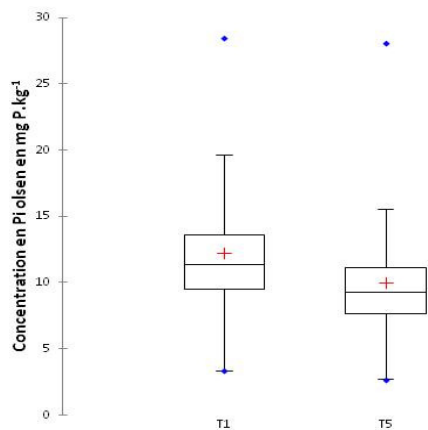


Figure4-3: Distribution en Pi_{olsen} en fonction du temps

4.1.3.2 Po_{olsen}

La Figure 4-4 présente une grande variabilité des teneurs en Po_{olsen} à T5 par rapport à T1. Rappelons que Po_{olsen} a été obtenu par la différence entre $P_{total\ Olsen}$ et Pi_{olsen} . Pour T1, les échantillons se trouvent à une concentration entre 0,08 et 21,49 mg P kg⁻¹, avec une moitié de 8,64 à 14,78 mg P kg⁻¹ et un quatrième quartile qui se situe entre 14,78 et 23,98 mg P kg⁻¹ et un maximum de 21,49 mg P kg⁻¹. Pour T5, les échantillons se trouvent à une concentration entre 0 et 24,39 mg P kg⁻¹, avec une moitié de 4,27 à 13,15 mg P kg⁻¹, un quatrième quartile qui se situe entre 13,15 et 24 mg P kg⁻¹ environ et un maximum de 24,39 mg P kg⁻¹. Constatons également que la distribution de ces deux boîtes est dissymétrique.

A T1, la distribution est plus ou moins allongée vers les grandes valeurs, c'est pourquoi la médiane (11,41 mg P kg⁻¹) est plus ou moins inférieure à la moyenne (11,62 mg P kg⁻¹). Contrairement pour T5, la distribution tend vers les petites valeurs, ce qui signifie que la médiane (10,23 mg P kg⁻¹) est supérieure à la moyenne (9,57 mg P kg⁻¹).

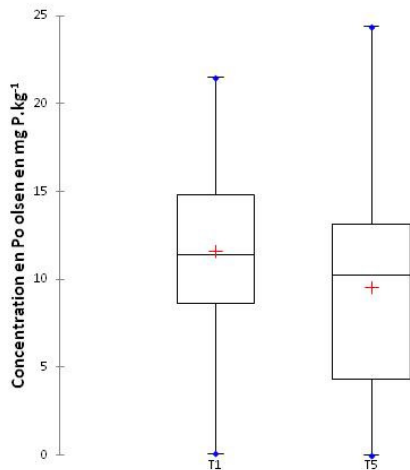


Figure 4-4: Distribution en P_{olsen} en fonction du temps

4.1.4 P total

La Figure 4-5 présente une grande variabilité des teneurs en P total à T5 par rapport à T1. Rappelons également que, il y a un apport annuel de deux sortes de fumure : en fumure organique correspondant à l'apport de 5 t ha^{-1} (Fu) et une fertilisation mixte contient, un apport d'engrais minéraux ou FM (500 kg ha^{-1} dolomie + 300 kg ha^{-1} NPK (11-22-16) + 100 kg ha^{-1} urée), à laquelle s'ajoute 5 t ha^{-1} Fu. Pour T1, les échantillons ont une variabilité de $174,74$ à $470,36 \text{ mg P kg}^{-1}$. La moitié se situe entre $275,61$ et $348,70 \text{ mg kg}^{-1}$, et un quatrième quartile de $348,70$ à $458,33 \text{ mg P kg}^{-1}$, avec un maximum de $470,36 \text{ mg P kg}^{-1}$. Pour T5, les variabilités se trouvent entre $263,21$ à $655,41 \text{ mg P kg}^{-1}$, avec une moitié qui se situe entre $360,79$ à $421,52 \text{ mg P kg}^{-1}$, un quatrième quartile de $421,52$ à $512,62 \text{ mg P kg}^{-1}$ et un maximum de $655,41 \text{ mg P kg}^{-1}$.

Remarquons que également que la distribution de ces deux boîtes est dissymétrique. Pour T1, la moyenne se trouve presque à juxtaposition de la médiane, avec une moyenne de $314,38 \text{ mg P kg}^{-1}$ et une médiane de $314,30 \text{ mg P kg}^{-1}$ du P total. Mais pour T5, la distribution est allongée vers les grandes valeurs, c'est pourquoi la médiane ($387,16 \text{ mg P kg}^{-1}$) est inférieure à la moyenne ($399,33 \text{ mg P kg}^{-1}$).

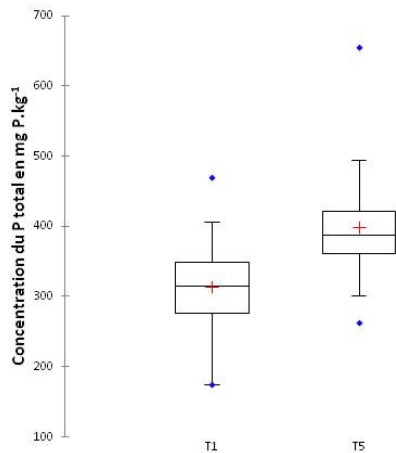


Figure4-5: Distribution en P total en fonction du temps

4.2 Analyse de la variance pour chaque date

Les résultats des analyses de variance (ANOVA), effectuée sur les résultats de T1, T5 et T9, sont présentés respectivement dans les tableaux récapitulatifs (tableau 4-1, 4-3, 4-5 et 4-7) pour les effets principaux ainsi que les traitements en interaction sur les paramètres P_i hydrosoluble, P_i résine, P_i olsen, P_o olsen et P total. Les tableaux 4-2, 4-4, 4-6 et 4-8 présentent les récapitulations des moyennes et écartypes pour chacun des effets testés. Ceux qui présentent une différence significative sont écrits en gras.

4.2.1. A T1

L'analyse de variance (Tableau 4-1) met en évidence un effet des répétitions sur les variables suivantes : P_i hydro, P_o Olsen et P total. Cette observation met en évidence une certaine hétérogénéité de la parcelle, qui a été prise en compte par la mise en place d'un essai en blocs. Pour ce qui concerne les effets et les variables testés, des différences significatives ont été observées seulement sur :

- le mode de gestion du sol pour P_i Olsen , et P_o Olsen ;
- le mode de fertilisation pour P_i résine et P_i Olsen.

Par contre, la présence des différences significatives pour les traitements en interaction ont été observées uniquement sur :

- la culture x gestion du sol pour P_i résine, P_i Olsen et P_o Olsen ;
- la plante de couverture x gestion du sol pour P_i Olsen et P_o Olsen ;
- la fertilisation x gestion du sol pour P_i résine, P_i Olsen et P_o Olsen.

Tableau 4-1 : Présentation des résultats statistiques de l'analyse de la variance de différents traitements pour T1

Effet et Traitement (P =0,005)	df	Pi _{hydro}		Pi _{résine}		Pi _{Olsen}		Po _{Olsen}		P total		Erreur
		F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	
Culture	1	0,02	0,89	0,06	0,81	0,01	0,93	1,71	0,19	0,01	0,94	94
Plante de couverture	2	0,17	0,84	2,61	0,08	0,45	0,64	1,24	0,29	0,82	0,44	93
Gestion du sol	1	0,35	0,56	3,36	0,07	20,04	< 0,0001	9,26	0,00	1,63	0,21	94
Fertilisation	1	0,31	0,58	4,93	0,03	4,52	0,04	0,02	0,89	1,40	0,24	94
Répétition	3	27,73	< 0,0001	0,86	0,46	0,17	0,92	6,24	0,00	10,60	< 0,0001	92
Culture x plante de couverture	5	0,37	0,86	1,70	0,14	0,48	0,79	0,99	0,43	0,65	0,66	90
Culture x gestion du sol	3	1,17	0,33	3,08	0,03	6,60	0,00	5,84	0,00	0,71	0,55	92
Culture x fertilisation	3	0,11	0,95	1,93	0,13	1,96	0,13	0,66	0,58	0,51	0,68	92
Culture x répétition	7	9,82	< 0,0001	1,15	0,34	1,27	0,27	3,32	0,00	6,01	< 0,0001	88
Plante de couverture x gestion du sol	5	0,21	0,96	1,70	0,14	4,51	0,00	2,96	0,02	1,34	0,26	90
Plante de couverture x fertilisation	5	0,45	0,81	1,96	0,09	1,59	0,17	0,55	0,73	0,70	0,63	90
Plante de couverture x répétition	11	6,47	< 0,0001	1,08	0,39	0,42	0,94	3,03	0,00	3,21	0,00	84
Fertilisation x gestion du sol	3	0,22	0,88	3,38	0,02	9,36	< 0,0001	3,50	0,02	1,47	0,23	92
Fertilisation x répétition	7	11,74	< 0,0001	1,06	0,39	0,83	0,57	3,30	0,00	4,75	0,00	88
Gestion du sol x répétition	7	14,64	< 0,0001	1,33	0,25	3,12	0,01	4,91	0,00	5,26	< 0,0001	88

d.f., degree of freedom; *P*, levels of significance; LS means, calculated least square means; means with the same letter are not significantly different using Bonferroni test (*P* <0.05). The error standard cannot be calculated on the whole data set as there is not a unique variance.

Suite au tableau 4-1, le tableau 4-2 spécifie les effets principaux qui ont une différence significative sur les paramètres avec les moyennes et les écartypes :

- le SCV a une différence significative sur Pi_{Olsen} avec $14,06 \pm 4,56^b$ par rapport au LB, avec $10,40 \pm 3,36^a$. Et il influe encore sur Po_{Olsen} avec $13,08 \pm 3,99^b$ par rapport au LB, avec $10,17 \pm 4,68^a$.
- la fumure organique (Fu) présente une différence significative sur $Pi_{résine}$ avec $5,63 \pm 2,79^b$ par rapport à la fertilisation mixte (FM) qui est de $7,02 \pm 3,09^a$. Et elle influe également sur Pi_{Olsen} avec $11,29 \pm 3,64^b$ par rapport à FM qui est de $13,16 \pm 4,89^a$.

Tableau 4-2: Tableau récapitulatif de la significativité (Mean $\pm$ error standard for the main effects or LS; groupe) à T1

Effet (P =0,005)		Pi _{hydro}	Pi _{résine}	Pi _{Olsen}	Po _{Olsen}	P total
Culture	Riz	$0,04 \pm 0,05^a$	$6,27 \pm 2,79^a$	$12,19 \pm 4,41^a$	$11,08 \pm 4,73^a$	$314,14 \pm 48,09^a$
	Maïs	$0,04 \pm 0,04^a$	$6,37 \pm 3,24^a$	$12,27 \pm 4,42^a$	$12,17 \pm 4,38^a$	$314,64 \pm 61,14^a$
Plante de couverture	S1	$0,04 \pm 0,04^a$	$7,20 \pm 3,53^a$	$12,81 \pm 4,36^a$	$10,62 \pm 3,48^a$	$323,81 \pm 58,90^a$
	S2	$0,03 \pm 0,04^a$	$6,01 \pm 2,79^a$	$11,80 \pm 3,64^a$	$11,71 \pm 4,55^a$	$311,28 \pm 60,95^a$
	S3	$0,04 \pm 0,05^a$	$5,75 \pm 2,52^a$	$12,07 \pm 5,12^a$	$12,48 \pm 5,38^a$	$307,97 \pm 42,95^a$
Gestion du sol	SCV	$0,03 \pm 0,03^a$	$6,77 \pm 3,08^a$	$14,06 \pm 4,56^b$	$13,08 \pm 3,99^b$	$320,69 \pm 55,50^a$
	LB	$0,04 \pm 0,05^a$	$5,90 \pm 2,91^a$	$10,40 \pm 3,36^a$	$10,17 \pm 4,68^a$	$307,95 \pm 53,57^a$
Fertilisation	Fu	$0,04 \pm 0,04^a$	$5,63 \pm 2,79^b$	$11,29 \pm 3,64^b$	$11,52 \pm 4,93^a$	$308,33 \pm 56,01^a$
	FM	$0,04 \pm 0,04^a$	$7,02 \pm 3,09^a$	$13,16 \pm 4,89^a$	$11,74 \pm 4,23^a$	$320,31 \pm 53,18^a$
Répétition	A	$0,02 \pm 0,02^b$	$5,68 \pm 3,15^a$	$12,66 \pm 4,99^a$	$9,17 \pm 4,31^c$	$273,13 \pm 49,81^c$
	B	$0,02 \pm 0,02^b$	$7,15 \pm 3,11^a$	$11,99 \pm 5,00^a$	$14,08 \pm 3,81^a$	$337,60 \pm 57,76^{ab}$
	C	$0,08 \pm 0,05^a$	$5,93 \pm 3,35^a$	$11,86 \pm 3,20^a$	$11,04 \pm 3,05^{bc}$	$340,63 \pm 38,65^a$
	D	$0,02 \pm 0,02^b$	$6,51 \pm 2,32^a$	$12,40 \pm 4,35^a$	$12,35 \pm 5,54^{ab}$	$305,82 \pm 42,91^{bc}$

4.2.2 A T5

L'analyse de variance (Tableau 4-3) met en évidence un effet des répétitions sur les variables suivantes : $Pi_{\text{hydrosoluble}}$, Pi_{Olsen} , Po_{Olsen} . Cette observation met en évidence une certaine hétérogénéité de la parcelle, qui a été prise en compte par la mise en place d'un essai en blocs. Pour ce qui concerne les effets et les variables testés, des différences significatives ont été observées seulement sur :

- le mode de gestion du sol pour $Pi_{\text{résine}}$, Pi_{Olsen} et P total ;
- le mode de fertilisation pour $Pi_{\text{résine}}$ et Pi_{Olsen} .

Par contre, la présence des différences significatives pour les traitements en interaction ont été observées uniquement sur :

- la culture x gestion du sol pour $Pi_{\text{résine}}$, Pi_{Olsen} et P total ;
- la plante de couverture x gestion du sol pour $Pi_{\text{résine}}$, Pi_{Olsen} et P total ;
- la fertilisation x gestion du sol pour $Pi_{\text{résine}}$, Pi_{Olsen} et P total.

Tableau 4-3 : Présentation des résultats statistiques de l'analyse de la variance de différents traitements pour T5

Effet et Traitement (P =0,005)	Df	Pi hydrosoluble		Pi résine		Pi Olsen		Po Olsen		P total		Error
		F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	
Culture	1	0,00	0,98	0,30	0,58	0,26	0,61	0,01	0,94	0,32	0,57	94
Plante de couverture	2	0,03	0,97	0,16	0,85	0,62	0,54	0,48	0,62	1,04	0,36	93
Gestion du sol	1	0,57	0,45	48,36	< 0,0001	15,84	0,00	0,00	0,97	14,08	0,00	94
Fertilisation	1	0,01	0,94	6,88	0,01	5,24	0,02	1,39	0,24	3,70	0,06	94
Répétition	3	17,29	< 0,0001	0,03	0,99	5,69	0,00	47,19	< 0,0001	0,90	0,44	92
Culture x plante de couverture	5	0,37	0,87	0,27	0,93	0,52	0,76	0,67	0,64	0,60	0,70	90
Culture x gestion du sol	3	0,21	0,89	15,79	< 0,0001	5,80	0,00	0,08	0,97	6,08	0,00	92
Culture x fertilisation	3	0,11	0,95	2,53	0,06	2,08	0,11	0,29	0,83	1,33	0,27	92
Culture x répétition	7	7,39	< 0,0001	0,50	0,83	3,25	0,00	19,36	< 0,0001	1,16	0,33	88
Plante de couverture x gestion du sol	5	0,14	0,98	9,74	< 0,0001	3,50	0,01	0,23	0,95	3,17	0,01	90
Plante de couverture x fertilisation	5	0,18	0,97	1,87	0,11	1,51	0,20	0,36	0,87	1,46	0,21	90
Plante de couverture x répétition	11	5,88	< 0,0001	0,10	1,00	2,18	0,02	16,03	< 0,0001	0,49	0,91	84
Fertilisation x gestion du sol	3	0,23	0,88	22,58	< 0,0001	7,78	0,00	0,34	0,80	6,92	0,00	92
Fertilisation x répétition	7	7,70	< 0,0001	1,14	0,34	3,63	0,00	20,98	< 0,0001	1,30	0,26	88
Gestion du sol x répétition	7	7,34	< 0,0001	7,43	< 0,0001	6,22	< 0,0001	18,88	< 0,0001	3,02	0,01	88

d.f., degree of freedom; P, levels of significance; LS means, calculated least square means; means with the same letter are not significantly different using Bonferroni test ($P < 0.05$). The error standard cannot be calculated on the whole data set as there is not a unique variance.

Suite au tableau 4-3, le tableau 4-4 spécifie les effets principaux qui ont une différence significative sur les paramètres avec les moyennes et les écartypes :

- le SCV a une différence significative sur $Pi_{résine}$ avec $9,47 \pm 4,00^a$ par rapport au LB, avec $4,82 \pm 2,69^b$. Et il influe encore sur Pi_{Olsen} avec $11,44 \pm 4,32^a$ par rapport au LB, avec $8,57 \pm 2,69^b$; et avec un P total de $423,84 \pm 77,80^a$ par SCV et $375,84 \pm 42,06^b$ par LB ;
- Fu présente une différence significative sur $Pi_{résine}$ avec $6,15 \pm 3,29^b$ par rapport à FM qui est de $8,03 \pm 4,66^a$. Et elle influe également sur Pi_{Olsen} avec $9,14 \pm 3,13^b$ par rapport à FM qui est de $10,85 \pm 4,34^a$.

Tableau 4-4 : Tableau récapitulatif de la significativité (Mean $\pm$ error standard for the main effects or LS; groupe) à T5

Effet (P =0,005)		Pi _{hydro}	Pi _{résine}	Pi _{Olsen}	Po _{Olsen}	P total
Culture	Riz	$0,03 \pm 0,04^a$	$6,85 \pm 4,17^a$	$9,82 \pm 3,95^a$	$9,66 \pm 5,58^a$	$402,79 \pm 75,65^a$
	Maïs	$0,03 \pm 0,03^a$	$7,25 \pm 4,05^a$	$10,16 \pm 3,78^a$	$9,51 \pm 6,42^a$	$396,01 \pm 56,69^a$
Plante de couverture	S1	$0,03 \pm 0,04^a$	$7,27 \pm 3,84^a$	$10,49 \pm 3,86^a$	$8,96 \pm 6,76^a$	$412,50 \pm 72,97^a$
	S2	$0,03 \pm 0,03^a$	$7,38 \pm 4,08^a$	$10,15 \pm 3,84^a$	$9,92 \pm 6,38^a$	$395,82 \pm 65,31^a$
	S3	$0,03 \pm 0,04^a$	$6,46 \pm 4,42^a$	$9,31 \pm 3,89^a$	$9,84 \pm 4,76^a$	$389,78 \pm 60,30^a$
Gestion du sol	SCV	$0,03 \pm 0,04^a$	$9,47 \pm 4,00^a$	$11,44 \pm 4,32^a$	$9,48 \pm 6,66^a$	$423,84 \pm 77,80^a$
	LB	$0,02 \pm 0,04^a$	$4,82 \pm 2,69^b$	$8,57 \pm 2,69^b$	$9,67 \pm 5,40^a$	$375,84 \pm 42,06^b$
Fertilisation	Fu	$0,03 \pm 0,04^a$	$6,15 \pm 3,29^b$	$9,14 \pm 3,13^b$	$10,24 \pm 6,11^a$	$386,53 \pm 59,58^a$
	FM	$0,03 \pm 0,03^a$	$8,03 \pm 4,66^a$	$10,85 \pm 4,34^a$	$8,92 \pm 5,88^a$	$412,13 \pm 70,86^a$
Répétition	A	$0,06 \pm 0,05^a$	$6,84 \pm 4,24^a$	$10,83 \pm 4,52^{ab}$	$13,03 \pm 5,14^a$	$405,61 \pm 91,27^a$
	B	$0,01 \pm 0,01^c$	$6,66 \pm 2,59^a$	$12,03 \pm 4,23^a$	$13,86 \pm 5,44^a$	$413,48 \pm 83,30^a$
	C	$0,03 \pm 0,03^a$	$7,18 \pm 4,59^a$	$8,87 \pm 2,62^b$	$8,75 \pm 2,30^b$	$383,28 \pm 30,57^a$
	D	$0,01 \pm 0,01^b$	$7,44 \pm 4,66^a$	$8,31 \pm 2,65^b$	$2,12 \pm 1,60^c$	$394,06 \pm 34,07^a$

4.2.3 A T9

Signalons que, face à un retard de récolte, notre choix était seulement sur le $Pi_{résine}$, puisque la méthode de déterminer les ions échangeables est adéquate et respectant au temps que nous avons disposé pour l'accomplissement de notre étude. De ce fait, l'analyse de variance (tableau 4-5) montre les effets et la variable testés seulement sur le $Pi_{résine}$, des différences significatives ont été observées seulement sur :

- la gestion du sol ;
- et le mode de fertilisation.

Ce tableau met en évidence un effet des répétitions en interaction avec les traitements fertilisation et gestion du sol suivant la variable $Pi_{résine}$. Cette observation met en évidence une certaine hétérogénéité de la parcelle, qui a été prise en compte par la mise en place d'un essai en blocs. Par contre, une différence significative a été également observée sur :

- la culture x gestion du sol ;
- la culture x fertilisation ;
- la plante de couverture x gestion du sol ;
- la plante de couverture x fertilisation.

Tableau 4-5: Présentation des résultats statistiques de l'analyse de la variance de différents traitements pour un seul paramètre $Pi_{résine}$ pour la huitième année

Effet et Traitement ($P=0,005$)	Df	$Pi_{résine}$		Error
		F	Pr > F	
Plante de couverture	2	0.16	0.85	45
Gestion du sol	1	7.13	0.01	46
Fertilisation	1	0.59	0.45	46
Répétition	3	0.47	0.70	44
Culture x plante de couverture	2	0.160	0.85	45
Culture x gestion du sol	1	7.133	0.01	46
Culture x fertilisation	1	0.586	0.45	46
Culture x répétition	3	0.473	0.70	44
Plante de couverture x gestion du sol	5	1.65	0.17	42
Plante de couverture x fertilisation	5	0.22	0.95	42
Plante de couverture x répétition	11	0.72	0.71	36
Fertilisation x gestion du sol	3	3.51	0.02	44
Fertilisation x répétition	7	1.17	0.34	40
Gestion du sol x répétition	7	1.71	0.14	40

d.f., degree of freedom; P , levels of significance; LS means, calculated least square means; means with the same letter are not significantly different using Bonferroni test ($P < 0.05$). The error standard cannot be calculated on the whole data set as there is not a unique variance.

Suite au tableau 4-5, le tableau 4-6 spécifie les effets principaux qui ont une différence significative sur le paramètre avec les moyennes et les écartypes :

- le SCV a une différence significative sur $Pi_{résine}$ avec $9,25 \pm 5,72^a$ par rapport au LB, avec $4,81 \pm 3,43^b$;
- Fu présente une différence significative sur $Pi_{résine}$ avec $4,60 \pm 3,26^b$ par rapport à FM qui est de $9,47 \pm 5,64^a$.

Tableau 4-6: Tableau récapitulatif de la significativité (Mean $\pm$ error standard for the main effects or LS) à T9

Effet ($P = 0,005$)		$Pi_{résine}$
Culture	Riz	7.02 ± 5.51^a
	Maïs	7.04 ± 4.92^a
Plante de couverture	S1	8.08 ± 6.29^a
	S2	7.13 ± 5.27^a
	S3	5.89 ± 3.59^a
Gestion du sol	SCV	9.25 ± 5.72^a
	LB	4.81 ± 3.43^b
Fertilisation	Fu	4.60 ± 3.26^b
	FM	9.47 ± 5.64^a
Répétition	A	7.60 ± 6.96^a
	B	6.60 ± 5.22^a
	C	6.00 ± 3.96^a
	D	7.93 ± 4.19^a

4.2.4 Comparaison maïs - plantes associées à T9

Le tableau 4-5 montre les effets et variable testés seulement sur le $Pi_{résine}$, des différences significatives ont été observées seulement sur la gestion du sol.

Ce tableau met en évidence un effet des répétitions en interaction avec les traitements fertilisation et gestion du sol suivant la variable $Pi_{résine}$. Cette observation met en évidence une certaine hétérogénéité de la parcelle, qui a été prise en compte par la mise en place d'un essai en blocs. Par contre, une différence significative a été également observée sur :

- la culture x gestion du sol ;
- la fertilisation x gestion du sol.

Tableau 4-7: Présentation des résultats statistiques de l'analyse de la variance de différents traitements pour un seul paramètre $Pi_{résine}$ au niveau des plantes légumineuses à T9

Effet et Traitement ($P=0,005$)	Df	$Pi_{résine}$		Error
		F	P	
Plante de couverture	2	0,16	0,85	45
Gestion du sol	1	7,13	0,01	46
Fertilisation	1	0,59	0,45	46
Répétition	3	0,47	0,70	44
Culture x plante de couverture	2	0,16	0,85	45
Culture x gestion du sol	1	7,13	0,01	46
Culture x fertilisation	1	0,59	0,45	46
Culture x répétition	3	0,47	0,70	44
Plante de couverture x gestion du sol	5	1,65	0,17	42
Plante de couverture x fertilisation	5	0,22	0,95	42
Plante de couverture x répétition	11	0,72	0,71	36
Fertilisation x gestion du sol	3	3,51	0,02	44
Fertilisation x répétition	7	1,17	0,34	40
Gestion du sol x répétition	7	1,71	0,14	40

d.f., degree of freedom; P , levels of significance; LS means, calculated least square means; means with the same letter are not significantly different using Bonferroni test ($P < 0.05$). The error standard cannot be calculated on the whole data set as there is not a unique variance. Alpha= 5%.

Suite au tableau 4-7, le tableau 4-8 spécifie les effets principaux qui ont une différence significative sur le paramètre avec les moyennes et les écartypes, tel que, le SCV a une différence significative sur $Pi_{résine}$ avec $8,20 \pm 5,12^a$ par rapport au LB, avec $4,82 \pm 2,35^b$.

Tableau 4-8: Tableau récapitulatif de la significativité (Mean $\pm$ error standard for the main effects or LS) à T9

Effet ($P=0,005$)		$Pi_{résine}$
Plante de couverture	S1	$6,88 \pm 2,99^a$
	S2	$6,67 \pm 4,92^a$
	S3	$5,90 \pm 4,76^a$
Gestion du sol	SCV	$8,20 \pm 5,12^a$
	LB	$4,82 \pm 2,35^b$
Fertilisation	Fu	$6,05 \pm 4,41^a$
	FM	$6,92 \pm 4,17^a$
Répétition	A	$5,45 \pm 3,32^a$
	B	$7,48 \pm 4,51^a$
	C	$6,66 \pm 4,54^a$
	D	$6,33 \pm 4,87^a$

4.3 Analyse diachronique

Dans les cas où des effets significatifs ont été observés sur les effets principaux (gestion du sol et fertilisation) dans les ANOVA réalisées antérieurement, des comparaisons des effets de traitements ont été réalisées en fonction de l'évolution du temps.

4.3.1 Evolution des effets de la gestion du sol : SCV et LB

4.3.1.1 Sur Pi_{Olsen} et Po_{Olsen}

La figure 4-6 présente l'évolution des effets de gestions du sol sur Pi_{Olsen} de T1 à T5. A T1, le système SCV présente une différence significative avec une moyenne et écartype de $14,06 \pm 4,56^b$ par rapport au système traditionnel qui est de $10,40 \pm 3,36^a$. Remarquons que, le système SCV a une teneur, $14,06 \text{ mg P kg}^{-1}$, plus élevée par rapport à celui du labour qui est de $10,40 \text{ mg P kg}^{-1}$. Inversement à T5, LB présente une différence significative, avec une moyenne et écartype de $8,57 \pm 2,69^b$, par rapport au SCV qui est de $11,44 \pm 4,32^a$. Le système SCV renferme plus de Pi_{Olsen} , avec $11,44 \text{ mg P kg}^{-1}$ par rapport au labour qui est de $8,57 \text{ mg P kg}^{-1}$. Par ailleurs, la concentration en Pi_{Olsen} s'est diminuée de T1 à T5.

La figure 4-7 présente l'évolution des effets de la gestion du sol sur Po_{Olsen} de T1 à T5. A T1, le système SCV présente une différence significative, avec une moyenne et écartype de $13,08 \pm 3,99^b$ par rapport au labour qui est de $10,17 \pm 4,68^a$. Constatons que, à T1, la teneur en Po_{Olsen} est importante sous SCV, avec $13,03 \text{ mg kg}^{-1}$ par rapport à celui du labour, avec $10,17 \text{ mg P kg}^{-1}$. Par contre à T5, les travaux du sol ne présentent aucune différence significative, avec une moyenne et écartype de $9,48 \pm 6,66^a$ pour le SCV et $9,67 \pm 5,40^a$ pour le labour. Toutefois à T5, le Po_{Olsen} sous labour est plus ou moins important, avec $9,67 \text{ mg P kg}^{-1}$ par rapport au SCV qui est de $9,48 \text{ mg P kg}^{-1}$, mais leurs effets sur le Po_{Olsen} n'influent plus à T5. En plus, sa concentration s'est diminuée de T1 à T5.

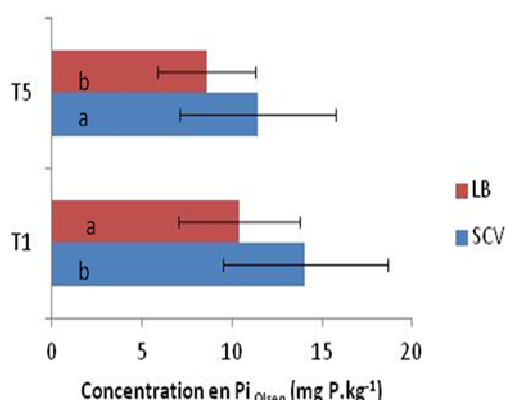


Figure 4-6 : Evolution des effets de SCV et LB sur Pi_{Olsen} de T1 à T5

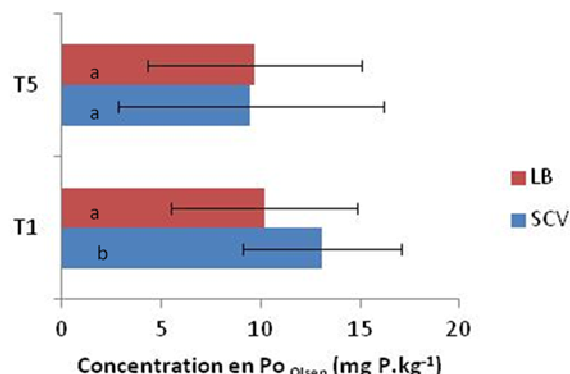


Figure 4-7 : Evolution des effets de SCV et LB sur Po_{Olsen} de T1 à T5

La figure 4-8, présente l'évolution des effets de la gestion du sol sur P total de T1 à T5. A T1, les travaux du sol n'influent pas à la concentration en P total, avec une moyenne et écarttype de $320,69 \pm 55,50^a$ sous SCV et $307,95 \pm 53,57^a$ sous labour. Par contre la concentration en P total sous SCV est $320,69 \text{ mg P kg}^{-1}$, supérieur par rapport à celui du labour, avec $307,95 \text{ mg P kg}^{-1}$. A T5, les travaux du sol influent la concentration en P total, avec une moyenne et écarttype de $423,84 \pm 77,80^a$ sous SCV et $375,84 \pm 42,06^b$ sous labour. A T5, le système SCV renferme plus en P total, avec $423,84 \text{ mg P kg}^{-1}$ par rapport au système labouré, avec $375,84 \text{ mg P kg}^{-1}$ en P total. Par ailleurs, la concentration en P total s'est augmentée de T1 à T5.

La figure 4-9 montre l'évolution des effets de SCV et labour sur la concentration en $\text{Pi}_{\text{résine}}$ de T1 à T9 dans le sol. A T1, la gestion du sol ne présente aucune différence significative, avec une moyenne et écarttype de $6,77 \pm 3,08^a$ sous SCV et $5,90 \pm 2,91^a$ sous le système labouré. Par ailleurs, la concentration en $\text{Pi}_{\text{résine}}$ sous SCV ($6,77 \text{ mg P kg}^{-1}$) est plus élevée par rapport à celui du labour $5,90 \text{ mg P kg}^{-1}$. A T5, la figure présente une différence significative entre les systèmes, avec $9,47 \pm 4,00^a$ sous SCV et $4,82 \pm 2,69^b$ sous système labouré. Constatons aussi que, la teneur en $\text{Pi}_{\text{résine}}$ sous SCV ($9,47 \text{ mg P kg}^{-1}$) est importante par rapport à celui du labour ($4,82 \text{ mg P kg}^{-1}$). A T9, elle montre une différence significative entre les gestions du sol, avec $9,25 \pm 5,72^a$ sous SCV et $4,81 \pm 3,43^b$ sous système labouré. Constatons que, la teneur en $\text{Pi}_{\text{résine}}$ sous SCV ($9,25 \text{ mg P kg}^{-1}$) est importante par rapport au labour ($4,81 \text{ mg P kg}^{-1}$). Toutefois, donc, les effets du SCV et LB ne commencent à apparaître qu'à partir de T5 à T9.

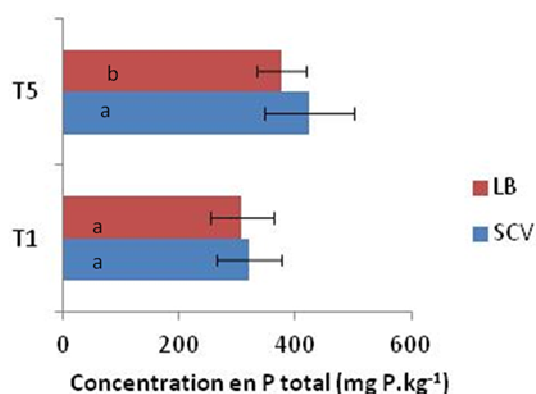


Figure 4-8 : Evolution des effets de SCV et LB sur P total de T1 à T5

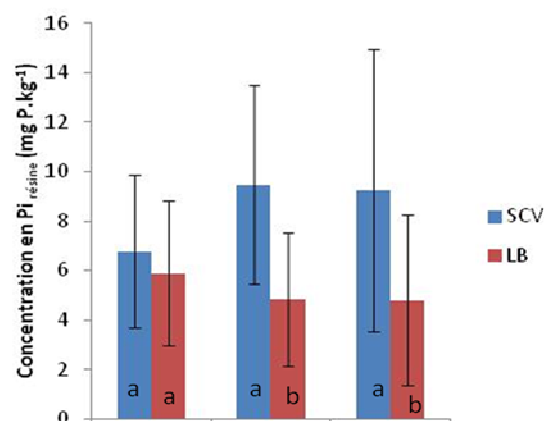


Figure 4-9 : Evolution des effets de SCV et LB sur $\text{Pi}_{\text{résine}}$ de T1 à T9

4.3.2.1 Sur Pi_{Olsen} et $Pi_{résine}$

La figure 4-10, présente l'évolution des effets de la fumure organique (Fu) et de la fertilisation mixte (apport organique + apports minéraux ou FM) sur Pi_{Olsen} de T1 à T5. A T1, les travaux du sol influent le Pi_{Olsen} , avec une moyenne et écartype de $11,29 \pm 3,64^b$ sous Fu et $13,16 \pm 4,89^a$ sous FM. Fu a une concentration de $11,29 \text{ mg P kg}^{-1}$ en Pi_{Olsen} , inférieure par rapport à la FM qui est de $13,16 \text{ mg P kg}^{-1}$. A T5, la fertilisation a un effet significatif sur la concentration en Pi_{Olsen} , avec une moyenne et écartype de $9,14 \pm 3,13^b$ sous Fu et $10,85 \pm 4,34^a$ sous FM. Constatons que, Fu présente une teneur $9,14 \text{ mg P kg}^{-1}$, qui est faible par rapport à celui du FM $10,85 \text{ mg P kg}^{-1}$. Par ailleurs, la teneur en Pi_{Olsen} s'est diminuée de T1 à T5.

La figure 4-11, présente l'évolution des différents effets entre Fu et FM de T1 à T9 dans le sol sur $Pi_{résine}$. A T1, la figure présente une différence significative entre les fertilisants, avec $5,63 \pm 2,79^b$ sous Fu et $7,02 \pm 3,09^a$ sous FM. Constatons également que, Fu présente une teneur de $5,63 \text{ mg P kg}^{-1}$, inférieur à la FM, avec $7,02 \text{ mg P kg}^{-1}$. A T5, on rencontre encore une différence significative entre les deux fertilisants, avec, $6,15 \pm 3,29^b$ sous Fu et $8,03 \pm 4,66^a$ sous FM. Par ailleurs, Fu se trouve à une concentration de $6,15 \text{ mg P kg}^{-1}$, moins importante par rapport à celui du FM ($8,03 \text{ mg P kg}^{-1}$). A T9, la figure montre également les effets de fertilisants sur la concentration en $Pi_{résine}$ du sol, avec $4,60 \pm 3,26^b$ sous Fu et $9,47 \pm 5,64^a$ sous FM. Remarquons que, Fu se trouve à une concentration de $4,60 \text{ mg P kg}^{-1}$, plus faible par rapport à celui du FM, avec $9,47 \text{ mg P kg}^{-1}$. Toutefois, on observe que l'effet du FM est plus important par rapport à celui du Fu.

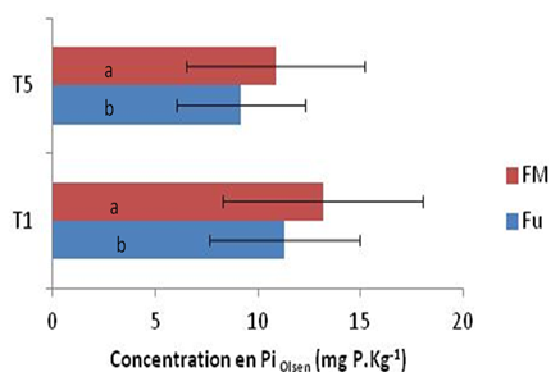


Figure 4-10 : Evolution des effets de la fertilisation sur Pi_{Olsen} de T1 à T5

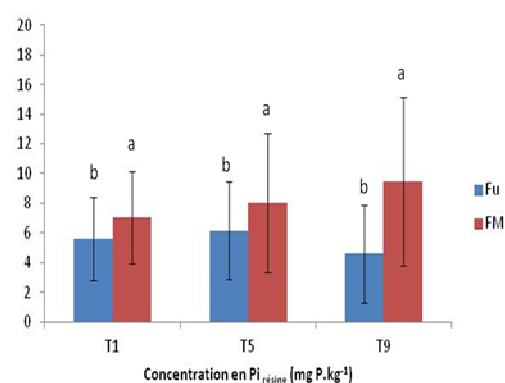


Figure 4-11 : Evolution des effets de la fertilisation sur $Pi_{résine}$ de T1 à T9

4.4 Comparaison sur la teneur en $Pi_{résine}$ entre les plantes légumineuses et le maïs

La figure 4-12 montre les effets de la gestion du sol sur $Pi_{résine}$ sur les parcelles de maïs et plantes légumineuses à T9. Au niveau du maïs, SCV est différent, avec $9,50 \pm 5,13^a$, de labour qui est de avec $4,59 \pm 3,24^b$. Constatons que, le SCV renferme $9,50 \text{ mg P kg}^{-1}$, plus important par rapport au labour, avec $4,59 \text{ mg P kg}^{-1}$ en $Pi_{résine}$.

Au niveau des plantes légumineuses, SCV, est encore différent, $8,20 \pm 5,12^a$, par rapport au labour, avec $4,82 \pm 2,35^b$. Remarquons que, le système SCV a une teneur importante, $8,20 \text{ mg P kg}^{-1}$, par rapport au labour, avec, $4,82 \text{ mg P kg}^{-1}$. On observe que l'effet du SCV sur le $Pi_{résine}$ est plus important par rapport au labour au niveau de ces plantes.

Voyons la figure 4-13, elle présente les effets de la fertilisation du sol sur $Pi_{résine}$ au niveau de maïs et plantes légumineuses. Au niveau du maïs, Fu est différent, avec $4,50 \pm 2,76^b$, de FM qui est de avec $9,58 \pm 5,32^a$. Constatons alors que, le Fu concentre moins de $Pi_{résine}$, avec $4,50 \text{ mg P kg}^{-1}$, par rapport à celui du FM qui est de $9,58 \text{ mg P kg}^{-1}$. Inversement sur les parcelles des plantes légumineuses, les fertilisants ne présentent aucune différence significative sur le $Pi_{résine}$, avec $6,05 \pm 4,41^a$ sous Fu et $6,92 \pm 4,17^a$ sous FM. Malgré que, Fu a une teneur $6,05 \text{ mg P kg}^{-1}$, faible par rapport à la FM qui est de $6,92 \text{ mg P kg}^{-1}$ en $Pi_{résine}$. Bref, l'effet de FM sur le $Pi_{résine}$ est plus important par rapport au Fu.

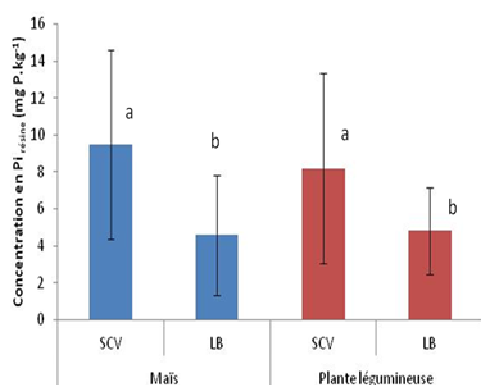


Figure 4-12 : Effet de SCV et LB sous des plantes légumineuses et de maïs sur le $Pi_{résine}$ du sol

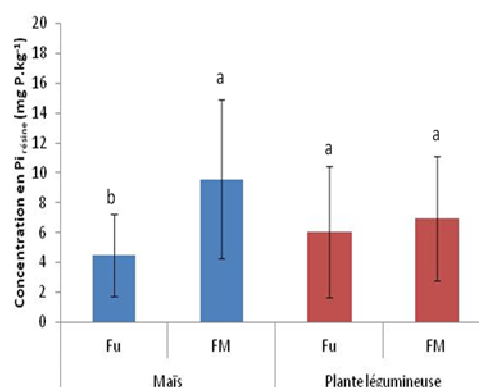


Figure 4-13 : Effet des Fu et FM sous des plantes légumineuses et de maïs sur le $Pi_{résine}$ du sol

CINQUIEME PARTIE : DISCUSSIONS, LIMITES et PERSPECTIVES

5.1 SUR LES RESULTATS ET LES HYPOTHESES

5.1.1 Hypothèse 1 : les systèmes culturaux (SCV-labour, apports de fumure organique et minérale, restitution organique à base de graminées et légumineuse) influent sur les formes et les quantités du P disponible ou labile dans le sol

Le phosphore du sol subit de multiples transformations et passe entre les différents compartiments minéraux, organiques et microbiens. Les systèmes cultivés peuvent affecter ces flux. D'une part, le mode de gestion du sol peut affecter la distribution du P dans le profil de sol. Le labour, par son action de retournement, a tendance à enfouir le P dans l'ensemble de l'horizon travaillé. Le SCV, au contraire, favorise une accumulation en surface du P restitué au sol par les résidus de culture ou par les apports fertilisants. En effet, le P, du fait de sa forte rétention n'est pas mobile dans le profil de sol et les transferts par lixiviation sont généralement nuls, contrairement à ce qui peut-être observé pour d'autres anions, notamment le nitrate (Oliveira *et al.*, 2011). Ces systèmes de culture, qui affectent la distribution et la dynamique du C (Razafimbelo, 2005) sont donc également susceptibles d'affecter la dynamique du P (Haynes et Mokolobate, 2001). D'autre part, les plantes cultivées et les plantes de couverture associées sont également susceptibles d'affecter la dynamique du P. Divers processus racinaires peuvent agir sur la dynamique du P (Hinsinger, 2001). En particulier, les légumineuses sont connues pour affecter le pH du sol et modifier la disponibilité du P (Somado *et al.*, 2007; Andriamaniraka, 2011). Enfin, il est bien évident que le mode de fertilisation et les quantités de P apportées au sol selon les diverses modalités de gestion peuvent affecter le stock de P total et les quantités de P plus ou moins labile.

Les analyses de variances réalisées (Tableau 3-1, 3-3 et 3-5) montrent des résultats divergents en fonctions des variables étudiées et en fonction de la durée de l'étude.

Aucun effet n'a été observé sur les teneurs en $Pi_{\text{hydrosoluble}}$. Cette absence d'effet peut être reliée au fait que les teneurs mesurées sont très faibles (entre 0 et $0,2 \text{ mg P kg}^{-1}$ pour T1 et T5) et surtout que les écart-types sont importants (entre $0,02$ et $0,005 \text{ mg P kg}^{-1}$ pour T1 ; $0,03$ à $0,04 \text{ mg P kg}^{-1}$ pour T5), en général plus élevés que les moyennes elle-même ($0,04 \text{ mg P kg}^{-1}$ pour T1; $0,03 \text{ mg P kg}^{-1}$ pour T5). Ces faibles teneurs sont classiques dans les sols tropicaux. En effet, la valeur des ions dissouts dans les suspensions de terre malgache varie de $0,005 \text{ mg L}^{-1}$ (pour les sols ferrallitiques sur socle cristallin) à $0,05 \text{ mg L}^{-1}$ (pour les sols ferrallitiques sur dépôts fluviolacustres) (Rabeharisoa, 2004). Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles obtenues dans d'autres sols ferrallitiques comme les Oxisols de Colombie qui sont de $0,008 \text{ mg L}^{-1}$ (Bülher *et al.*, 2003 ; Masson *et al.*, 2001). Lors d'une étude réalisée sur le même site par Andriamaniraka (2009), utilisant les cinétiques

d'échange isotopiques, les valeurs des ions dissouts varient de 0,004 à 0,024 mg L⁻¹. Nous pouvons donc en conclure, d'après nos résultats et ceux Andriamaniraka (2009), que la détermination des teneurs en Pi_{hydro}, bien qu'elle représente la fraction réellement assimilable par les plantes, est peu adaptée pour mettre en évidence des effets contrastés des systèmes de culture, à cause de la variabilité de la teneur des ions dissouts dans la solution du sol.

Les extractions visant à quantifier les teneurs en Pi disponible ou labile (Pi_{résine}, Pi_{Olsen}) se sont révélées efficaces pour montrer les effets des divers traitements, avec des différences significatives dès T1. La disponibilité du P ne semble pas affectée par le type de culture (riz ou maïs en association avec graminées ou légumineuses). Contrairement aux résultats de, Andriamananjra (2011), qui avait mis en évidence un effet positif du voandzou, une légumineuse à graine, sur le riz, nos résultats ne permettent pas de montrer des effets similaires du haricot ou du soja, dans l'essai analysé. Il faut noter que les effets des plantes peuvent être marqués au niveau rhizosphérique (Hinsinger, 2001), mais nos analyses, réalisées sur le sol total (*bulk soil*), ne permettent pas de mettre en évidence des différences. Par contre, la disponibilité du P est significativement modifiée à la fois par le système de culture et la fertilisation. Ces effets seront discutés en détails dans les deux parties suivantes de la discussion.

La teneur en Po (Po_{Olsen}), qui sont en moyenne de 10,6 mg P kg⁻¹ représentent 48,2% du P Olsen total. Ces valeurs sont largement supérieures que celles déterminées par Turner (2006) dans divers sols rizicultivés de Madagascar (6 à 28%) ou par Chapuis-Lardy *et al.* (2001) dans des Ferralsols sous pâturage des savanes brésiliennes (21 à 46%). Les teneurs en Po_{Olsen} semblent assez peu affectées par les pratiques. Un effet significatif du mode de gestion du sol a été observé à T1, mais cet effet n'a pas été observé à nouveau à T5. De plus, lors de la mise en place de l'essai, l'ensemble de la parcelle a été labouré, y compris les parcelles laissées en SCV depuis lors. Par conséquent, l'effet du mode de gestion du sol que nous observons à T1 n'est pas expliqué. Néanmoins, il serait intéressant de vérifier si des effets apparaissent au bout de 9 années de culture (T9), ce que nous n'avons pas pu faire, faute de temps. En effet, nous faisons l'hypothèse que le Po joue un rôle important dans la dynamique du P dans ces sols très fixateur de P.

Les teneurs moyennes de P total ont été augmentés, suite aux divers apports de fumiers et d'engrais minéraux, passant en moyenne de 314 mg P kg⁻¹ à T1 à 399 mg P kg⁻¹ à T5. La fumure mixte induit une augmentation de l'ordre de 25 mg kg⁻¹ (412 vs 387 mg P kg⁻¹) de la teneur en P_{tot}. Cette augmentation, liée aux apports supplémentaires de P apportés sur FM, n'est cependant pas significative. Considérant une densité apparente d'environ 0,8, un apport de 300 kg ha⁻¹ NPK (11-22-16) sur l'horizon 0-5 cm, soit un apport annuel de 28,8 kg de P ha⁻¹, devrait induire une augmentation de la teneur en P_{tot} d'environ 70 mg P kg⁻¹ ha⁻¹

an⁻¹, ou de 280 mg P kg⁻¹ ha⁻¹ pour les 4 ans entre T1 et T5. Par conséquent, seule une petite fraction (17%) de l'apport supplémentaire apporté par FM est retrouvée dans le sol. Une augmentation significative a aussi été constatée sous l'effet du système SCV, avec une différence de 48 mg kg⁻¹ (424 vs 376 mg P kg⁻¹). Cette différence est attribuée à la répartition du P dans le profil de sol, le P s'accumulant en surface sous SCV, alors qu'une partie est incorporée entre 5 et 15 cm de profondeur par le labour. Un bilan global des entrées-sorties (exportation par les cultures) est donc nécessaire pour analyser plus correctement les flux de P_{tot} dans ces systèmes.

En conclusion, l'hypothèse 1 a été partiellement validée avec (i) des effets de la gestion du sol et la fertilisation ; (ii) sur les variables concernant les teneurs en P total (P_{tot}) et les teneurs en P disponible ou labile (P_{i résine}, P_{i Olsen}).

5.1.2 Hypothèse 2 : les matières organiques, issues d'apports exogènes (fumiers...) ou des résidus de culture ont des effets bénéfiques sur la disponibilité du phosphore, en particulier en augmentant les quantités de phosphore organique labile des sols

Les effets positifs de la matière organique sur la disponibilité du P pour les plantes sont largement reconnus (Saunders, 1965 ; Rabeharisoa, 2004 ; Andriamananjara, 2011). Deux mécanismes majeurs peuvent expliquer ces effets bénéfiques. D'une part, il peut y avoir un effet direct, suite à l'apport de P organique. La minéralisation des apports organiques est une source de P_i, ce dernier pouvant soit être prélevé par les plantes, soit se fixer sur les surfaces d'échange du sol. D'autre part, un effet indirect peut intervenir, du fait de la modification des propriétés de surface des sols (Othieno, 1973; Perrott *et al.*, 1990; Ball-Coello *et al.*, 1993 ; Afif *et al.*, 1995 ; Parmar et Sharma, 1996 ; Chen *et al.*, 2000). Les produits organiques (substances humiques, acides organiques) produits lors de la décomposition des résidus de récolte, peuvent conduire à la formation de complexes avec Al et Fe et ainsi diminuer le potentiel d'adsorption du P (Iyamuremye *et al.*, 1996b; Haynes et Mokolobate, 2001; Akthar *et al.*, 2002, Mkhabela et Warman, 2005). De plus, les modifications du pH lors de l'accumulation de la matière organique (processus acidifiant) (Sumner et Farina, 1986 ; Mokolobate et Haynes, 2001) ou lors de sa minéralisation (processus alcalinisant) peuvent induire des modifications des charges de surface et donc de la disponibilité de P dans le sol. Les effets de ces divers mécanismes sont toutefois difficiles à distinguer à travers l'étude menée.

L'apport de matière organique (Fu) se traduit par une augmentation importante, de l'ordre de 78,2 mg P kg⁻¹, des teneurs en P total entre T1 et T5, démontrant que le fumier est une source importante de P. Toutefois, l'étude diachronique ne permet pas de mettre en évidence des effets très importants de l'apport de fumier. Les teneurs en P_{i résine} augmentent faiblement au cours du temps, passant en moyenne de 5,6 à 6,2 mg P kg⁻¹ entre T1 et T5 pour Fu. On constate même, à l'inverse que les teneurs en P_{i Olsen} diminuent légèrement, de

11,3 à 9,1 mg P kg⁻¹ entre T1 et T5. Par conséquent, l'apport de fumier ne semble pas avoir un effet très marqué sur les teneurs en P_i disponible ou labile. Néanmoins, il serait nécessaire d'avoir des résultats sur la disponibilité du P du sol avant sa mise en culture (T0).

Un effet bénéfique de la fumure mixte, organo-minérale (FM) a toutefois été observé. Cet effet démontre l'efficacité de la fertilisation. Mais, les conditions expérimentales ne permettent pas de tirer des conclusions définitives puisque le traitement FM est susceptible de correspondre à une combinaison d'effets. Tout d'abord, l'absence de traitement minéral simple dans cet essai ne permet pas de conclure sur l'effet bénéfique de la matière organique par rapport à un apport minéral. Les essais menés à Madagascar sur des sols ferrallitiques ont montré la supériorité du traitement exclusivement minéral (TSP) comparé au traitement organique en termes de teneur en P disponible. Toutefois, l'apport organique a permis d'améliorer l'efficacité des fertilisants minéral (TSP) sur le P Olsen, P résine dans un système de fertilisation combiné organo-minéral. Par ailleurs, Andriamananjara (2011) montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre une fertilisation mixte à une fertilisation minérale (TSP). De plus, le traitement mixte (FM) combine un apport de 500 kg ha⁻¹ an⁻¹ de dolomie. La dolomie induit généralement une augmentation du pH du sol (Lopez-Hernandez *et al.*, 1974 ; Martini, 1974 ; Rabeharisoa, 2004), cette dernière affectant les charges de surface de ces sols à charges variables. Ceci se traduit en général par une réduction des charges positives et par conséquent par une diminution de la sorption des ions phosphates qui deviennent plus disponibles. Le chaulage peut en effet considérablement diminuer l'adsorption des anions orthophosphate (Lopez-Hernandez et Burnham, 1974).

Les résultats obtenus au cours de l'étude ne permettent pas non plus de mettre en évidence une augmentation des teneurs en P_o labile (P_o Olsen). Toutefois, il serait également nécessaire de pouvoir comparer les résultats obtenus à ceux du sol avant la mise en place de l'essai (T0).

L'hypothèse 2 est donc validée uniquement sur la fertilisation mixte correspondant à l'apport de 5 t ha⁻¹ de fumier, 500 kg ha⁻¹ dolomie, 300 kg ha⁻¹ NPK (11-22-16) et 100 kg ha⁻¹ urée par rapport à la fumure organique qui n'apporte que 5 t ha⁻¹ apporté au sol. Dans ce cas, c'est plutôt l'ensemble du système de culture qui présente des effets bénéfiques.

5.1.3 Hypothèse 3 : les travaux du sol (SCV – labour) ont un impact sur la disponibilité du P dans le sol

Le SCV présente un effet positif sur la quantité des ions phosphates dans le sol par rapport au labour. Cet effet est particulièrement marqué pour le P_i résine. Alors que les teneurs ne sont pas significativement différentes à T1, ce qui est normal puisque l'ensemble du dispositif a été labouré avant la mise en place de l'expérimentation, on observe une différence très significative entre les deux traitements à T5, avec des teneurs respectives de 4,8 mg P kg⁻¹ sous labour et 9,5 mg P kg⁻¹ sous SCV. Il est à noter que cette différence entre

les deux modes de gestion reste inchangée à T9. Les différences de teneurs entre le SCV et le LB sont essentiellement attribuées à une biomasse restituée au sol plus importante sous SCV (résidus aériens et racinaires, plante de couverture éventuelle) que sous LB (racines seules) (Razafimbelo, 2005). De plus, il a été montré récemment que le SCV limitait à la fois la sorption du P inorganique et du P organique sur les constituants du sol (Pavinato *et al.*, 2010), ce qui favorise également l'augmentation de la disponibilité du Pi pour les plantes. Par contre, notre étude est encore limitée à l'analyse de l'horizon de surface 0-5 cm. L'incorporation de la matière organique sur une profondeur d'environ 15 cm lors du labour pourrait également expliquer la large différence observée entre les deux modes de gestion du sol.

Des teneurs significativement plus élevées ont aussi été observées sous SCV par rapport au labour dans le cas de l'extraction Olsen (Pi_{Olsen}), avec $14,1 \text{ mg P kg}^{-1}$ sous SCV et $10,4 \text{ mg P kg}^{-1}$ sous labour pour T1 et $11,44 \text{ mg P kg}^{-1}$ sous SCV et $8,6 \text{ mg P kg}^{-1}$ sous labour, pour T5. Cependant, cette observation peut être faite dès la première année (T1), alors que l'ensemble de la parcelle avait été labourée avant la mise en place de l'expérimentation, ce qui rend peu fiable cette observation. Pour ce qui concerne le Po_{Olsen} , aucune différence significative n'a donc été observée entre les deux modes de gestion du sol à T5.

L'hypothèse 3 est donc validée pour ce qui concerne le P inorganique. Il est à noter que l'extraction par une résine échangeuse d'ions s'est révélée particulièrement efficace pour mettre en évidence cette différence, alors que ce n'est pas le cas pour l'extraction Olsen. Toutefois, la méthode P Olsen ne reflète que partiellement la biodisponibilité de P dans le sol étant donné qu'elle quantifie non seulement le phosphore assimilable ou la forme échangeable mais également des formes plus fortement retenues par les constituants du sol, limitant ainsi l'efficacité de la méthode Olsen dans l'évaluation de la biodisponibilité de P sous culture (Fardeau et Jappe, 1988 ; Rabeharisoa, 2004 ; Andriamananjara, 2011).

5.2 Limites de l'étude et perspectives

Etant donné qu'il s'agit ici d'une étude diachronique, l'évolution des systèmes culturels, la reconstitution de la fertilité du sol et sa gestion de façon durable doivent donc être observées par rapport à l'état initial, avant l'installation des divers traitements, afin qu'on puisse suivre convenablement l'évolution des teneurs de P total ou disponible, pendant la période d'expérimentation. Il semble, par conséquent, nécessaire de compléter l'étude par l'analyse de quelques échantillons prélevés avant la mise en place du dispositif expérimental (T0).

Cette étude a été centrée sur l'analyse de l'horizon 0-5 cm, du fait de la concentration des nutriments, notamment du P dans cet horizon. Ceci nous a permis de mettre en évidence des différences marquées entre les modes de gestion du sol. Néanmoins, il serait utile de poursuivre l'étude par une étude des horizons correspondant à l'ensemble du profil labouré

(environ 20cm). En effet, l'amélioration de la disponibilité du P sous SCV en surface peut être contrebalancée, sous labour, par une augmentation de sa disponibilité dans les horizons sous jacents du fait de l'enfouissement de la matière organiques et des fertilisants ou amendements apportés.

Il serait également nécessaire de comparer les apports de P aux exportations par les plantes afin de faire un bilan entrée-sorties et de relier ces données à la productivité des cultures.

Pour finir, il serait nécessaire de comparer les évaluations de la disponibilité du P, effectuées par des extractions chimiques, à la biodisponibilité réelle, c'est-à-dire à la minéralomasse de P accumulée par les plantes à la récolte.

CONCLUSION

Face à la nécessité d'augmenter la production agricole, le défi pour améliorer la fertilité des sols de *tanety* fragiles, acides, déficients en éléments nutritifs est lancé. Les sols de *tanety* des Hautes Terres malgaches doivent faire l'objet d'études complémentaires pour répondre à ce défi.

Au cours de cette étude, la vulnérabilité par rapport à la disponibilité du phosphore dans le sol et le faible stock en matières organiques dans les Ferralsols ont conduit à la problématique de l'évolution de la disponibilité et des formes du P du sol à long terme. Des notions sur les sols ferrallitiques, sur la dynamique du P dans le sol et le contrôle de sa disponibilité et sur l'importance des systèmes cultureux ont été rappelées afin de mieux cerner théoriquement le sujet.

Différentes doses d'apport de fertilisants, sous forme organique et mixte ont été testé sur deux types de systèmes : le système SCV par rapport à la méthode conventionnelle avec labour.

Les résultats montrent, d'une part, que la fertilisation mixte induit une augmentation de la concentration du P_i disponible par rapport à la fertilisation uniquement à base de fumier de ferme. D'autre part, le système SCV induit une augmentation de la teneur en P total, et a un effet favorable sur la disponibilité du P dans le sol, par rapport au labour.

Ainsi, la première hypothèse, qui propose que les systèmes cultureux ont des effets sur la disponibilité du P dans le sol, a été confirmée en partie sur les effets de la fertilisation et gestion du sol pour les variables concernant les teneurs en P total (P_{tot}) et les teneurs en P disponible ou labile ($P_{i\text{ résine}}$, $P_{i\text{ Olsen}}$). Les seconde et troisième hypothèses ont été validées pour les variables P_i inorganique ($P_{i\text{ résine}}$, $P_{i\text{ Olsen}}$). Toutefois, la seconde hypothèse n'est pas validée pour ce qui concerne les teneurs en P organique ($P_{o\text{ Olsen}}$) et total. Par ailleurs, la troisième hypothèse suggère que les travaux de culture ont un impact sur la teneur total de P dans le sol.

Le présent mémoire constitue une étape pour l'étude de l'évolution du P et de sa disponibilité dans le sol. Toutefois, sachant que le coût de la fertilisation minérale est élevé pour les paysans dans le contexte de l'agriculture familiale, des travaux doivent être poursuivis pour mieux comprendre les effets de diverses pratiques utilisées en agriculture de conservation. En particulier, l'introduction de légumineuses dans les systèmes céréales-légumineuses nécessite davantage d'investigation dans l'avenir, même si dans nos conditions expérimentales, nous n'avons pas été en mesure de démontrer un effet positif de leur introduction sur la disponibilité du P.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Achat, D. (2009). *Biodisponibilité du phosphore dans les sols Landais pour les peuplements forestiers de pin maritimes*. Université de Bordeaux 1, p. 291.

Achat, D., Bakker, M., Zeller, B., Bienaimé, S., et Morel, C. (2010). *Long-term organic phosphorus mineralization in Spodosols under forests and its relation to carbon and nitrogen mineralization*. Soil Biology and Biochemistry 42. Contents lists available at Science Direct. ELSEVIER. 1479-1490 p.

Afif, E., Barron, V., et Torrent, J. (1995). *Organic matter delays but does not prevent phosphate sorption by cerrado soils from Brazil*. Soil Sci., 159:207-211.

Agbenin, J., et H., Tiessen. (1995). *Phosphorus sorption at field capacity and soil ionic strength: kinetics and transformation*. Soil Science Society of America Journal 59, 998-1005.

Akthar, M., Mccallister, D., et Eskridge, K. (2002). *Availability and fractionation of phosphorus in sewerage sludge-amended soils*. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 33 (13 et 14): 2057-2068.

Andriamahady, R. (1980). *Méthodologie comparée d'analyses du phosphore du sol. Application à un essai de fertilisation*. Mémoire de DEA, option Agronomie. Université de Madagascar. 69 p.

Andriamananjara, A. (2011). *Système de culture à rotation Vouandzou - Riz Pluvial (ORYZA SATIVA) sur les Hautes Terres de Madagascar. Rôle du Vouandzou (VIGNA SUBTERRANEA) sur la biodisponibilité du phosphore dans les ferralsols*. Présentée pour l'obtention de diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques. Université d'Antananarivo - Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA) de Madagascar. 186 p.

Andriamaniraka, J. H. (2009). *Etude de modélisation du phosphore dans un sol cultivé de Madagascar en fonction des pratiques culturales*. Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques. Université d'Antananarivo - ESSA. 186 p.

Appelt, H., Coleman, N., et Pratt, P. (1975). *Interactions between organic compounds, minerals, and ions in volcanic-ash-derived soils. II. Effects of organic compounds on the adsorption of phosphate*. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 39:628-630.

Aubert, G. (1965). *Classification des sols: Tableaux des classes, sous classes, groupes et sous groupes, utilisés par la section de pédologie de l'ORSTOM*. Cah. ORSTOM. Sériz Pédol., III. 269-288 p.

Aubert, G., et Segalen, P. (1966). *Projet de classification des sols ferrallitiques*. Cah. ORSTOM. Série Pédol., IV. 97-112.

Ball-Coelho, B., Salcedo, I., Tiessen, H., et Stewart, J. (1993). *Short and long term phosphorus dynamics in a fertilised Ultisol under sugarcane*. Soil Science Society of America Journal 57, 1027-1034.

Beckett, P., et White, R. (1964). *Studies on the phosphate potentials of soils. Part III: The pool of labile inorganic phosphate*. Plant and Soil 21, 253-282.

Becquer, T. (2005). *Sources et dynamique des métaux dans les sols développés sur massifs ultramafiques de Nouvelle-Calédonie*. Habilitation à Diriger les Recherches, Université de Nancy I., 16 septembre 2005, 202p.

Bertol, I., Engel, F., Mafra, A., Bertol, O., et Ritter, S. (2007). *Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff water and sediments under different soil tillage systems during soybean growth*. Soil and Tillage Research 94, 142-150.

Blanchart E., Bernoux M., Sarda X., Siqueira Neto M., Cerri C.C., Piccolo M., Douzet J.M., Scopel E., Feller C., 2007. Effect of direct seeding mulch-based systems on soil carbon storage and macro-fauna in Central Brazil. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 72 (1): 81-87.

Blanchart, E., Bernoux, M., Sarda, X., Siquiera Neto, M., Cerri, C., Piccolo, M., et al. (2007). *Effect of direct seeding mulch-based systems on soil storage and macro-fauna in Central Brazil*. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 72 (1):81-87.

Bolan, N., Naidu, R., Mahimairaja, S., et Baskaran, S. (1994). *Influence of low molecular weight organic acids on the solubilisation of phosphates*. . Biology and Fertility of Soils 18, 311-319.

- Borggaard, O. (1983). *The influence of iron oxides on phosphate adsorption by soil*. J. Soil Sci., 34: 333-341 p.
- Bourgeat, F. (1970). *Contribution de l'étude des sols sur socle ancien de Madagascar. Types de différenciation et interprétation chronologique sur cours du quaternaire*. Thèse Strasbourg. Publ. prov. ronéo ORSTOM. 310 P.
- Bruntland, G. H. (1987). *Rapport bruntland: Un défi mondial*. Oslo, le 20 mars 1987. 349 p.
- Bühler, S., Oberson, A., Sinaj, S., Friesen, D., et Frossard, E. (2003). *Isotope methods for assessing plant available phosphorus in acid tropical soils*. European J. Soil Sci. 54: 605-616.
- Bünemann, E. (2003). *Phosphorus dynamics in a Ferralsol under maize-fallow rotations: The role of the soil microbial biomass*. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland. p 154.
- Buol, S. W., et Eswaran, H. (2002). *Oxisols*. ADV.Agron., n°: 68: 152-195.
- Campbell, C., Schnitzer, M., Stewart, J., Biderbeck, V., et Selles, F. (1986). *Effect of manure and fertilizer on properties of a black Chernozem in southern Saskatchewan*. Can. J. Soil Sci., 66:601-613 p.
- Chapuis-Lardy, L., Brossard, M., et Quiquampoix, H. (2001). *Assessing organic phosphorus status of Cerrado oxisols (Brazil) using ³¹P-NMR spectroscopy and phosphomonoesterase activity measurement*. Laboratoire d'Ecologie des Sols Tropicaux, IRD, France - IRD/Embrapa Cerrados - UMR Sol et Environnement, INRA-ENSAM. Can. J. Soil Sci. 81: 591-601.
- Chapuis-Lardy, L., Ramiandrisoa, R., Randriamantsoa, L., Morel, C., Rabeharisoa, L., et Blanchart, E. (2009). *Modification of P availability by endogeic earthworms (Glossoscolecidae) in Ferralsols of the Malagasy highlands*. Biological Fertilizations Soils 45, 415-422.
- Chatelin, Y. (1974). *Les sols ferrallitiques: l'altération*. 24, 1-144.
- Chen, G., He, Z., et Huang, C. (2000). *Microbial biomass phosphorus and its significance in predicting phosphorus availability in red soils*. Communication in Soil Science and Plant Analysis 31, 655-667.
- Corbeels M., Scopel E., Cardoso A., Bernoux M., Douzet J.M., Siqueira Neto M. 2006. *Soil carbon storage potential of direct seeding mulch-based cropping systems in the Cerrados of Brazil*. Global Change Biology. 12, 1773-1787. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01233.x
- Corre, N., Simon, J., et Boucaud, J. (1997). *Enfouissement des légumineuses: quel devenir pour la culture suivante?* Perspectives Agricoles, 230:62-69.
- Cross, A. F., et Schlesinger, W. H. (1995). *A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems*. ELSEVIER. Geoderma 64:197-214.
- Dabin, B. (1971). *Evolution des engrais phosphatés dans un sol ferrallitique dans un essai de longue durée*. Phosphore et agriculture, n°59. 1-14 p.
- Dalton, J., et Russell, G. (1952). *Effects of organic matter on phosphate availability*. Soil Sci. 73: pp 173-181.
- Delenne, M., et Peletier, F. (1981). *Carte du potentiel des unités physiques au 1:1 000 000*. ORSTOM. Bandy, France.
- ENWEZOR, W. O. (1976). *The mineralization of nitrogen and phosphorus in organic materials of varying C:N and C:P ratios*. Department of Soil Science University of Nigeria, Nsukka. Ms. 2747. Plant and Soil 44, 237-240.
- Fallavier, P. (1996). *Physico-chimie des sols tropicaux acides*. In : Pichot J., Sibelet N., Lacoëuilhe J.J. (eds.). Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides. Montpellier, France, CIRAD. pp. 23-39.
- Fardeau, J., et Conesa, A. (1994). *Le phosphore*. Dans: Bonneau et Souchier, Pédologie vol 2. Constituants et propriétés du sol. Masson. 557 - 568 p.
- Fardeau, J., et Jappe, J. (1988). *Valeurs caractéristiques des cinétiques de dilution isotopique des ions phosphates des systèmes sol-solution*. In: Gachon, L. (Ed.), Phosphore et potassium dans les relations sol-plante : conséquence. 78-99. nce sur la fertilisation. INRA, Paris. pp 78-79.
- Fontes, M., et Weed, S. (1996). *Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy*. Departamento de Solos. Universidade Federal de Viçosa. 36570-000 Viçosa. MG,

- Brazil - Soil Science Department, North Carolina State University. Raleigh. NC 27695-7619. USA. Geoderma, ELSEVIER 72. 37-51.
- Fox, T., et Comeford, N. (1992). *Influence of oxalate loading of phosphorus and aluminium solubility in Spodosols*. Soil Science Society of America Journal 56, 290-294.
- Fox, T., et Comerford, N. (1990). *Low molecular weight organic acids in selected forest soils of southeastern USA*. Soil Science Study of America Journal 54, 1139-1144.
- Freeman, J., et Rowell, D. (1981). *The adsorption and precipitation of phosphate onto calcite*. J. Soil Sci., 32. 75-841 p.
- Frossard, E., Julien, P., Neyroud, J.-A., et Sinaj, S. (2004). *Le phosphore dans les sols-Etat de la situation en Suisse. Le phosphore dans les sols, les engrais; les cultures et l'environnement*. Cahier de l'environnement n°368. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Berne, Suisse. 180 p.
- Gallez, A., Juo, A., et Herbillon, A. (1976). *Surface and charge characteristics of soils in the tropics*. Soil Sci., Soc. Am. J., 40 (4):601-608.
- Giardini, L., et Pimpini, F. (1992). *Effects of poultry manure and mineral fertilizers on the yield of crop*. J. Agric. Sci. 118: pp 207-213.
- Giller, K., et Wilson, K. (1991). *Nitrogen Fixation in Tropical Cropping Systems*. CAB International.
- Gorbunov, N., Deyadevich, G., et Tunik, B. (1961). *Methods of determining non silicate amorphous and crystalline sesquioxides in soils and clays*. Soviet Soil Sci. 1252-1259 p.
- Griffin, R., et Jurinak, J. (1973). *The interaction of phosphate with calcite*. Soil Sci. Soc Am. Proc., 37547-850.
- Guppy, C., Menzies, N., Moody, P., et Blamey, F. (2005). *Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review*. The University of New England, Armidale - the University of Queensland, Brisbane - Queensland Department of Natural Resources, Mines and Energy, Brisbane. Australian Journal of Soil Research. 43, 189 - 202.
- Haynes, R., et Mokolobate, M. (2001). *Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved*. Nutrient Cycling in Agroecosystems. Academic Publishers. Printed in the Netherlands. 59: 47-63 p.
- Heng, L. (1989). *Influence of some humic substances on P-sorption in some Malaysian soils under rubber*. Journal of Natural Rubber Research 4, 186-194.
- Hinsinger, P. (2001). *Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review*. Plant and Soil 237, 173-195.
- Hinsinger, P., Jaillard, B., Le Cadre, E., et Plassard, C. (2007). *Spéciation et biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère "Speciation and bioavailability of phosphorus in the rhizosphere"*. Océanis 33, 37-50.
- Holford, I. (1997). *Soil phosphorus: its measurement and its uptake by plants*. Australian Journal of Soil Research 23, 417-427.
- Horst, W., Kamh, M., Jibrin, J., et Chude, V. (2001). *Agronomic measures for increasing P availability to crops*. Plant and Soil 237, 211-223.
- Huang, P., et Violante, A. (1986). *Influence of organic acids on crystallization and surface properties of precipitation products on aluminium*. In: *Interactions of soil minerals with natural organics and microbes*. Huang and Schnitzer ED., Proceeding SSSA, 15-16 Aug. 1983.
- Hue, N. (1991). *Effects of organic acid anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies*. Soil Sci., 152:463-471.
- IPCC. (2006). *Agriculture, Forestry and Other Land Use*. In: Simon Eggleston, L.B., Kyoko Miwa, Todd Ngara and Kiyoto Tanabe (Ed.), Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Japan.
- IUSS- WRB, 2006. *World reference base for soil resources*. a framework for international classification, correlation and communication, 2nd ed. World Soil Resources Reports, 103, FAO, Roma, Italy, 145 p.

- Iyamuremye, F., et Dick, R. (1996). *Organic amendments and phosphorus sorption by soils*. Advances in Agronomy 56: pp 139-185.
- Iyamuremye, F., Dick, R., et Baham, J. (1996b). *Organic amendments and phosphorus dynamics: I. Phosphorus chemistry and sorption*. J. Soil Sci. 161, 426-435.
- John, M. (1970). *Colorimetric determination of phosphorus in soil and plant materials with ascorbic acid*. Soil Science. 109:214-220 p.
- Larsen, S. (1967). *Isolonic exchange of phosphate in paddy soils*. Plant Soil 27. 401-407 p.
- Larsen, S. (1967). *Soil phosphorus*. Adv. Agron., n° 19. 151-210.
- Legros, J. (2007). *Les grands sols du monde*. Presse Polytechnique et Universitaires Romandes.
- Linguist, B., Singleton, P., Yost, R., et Cassman, K., 1997. *Aggregate size effects on the sorption and release of phosphorus in an ultisol*. Soil Science Society of America Journal 61, 160-16.
- Lopez-Hernandez, D., Flores, D., Siegert, G., et Rodriguez, J. (1979). *The effect of some organic anions on phosphate removal from acid and calcareous soils*. Soil Science 128, 321-206.
- Lopez-Hernandez, I., et Burnham, C. (1974). *The covariance of phosphate sorption with other soil properties in some British and tropical soils*. J. Soil Sci., 25:196-206.
- Mafongoya, P., Bationo, A., Kihara, J., et Waswa, B. (2006). *Appropriate technologies to replenish soil fertility in southern Africa*. Nutr Cycl Agroecosyst 76:137–151.
- Martin, E., et Morel, C. (2002). *Détermination du flux des ions phosphates transférés entre le sol et la solution: évaluation par la méthode de traçage des ions P en solution et de l'analyse de leur dilution isotopique dans une suspension de sol à l'état stationnaire*. et par le dosage des ions P en solution. Protocole d'analyse au laboratoire (Document interne: communication personnelle).
- Martini, J., Kochhann, R., Siqueira, O., et Bockert, C. (1974). *Response of soybeans as related to soil acidity, Al and Mn toxicities, and P in some Oxisols of Brazil*. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 38:616-620.
- Masson, P., et Gintzburger, G. (2001). *Les légumineuses fourragères dans les systèmes de production méditerranéens: utilisations alternatives* ENSAT, Av. de l'Agrobiopole, BP 107 Auzeville, Castanet Tolosan, F-31326. INRA (Science du Sol), Place Viala, Montpellier F-34060. 12 p.
- McLaughlin, J., Ryden, J., et Syers, J. (1981). *Sorption of inorganic phosphate by iron and aluminium containing components*. J. Soil Sci., 32. 365-377 p.
- McLaughlin, M., Lancaster, P., Sale, P., Uren, N., et Peverill, K. (1993). *Use of cation/anion exchange membranes for multi-element testing of acidic soils*. School of Agriculture, La Trobe University, Bundoora - CSIRO Division of Soils, Adelaide - State Chemistry Laboratory, Dept. Agric., East Melbourne. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. 4 p.
- Michellon, R., Razanapary, C., Moussa, N., Andrianasolo, H., Fara Hanitriniaina, J., Razakamanantoanina, R., et al. (2004). *Rapport de campagne 2002-2003 Hautes Terres et Moyen Ouest*. 98 p.
- Mkhabela, M., et Warman, P. (2005). *The influence of municipal solid waste compost on yield, soil phosphorus availability and uptake by two vegetable crops grown in a Pugwash sandy loam soil in Nova Scotia*. Agric. Ecosys. Environ. 106: 57-67.
- Morel, C. (2002). *Caractérisation de la phytodisponibilité du phosphore du sol par la modélisation du transfert des ions phosphatés entre le sol et la solution*. Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme d'habilitation à Diriger des Recherches (HDR)- Institut National Polytechnique de Lorraine. INRA-Bordeaux. 91 p.
- Morel, C., Le Clech, B., Linères, M., et Pellerin, S. (2006). *Gare à la baisse de la biodisponibilité du phosphore*. Alter Agri. N° 79. 3 p.
- Morel, C., Tunney, H., Plenet, D., et Pellerin, S. (2000). *Transfer of phosphate ions between soil and solution. Perspectives in soil testing*. Journal of environmental quality, 29. 50-59 p.
- Moshi, A., Wild, A., et Greenland, D. (1974). *Effect of organic matter on the charge and phosphate adsorption characteristics of Kikuyu red clay from Kenya*. Geoderma, 11/275-285.

- Nordblom, T., Pannell, D., Christiansen, S., Nersoyan, N., et Bahhady, F. (1994). *From weed to wealth? prospects for medic pastures in the Mediterranean farming system of north-west Syria*. Agricultural Economics. 11: 29-42.
- Obaid-ur-Rehman, Zaka, M., Rafa, H., et Hassan, N. (2006). *Effect of balanced fertilization on yield and phosphorus uptake in wheat-rice rotation*. J. Agric. Res. 44(2), 105-115.
- OFEFP, (2004). *Le phosphore dans les sols: le phosphore dans les sols, les engrais, les cultures et l'environnement (Etat de la situation en Suisse)*. Cahier de l'environnement N°368, Sol. Publié par l'OFEFP. Berne. 182 p.
- Oliviera, M., Becquer, T., Goedert, W., Vilela, L., et Deleporte, P. (2011). *Concentração de íons na solução de um latossolo vermelho sob diferentes sistemas de manejo*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 46(8).
- Othieno, C. (1973). *The effect of organic mulches on yields and phosphorus utilisation by plants in acids soils*. Plant and Soil 38, 17-32.
- Parent, L., et Khiari, L. (2003). *Nitrogen and phosphorus indicators of organic soil quality. Chap V. In: L.E. Parent and P. Organic soils and peat materials for sustanaible agriculture*. Inicki (éditeurs). CRC Press. Boca Raton. FL.
- Parmar, D., et Sharma, P. (1996). *Phosphorus and mulching effects on nutrient uptake and grain yield of wheat at different growth stages*. Tropical Agricuilture 73, 196-200.
- Pavinato, P., Dao, T., et Rosolem, C. (2010). *Tillage and phosphorus management effects on enzyme-labile bioactive phosphorus availability in Cerrado Oxisols*. Contents lists available at Science Direct. ELSEVIER. 207-215 p.
- Perrott, K., Sarathchandra, S., et Waller, J. (1990). *Seasonal storage and release of phosphorus and potassium by organic matter and the microbial biomass in a high producing pastoral soil*. Australian Journal of Soil research 28, 593-608.
- Pichot, J., et Roche, P. (1972). *Phosphore dans les sols tropicaux*. Communication au Séminaire sur la Fertilité des sols, Ibadan. 939-965 p.
- Plantegenest, M., Le May, C., et Fabre, F. (2007). *Landscape epidemiology of plant diseases*. Journal of th Royal Society Interface, 4:963-972.
- Puckridge, D., et French, R. (1983). *The annual legume pasture in cereal ley-farming systems of southern Australia:a review*. Agriculture, Ecosystems and Environment 9:229-67.
- Pushparajah, E. (1998). *Nutrient management and challenges in managing red and lateritic soils*. In " Red and Lateritic soils". Eds J Sehgal, WE Blum, KS Gajbhiye. pp 293-304.
- Pypers, P., Verstraete, S., Thi, C., et Merckx, R. (2005). *Changes in mineral nitrogen, phosphorus availability and salt-extractable aluminium following the application of green manure residues in two weathered soils of South Vietnam*. Soil Biology et Biochemistry 37, 163–172.
- 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 de Sol. 202 p.
- Rabeharisoa, L. (2007). *Libérons le phosphore*. Communication personnelle. Académie Nationale des Arts, des Lettres et des Sciences (AcNALS).
- Rabetokotany, R. (2007). *Effets d'une fertilisation phosphatée par le Bat Guano et des doses croissantes de Triple Super Phosphate sur un sol ferrallitique malgache. Cas de Ferralsol de "Tanety" sis à Lazaina*. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies en Chimie appliquée à l'Industrie et à l'Environnement. Université d'Antananarivo - Ecole Supérieure Ploytechnique d'Antananarivo - Département Génie Chimique. 87 p
- Rajan, S., et Perrott, K. (1975). *Phosphate adsorption by synthetic amorphous aluminosilicates*. J. Soil. Sci., 26. 257-266 p.
- Rakotondravelo, J. (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.

- Raous, S. (2011). *Dynamique du nickel et d'autres éléments en traces métalliques (Co, Cr, Cu et Mn) dans des matériaux miniers ultramafiques*. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 28 janvier 2011, 279 p.
- Rasoloniaina, M. (2005). *Caractérisation des effets des différents systèmes de culture sur la réduction du ruissellement et de l'érosion*. Rapport de stage URP-SCRID. Mémoire d'ingéniorat 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*. Présentée à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. Ministère de l'Agriculture - Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier- Ecole Doctorale Biologie des Systèmes Intégrés - Agronomie - Environnement. 162 p.
- Razafindramanana, N. (2011). *Contrôle des pertes en terre, en carbone en nutriment par érosion sous système en semis direct sur couverture végétale permanente: Haute Terre Centrale Malgache*. Thèse Doctorat en Sciences Agronomiques de l'Université d'Antananarivo de Madagascar - Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA). 140 p.
- République de Madagascar, 2005. *Plan régional de développement de la Région de Madagascar*.
- Saha, S., Chakraborty, D., Sharma, A., Tomar, R., Bhadray, S., Sen, U., et al. (2010). *Effect of tillage and residue management on soil physical properties and crop productivity in maize (Zea mays)-Indian mustard (Brassica juncea) system*. Indian Journal of Agricultural Sciences 80, 679-685.
- Sanchez, P., Shepherd, K., Soule, M., Place, F., Buresh, R., Izac, A., et al. (1997). *Soil Fertility replenishment in Africa : An Investment in Natural Resource Capital*. In: Buresh, R.J., Sanchez, P.A., Calhoun, F. (Eds.), *Replenishing soil fertility in Africa*. SSSA Spec. Publ., Madison, WI, pp. 1-46.
- Sanyal, S., et De Datta, S. (1981). *Chemistry of phosphorus transformations in soil*. Adv. Soil Sci., 16:1-120.
- Saunders, W. (1965). *Phosphate retention by New Zealand soils and its relationship to free sesquioxides, organic matter and other soil properties*. N.Z.J. Agric. Res., 8:30-57.
- Scopel, E., Douzet, J., Macena da Silva, F., Cardoso, A., Moreira, J., Findeling, A., et al. (2005). *Impact des systèmes de culture en semis direct avec les couvertures végétales (SCV) sur la dynamique de l'eau, de l'azote minéral et du carbone du sol dans les cerrados brésiliens*. Cahiers agricultures 14, 71-75.
- Segalen, P. (1969). *Le remaniement des sols et la mise en place de la "stone-line" en Afrique*. Cah. ORSTOM, série Pédol., VII, 1. 113-127 p.
- Ségalen, P. (1995). *Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique: les facteurs de formation et les sols ferrallitiques en Amérique*. Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération. 169 p.
- Seguy, L., Bouzinac, S., Trantini, A., et Cortes, N. A. (1996). *L'agriculture brésilienne des fronts pionniers*. Agriculture et Développement. ISSN 1249-9951. CIRAD - BP 5035 - Montpellier- France.
- Seguy, L., et Bouzinac, S. (1999). *Cultiver durablement et proprement les sols de la planète, en semis direct*. CIRAD-CA/GEC. Document obtenu sur le site CIRAD du réseau [http:// agroecologie.cirad.fr](http://agroecologie.cirad.fr). 13 .p.
- Seguy, L., Husson, O., Charpentier, H., Bouzinac, S., Michellon, R., Chabanne, A., et al. (2009). *Chapitre 1: Principes et fonctionnement des écosystèmes cultivés en semis direct sur couverture végétale permanente*. Volume I. CIRAD - TAFA- GSDM - AFD - MAEP. <http://Agroecologie.cirad.fr>. 32 p.
- Sharif, M., et Chaudry, F. (1974). *Suppression of superphosphate-phosphorus fixation by faryard manure. I. High phosphorus uptake from superphosphate*. Soil Sci. Plant Nutr. 20. pp 387-393.
- Shipley, P., Meisinger, J., et Decker, A. (1992). *Conserving residual nitrogen with cover crops*. Agron. J. 84, 869-876.
- Sibanda, H., et Young, S. (1986). *Competitive adsorption of humus acids and phosphate goethite, gibbsite and two tropical soils*. J. Soil Sci. 37:197-204.
- Singh, G., Jalota, S., et Singh, Y. (2007). *Manuring and residue management effects on physical properties of a soil under the rice-wheat system in Punjab, India*. Soil and Tillage Rresearch 94, 229-238.

- Soil Survey Staff, 1998. *Keys to soil taxonomy*. 8th ed. United States Department of Agriculture, Washington. USA. 326 p.
- Somado, E., Kühn, R., Sahrawat, K., et Becker, M. (2007). *Application of low-phosphorus-containing legume residues reduces extractable phosphorus in a tropical Ultisol*. Africa Rice Center (WARDA) - University of Göttingen, Department for Soil Science, Agronomy in the Tropics, Germany - ICRISAT, India - University of Bonn, Institute of Agricultural Chemistry, Germany. J. Plant Nutr. Soil Sci. 170, 205–209.
- Soon, Y. (1991). *Solubility and retention of phosphate in soils of the northwestern Canadian prairie*. Can. J. Soil Sci., 71:453-463.
- Sree Ramulu, U., Pratt, P., et Page, A. (1967). *Phosphorus fixation by soils in relation to extractable iron oxides and mineralogical composition*. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 31. 193-196 p.
- Sumner, M., et Farina, M. (1986). *Phosphorus interactions with other nutrients and lime in field cropping systems*. . Advances in Soil Science 5, 201-236.
- Tang, C., Drevon, J., Jaillard, B., Souche, G., et Hinsinger, P. (2004). *Proton release of two genotypes of bean (Phaseolus vulgaris L.) as affected by N nutrition and P deficiency: New challenges for rhizosphere research at the entrance of the 21st Century*. Plant Soil 260, 59-68.
- Tilman, D., Cassman, K., Matson, P., Naylor, R., et Polasky, S. (2002). *Agricultural sustainability and intensive practises*. Review PubMed PMID:12167873.
- Tisdale, S., et Nelson, W. (1975). *Soil fertility and fertilizers*. Macmillan Publishing Co. Inc. New York. U.S.A. 694 p.
- Traina, S., Sposito, G., Bradford, G., et Kafkafi, U. (1987). *kinetic study of citrate effects on orthophosphate solubility in an acidic, montmorillonitic soil*. . Soil Science Society of America Journal 51, 1483-1487.
- Turner, B. (2006). *Organic phosphorus in Madagascar rice soils*. ELSEVIER. Geoderma 136: 279-288.
- Uehara, G., et Gillman, G. (1981). *The mineralogy, chemistry, and physics of tropical soils with variable charge clays*. Westview press. Boulder, CO.
- Van Raij, B., Quaggio, J. A., et da Silva, N. M. (1986). Commun. Soil Sci. Plant Anal. 17, 547-566.
- Vance, C. P. (2001). *Symbiotique Nitrogen Fixation and Phosphorus Acquisition*. Plant Nutrition in a world Declining Renewable Resources. Plant physiology. Vol 127. p 390-397.
- Vanlauwe, B., Nwoke, O., Sanginga, N., Diels, J., Carsky, R., Deckers, J., et al. (2000). *Utilization of rock phosphate by crops on a representative toposequence in the Northern Guinea savanna zone of Nigeria: Response by Mucuna pruriens, Lablab purpureus and maize*. Soil Biology et Biochemistry, Vol.32, No. 14, pp 2063-2077.
- Vo Ding Quang, Vu Cao, T., Tran Thi Tuong, L., et Dufey, J. (1996). *Phosphorus sorption in soils of the Mekong Delta (Vietnam) as described by the binary Langmuir equation*. Eur. J. Soil Sci., 47. 113-123 p.
- Wang, X., Yost, R., et Linquist, B. (2001). *Soil aggregate size affects phosphorus desorption from highly weathered soils and plant growth*. Soil Science Society of America Journal 65, 139-146.
- Willet, I., et Higgins, A. (1978). *Studies on the phosphate potentials of soils. Part 1: The measurement of phosphate potential*. Plant and Soil, 20. 1-16 p.
- Williams, E., Scott, N., et McDonald, M. (1958). *Soil properties and phosphate sorption*. J. Sci. Food Agric., 955:1-559.
- Yadvinder-Singh, Bijay-Singh, et Timsina, J. (2005). *Crop residue management for nutrient cycling and improving soil, productivity in Rice-Based cropping systems in the Tropics*. Department of Soils, Punjab Agricultural University, Ludhiana 141 004, India - CSIRO Land and Water, Griffith NSW 2680, Australia. Elsevier Inc. All rights reserved. Advances in Agronomy, volume 85. 139 p.
- Zebrowski C., et Ratsimbazafy C., (1979). *Carte pédologique de Madagascar au 1/100000*.
<http://www.ccse-swcc.nb.ca/CA-6FR>

ANNEXES

Annexes 4-1 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc A à T1

Bloc	Date	Référence sur terrain	Culture	Plante couverture	gestion du sol	Fumure	gestion des résidus	Pi _{hydrosoluble} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{résine} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	Po _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	P total (mg P kg ⁻¹)
A	T1	PCP A1 b	Riz	S3	LB	FM	exporté	0.02	9.92	13.17	5.45	302.91
A	T1	PCP A1 c	Riz	S3	LB	Fu	exporté	0.01	7.19	19.59	0.09	266.52
A	T1	PCP A6 b	Riz	S3	SCV	Fu	restitué	0.02	3.45	11.31	9.74	238.09
A	T1	PCP A7 b	Riz	S3	SCV	FM	restitué	0.02	3.29	24.65	13.69	243.33
A	T1	PCP A8 b	Rota	S1	SCV	Fu	restitué	0.02	3.06	11.50	8.80	233.81
A	T1	PCP A9 b	Rota	S1	SCV	FM	restitué	0.02	12.28	13.31	4.22	276.58
A	T1	PCP A10 b	Rota	S3	SCV	Fu	restitué	0.03	3.72	9.42	8.23	229.18
A	T1	PCP A11 b	Rota	S3	SCV	FM	restitué	0.01	12.13	16.22	13.05	299.25
A	T1	PCP A12	Rota	S2	SCV	FM	restitué	0.02	7.72	15.64	9.88	282.04
A	T1	PCP A13	Rota	S2	SCV	Fu	restitué	0.02	3.84	10.94	6.89	250.55
A	T1	PCP A14	Riz	S2	LB	Fu	exporté	0.03	4.99	8.59	5.84	252.64
A	T1	PCP A15	Riz	S2	LB	FM	exporté	0.02	3.33	10.55	6.81	235.11
A	T1	PCP A16	Rota	S2	LB	FM	exporté	0.00	10.19	13.59	13.05	309.11
A	T1	PCP A17	Rota	S2	LB	Fu	exporté	0.02	3.22	9.40	13.05	254.78
A	T1	PCP A20 b	Rota	S1	LB	Fu	exporté	0.00	1.96	6.99	9.48	229.04
A	T1	PCP A21 b	Rota	S1	LB	FM	exporté	0.01	4.50	9.12	10.95	271.28
A	T1	PCP A22 b	Rota	S3	LB	Fu	exporté	0.01	3.47	7.55	7.74	242.31
A	T1	PCP A22 c	Rota	S3	LB	FM	exporté	0.00	3.57	8.14	3.92	261.55
A	T1	PCP A23 b	Riz	S1	LB	Fu	exporté	0.01	3.93	6.63	2.22	254.29
A	T1	PCP A24 b	Riz	S1	LB	FM	exporté	0.00	3.55	9.04	10.18	259.98
A	T1	PCP A25 b	Riz	S1	SCV	FM	restitué	0.03	7.52	12.05	12.47	267.77
A	T1	PCP A26 b	Riz	S1	SCV	Fu	restitué	0.08		24.85	11.36	470.37
A	T1	PCP A27	Riz	S2	SCV	Fu	restitué	0.00	8.18	15.26	13.90	302.69
A	T1	PCP A28	Riz	S2	SCV	FM	restitué	0.07		16.39	19.03	321.97

Annexes 4-2 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc B à T1

Bloc	Date	Référence sur terrain	Culture	Plante couverture	gestion du sol	Fumure	gestion des résidus	Pi _{hydrosoluble} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{résine} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	Po _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	P total (mg P kg ⁻¹)
B	T1	PCP B1 b	Rota	S1	SCV	Fu	restitué	0.04	5.28	10.01	12.12	326.19
B	T1	PCP B2 b	Rota	S1	SCV	FM	restitué	0.05	10.92	26.25		386.33
B	T1	PCP B3	Riz	S2	SCV	FM	restitué	0.02	8.34	8.21	10.79	343.46
B	T1	PCP B4	Riz	S2	SCV	Fu	restitué	0.02	6.40	12.51	13.62	364.84
B	T1	PCP B5	Riz	S2	LB	FM	exporté	0.02	10.42	11.93	15.59	350.68
B	T1	PCP B6	Riz	S2	LB	Fu	exporté	0.01	7.06	11.34	7.03	350.20
B	T1	PCP B7 b	Riz	S1	LB	Fu	exporté	0.03	13.07	7.87	14.54	374.43
B	T1	PCP B8 b	Riz	S1	LB	FM	exporté	0.08	9.75	10.49	8.14	355.79
B	T1	PCP B9 b	Rota	S1	LB	FM	exporté	0.03	11.10	13.36	16.06	358.39
B	T1	PCP B10 b	Rota	S1	LB	Fu	exporté	0.01	8.24	12.92	10.75	342.91
B	T1	PCP B11	Rota	S2	SCV	FM	restitué			12.48	14.03	459.73
B	T1	PCP B12	Rota	S2	SCV	Fu	restitué	0.02	4.84	10.89	17.55	325.65
B	T1	PCP B15 b	Rota	S3	LB	FM	exporté	0.02	5.82	8.85	17.67	312.28
B	T1	PCP B15 c	Rota	S3	LB	Fu	exporté	0.01	7.49	8.88	13.02	347.21
B	T1	PCP B16 b	Rota	S3	SCV	FM	restitué	0.00	7.25	28.49	19.74	341.13
B	T1	PCP B17 b	Rota	S3	SCV	Fu	restitué	0.00	5.76	10.64	21.37	314.31
B	T1	PCP B20	Rota	S2	LB	Fu	exporté	0.00	0.78	10.21	15.06	183.66
B	T1	PCP B21	Rota	S2	LB	FM	exporté	0.00	0.80	11.07	15.33	174.74
B	T1	PCP B22 b	Riz	S3	SCV	FM	restitué	0.03	7.96	10.97	16.66	394.31
B	T1	PCP B23 b	Riz	S3	SCV	Fu	restitué	0.02	11.11	11.29	13.70	338.30
B	T1	PCP B24 b	Riz	S1	SCV	FM	restitué	0.02	6.49	11.40	16.13	340.65
B	T1	PCP B25 b	Riz	S1	SCV	Fu	restitué	0.00	4.45	11.11	16.44	334.81
B	T1	PCP B30 b	Riz	S3	LB	Fu	exporté	0.01	3.93	7.52	5.69	317.25
B	T1	PCP B30 c	Riz	S3	LB	FM	exporté	0.03	7.21	8.98	12.82	365.25

Annexe 4-3 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc C à T1

Bloc	Date	Référence sur terrain	Culture	Plante couverture	gestion du sol	Fumure	gestion des résidus	Pi _{hydrosoluble} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{résine} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	Po _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	P total (mg P kg ⁻¹)
C	T1	PCP C1	Riz	S2	SCV	FM	restitué	0.03	4.45	15.54	9.82	327.71
C	T1	PCP C2	Riz	S2	SCV	Fu	restitué	0.00	3.71	13.79	18.27	343.04
C	T1	PCP C5b	Riz	S3	SCV	FM	restitué	0.01	11.23	20.00	11.51	361.91
C	T1	PCP C6b	Riz	S3	SCV	Fu	restitué	0.07	2.13	12.52	10.89	261.65
C	T1	PCP C7b	Riz	S1	SCV	Fu	restitué	0.09	1.84	17.13	8.79	266.54
C	T1	PCP C8b	Riz	S1	SCV	FM	restitué	0.09	7.09	12.57	11.22	332.09
C	T1	PCP C9b	Riz	S1	LB	FM	exporté	0.09	3.81	11.96	7.78	299.22
C	T1	PCP C10b	Riz	S1	LB	Fu	exporté	0.08	3.49	11.69	9.34	316.43
C	T1	PCP C15	Riz	S2	LB	Fu	exporté	0.08	4.99	7.09	6.08	306.53
C	T1	PCP C16	Riz	S2	LB	FM	exporté	0.10	4.75	7.39	9.00	325.59
C	T1	PCP C17	Rota	S2	SCV	FM	restitué	0.09	6.96	13.61	11.24	342.48
C	T1	PCP C18	Rota	S2	SCV	Fu	restitué	0.10	9.99	14.21	15.58	367.05
C	T1	PCP C19b	Rota	S3	SCV	Fu	restitué	0.09	4.53	9.71	9.67	331.66
C	T1	PCP C20b	Rota	S3	SCV	FM	restitué	0.07	5.58	12.35	14.86	359.09
C	T1	PCP C21b	Rota	S3	LB	Fu	exporté	0.09	3.79	10.71	12.94	344.05
C	T1	C21 C	Rota	S3	LB	FM	exporté	0.00	5.02	9.76	6.30	312.55
C	T1	PCP C22b	Rota	S1	LB	Fu	exporté	0.10	6.61	11.47	12.55	397.73
C	T1	PCP C23b	Rota	S1	LB	FM	exporté	0.08	3.14	10.00	11.38	306.56
C	T1	PCP C26	Rota	S2	LB	FM	exporté	0.11	3.32	10.00	13.95	403.28
C	T1	PCP C27	Rota	S2	LB	Fu	exporté	0.10	8.34	5.77	6.67	372.48
C	T1	PCP C28b	Rota	S1	SCV	FM	restitué	0.13	15.03	12.45	13.60	403.73
C	T1	PCP C29b	Rota	S1	SCV	Fu	restitué	0.04	12.68	14.96	11.30	392.14
C	T1	PCP C30b	Riz	S3	LB	Fu	exporté	0.21	4.35	9.48	13.71	343.31
C	T1	PCP C30c	Riz	S3	LB	FM	exporté	0.19	5.42	10.58	8.60	358.26

Annexe 4-4 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc D à T1

Bloc	Date	Référence sur terrain	Culture	Plante couverture	gestion du sol	Fumure	gestion des résidus	Pi _{hydrosoluble} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{résine} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	Po _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	P total (mg P kg ⁻¹)
D	T1	PCP D1 b	Rota	S3	LB	Fu	exporté	0.02	6.09	9.08	17.58	339.25
D	T1	PCP D1 c	Rota	S3	LB	FM	exporté	0.03	5.16	9.30	16.00	323.31
D	T1	PCP D2 b	Rota	S1	LB	FM	exporté	0.05	8.15	10.93	9.36	314.18
D	T1	PCP D3 b	Rota	S1	LB	Fu	exporté	0.00	7.37	9.05	8.13	353.76
D	T1	PCP D4 b	Riz	S3	LB	Fu	exporté	0.00	4.17	5.97	21.49	275.91
D	T1	PCP D4 c	Riz	S3	LB	FM	exporté	0.00	4.06	10.47	14.46	281.62
D	T1	PCP D5 b	Rota	S3	SCV	FM	restitué	0.03	6.76	12.59	19.27	312.57
D	T1	PCP D6 b	Rota	S3	SCV	Fu	restitué	0.04	3.25	10.83	21.07	267.68
D	T1	PCP D9 b	Riz	S1	LB	Fu	exporté	0.02	7.01	12.30		296.16
D	T1	PCP D10 b	Riz	S1	LB	FM	exporté	0.05	10.93	15.55	5.29	370.16
D	T1	PCP D12	Riz	S2	SCV	Fu	restitué	0.01	3.88	11.04	16.27	308.24
D	T1	PCP D13	Riz	S2	SCV	FM	restitué	0.01	7.72	11.37	17.49	321.53
D	T1	PCP D14	Rota	S2	SCV	Fu	restitué	0.01	7.89	10.41	16.07	304.00
D	T1	PCP D15	Rota	S2	SCV	FM	restitué	0.00	6.58	13.64	9.91	304.86
D	T1	PCP D19 b	Riz	S1	SCV	FM	restitué	0.00	4.72	16.72	10.24	292.50
D	T1	PCP D20 b	Riz	S1	SCV	Fu	restitué	0.02	7.80	12.23	16.73	223.97
D	T1	D21 b	Rota	S1	SCV	FM	restitué	0.01	9.36	15.19	11.74	405.07
D	T1	PCP D22 b	Rota	S1	SCV	Fu	restitué	0.04	8.19	18.82	7.40	309.17
D	T1	PCP D23 b	Riz	S3	SCV	FM	restitué	0.02	4.46	19.33	11.45	293.63
D	T1	PCP D24 b	Riz	S3	SCV	Fu	restitué	0.02	4.86	8.01	7.07	275.33
D	T1	PCP D27	Riz	S2	LB	Fu	exporté	0.05	9.69	13.42	12.12	351.33
D	T1	PCP D28	Riz	S2	LB	FM	exporté	0.03	10.53	3.34	1.27	300.34
D	T1	PCP D29	Rota	S2	LB	Fu	exporté	0.01	2.76	15.16	3.33	143.95
D	T1	PCP D30	Rota	S2	LB	FM	exporté	0.08	4.71	22.88	10.37	209.21

Annexe 4-5: Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc A à T5

Bloc	Date	Référence sur terrain	Culture	Plante couverture	gestion du sol	Fumure	gestion des résidus	Pi _{hydrosoluble} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{résine} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	Po _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	P total (mg P kg ⁻¹)
A	T5	PCP A1 b	Riz	S3	LB	FM	exporté	0.00	4.24	7.59	13.49	363.71
A	T5	PCP A1 c	Riz	S3	LB	Fu	exporté	0.01	6.01	9.85	9.30	359.48
A	T5	PCP A6 b	Riz	S3	SCV	Fu	restitué	0.00	4.44	8.35	15.81	373.04
A	T5	PCP A7 b	Riz	S3	SCV	FM	restitué			24.81	-	569.32
A	T5	PCP A8 b	Rota	S1	SCV	Fu	restitué	0.00	4.45	8.14	24.39	371.22
A	T5	PCP A9 b	Rota	S1	SCV	FM	restitué	0.00	6.95	11.12	13.22	397.78
A	T5	PCP A10 b	Rota	S3	SCV	Fu	restitué	0.14	3.58	7.82	16.10	331.64
A	T5	PCP A11 b	Rota	S3	SCV	FM	restitué	0.08	16.91	16.37	7.04	447.32
A	T5	PCP A12	Rota	S2	SCV	FM	restitué	0.07	11.54	13.18	19.06	378.68
A	T5	PCP A13	Rota	S2	SCV	Fu	restitué	0.04	5.67	8.80	18.06	342.20
A	T5	PCP A14	Riz	S2	LB	Fu	exporté	0.07	3.76	7.19	11.25	361.49
A	T5	PCP A15	Riz	S2	LB	FM	exporté	0.07	6.13	9.12	10.48	325.25
A	T5	PCP A16	Rota	S2	LB	FM	exporté	0.09	8.61	13.86	6.25	449.59
A	T5	PCP A17	Rota	S2	LB	Fu	exporté	0.08	4.66	10.35	16.82	466.05
A	T5	PCP A20 b	Rota	S1	LB	Fu	exporté	0.00	2.16	6.16	10.91	336.40
A	T5	PCP A21 b	Rota	S1	LB	FM	exporté	0.06	3.84	9.05	11.75	325.50
A	T5	PCP A22 b	Rota	S3	LB	Fu	exporté	0.05	2.98	6.40	12.72	315.68
A	T5	PCP A22 c	Rota	S3	LB	FM	exporté	0.03	3.33	8.06	10.20	349.50
A	T5	PCP A23 b	Riz	S1	LB	Fu	exporté	0.09	2.69	6.14	14.63	310.34
A	T5	PCP A24 b	Riz	S1	LB	FM	exporté	0.12	6.03	9.84	11.26	421.86
A	T5	PCP A25 b	Riz	S1	SCV	FM	restitué	0.08	13.65	13.15	19.67	655.41
A	T5	PCP A26 b	Riz	S1	SCV	Fu	restitué	0.14	15.58	11.04		581.14
A	T5	PCP A27	Riz	S2	SCV	Fu	restitué	0.10	8.83	20.20	10.51	409.00
A	T5	PCP A28	Riz	S2	SCV	FM	restitué	0.11	11.36	13.41	16.72	493.13

Annexe 4-6 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc B à T5

Bloc	Date	Référence sur terrain	Culture	Plante couverture	gestion du sol	Fumure	gestion des résidus	Pi hydrosoluble (mg P kg ⁻¹)	Pi résine (mg P kg ⁻¹)	Pi Olsen (mg P kg ⁻¹)	Po Olsen (mg P kg ⁻¹)	P total (mg P kg ⁻¹)
B	T5	PCP B1 b	Rota	S1	SCV	Fu	restitué	0.00	6.72	10.17	3.74	428.96
B	T5	PCP B2 b	Rota	S1	SCV	FM	restitué	0.02		28.07	0.55	567.27
B	T5	PCP B3	Riz	S2	SCV	FM	restitué	0.00	10.17	10.61		486.59
B	T5	PCP B4	Riz	S2	SCV	Fu	restitué	0.01	13.05	18.40	10.33	607.42
B	T5	PCP B5	Riz	S2	LB	FM	exporté	0.00	5.77	12.99	22.06	453.95
B	T5	PCP B6	Riz	S2	LB	Fu	exporté	0.00	5.13	10.86	17.00	408.69
B	T5	PCP B7 b	Riz	S1	LB	Fu	exporté	0.00	4.61	8.36	19.83	386.58
B	T5	PCP B8 b	Riz	S1	LB	FM	exporté	0.00	6.42	11.50	7.75	387.75
B	T5	PCP B9 b	Rota	S1	LB	FM	exporté	0.00	10.77	15.03	15.79	483.54
B	T5	PCP B10 b	Rota	S1	LB	Fu	exporté	0.00	7.48	13.44	15.30	419.02
B	T5	PCP B11	Rota	S2	SCV	FM	restitué	0.01		13.07	20.64	416.50
B	T5	PCP B12	Rota	S2	SCV	Fu	restitué	0.00	6.77	10.52	18.62	263.21
B	T5	PCP B15 b	Rota	S3	LB	FM	exporté	0.00	3.87	9.08	14.34	360.62
B	T5	PCP B15 c	Rota	S3	LB	Fu	exporté	0.00	4.29	10.03	20.75	396.90
B	T5	PCP B16 b	Rota	S3	SCV	FM	restitué	0.07				580.13
B	T5	PCP B17 b	Rota	S3	SCV	Fu	restitué	0.00	9.11	13.86		443.20
B	T5	PCP B20	Rota	S2	LB	Fu	exporté	0.00	4.40	9.94	14.79	334.96
B	T5	PCP B21	Rota	S2	LB	FM	exporté	0.00	5.64	10.85	13.12	344.06
B	T5	PCP B22 b	Riz	S3	SCV	FM	restitué	0.00	8.48	10.95	12.97	377.68
B	T5	PCP B23 b	Riz	S3	SCV	Fu	restitué	0.00	7.07	10.50	12.73	346.72
B	T5	PCP B24 b	Riz	S1	SCV	FM	restitué	0.00	7.45	12.11	11.71	378.15
B	T5	PCP B25 b	Riz	S1	SCV	Fu	restitué	0.00	6.56	10.36	15.95	367.31
B	T5	PCP B30 b	Riz	S3	LB	Fu	exporté	0.00	2.53	7.64	13.13	332.49
B	T5	PCP B30 c	Riz	S3	LB	FM	exporté	0.00	3.54	8.42	10.02	351.87

Annexe 4-7 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc C à T5

Bloc	Date	Référence sur terrain	Culture	Plante couverture	gestion du sol	Fumure	gestion des résidus	Pi hydrosoluble (mg P kg ⁻¹)	Pi résine (mg P kg ⁻¹)	Pi Olsen (mg P kg ⁻¹)	Po Olsen (mg P kg ⁻¹)	P total (mg P kg ⁻¹)
C	T5	PCP C1	Riz	S2	SCV	FM	restitué	0.03	13.39	12.33	6.67	402.24
C	T5	PCP C2	Riz	S2	SCV	Fu	restitué	0.02	8.94	10.69	8.50	413.04
C	T5	PCP C5b	Riz	S3	SCV	FM	restitué	0.03	15.23	14.43	10.26	431.05
C	T5	PCP C6b	Riz	S3	SCV	Fu	restitué	0.02	8.43	9.07	9.15	
C	T5	PCP C7b	Riz	S1	SCV	Fu	restitué	0.02	11.82	13.00	11.12	405.09
C	T5	PCP C8b	Riz	S1	SCV	FM	restitué	0.02	2.44	9.66	10.53	408.91
C	T5	PCP C9b	Riz	S1	LB	FM	exporté	0.01	1.68	7.09	7.81	360.71
C	T5	PCP C10b	Riz	S1	LB	Fu	exporté	0.01	6.43	9.07	4.69	375.19
C	T5	PCP C15	Riz	S2	LB	Fu	exporté	0.01	0.95	4.85	8.70	327.22
C	T5	PCP C16	Riz	S2	LB	FM	exporté	0.00	3.95	5.42	7.42	336.91
C	T5	PCP C17	Rota	S2	SCV	FM	restitué	0.04	15.01	10.82	8.76	403.32
C	T5	PCP C18	Rota	S2	SCV	Fu	restitué	0.03	9.85	10.40	11.22	444.06
C	T5	PCP C19b	Rota	S3	SCV	Fu	restitué	0.02	7.33	7.20	10.57	366.11
C	T5	PCP C20b	Rota	S3	SCV	FM	restitué	0.03	10.73	9.78	12.48	389.52
C	T5	PCP C21b	Rota	S3	LB	Fu	exporté	0.05	3.98	7.70	11.18	376.85
C	T5	C21 C	Rota	S3	LB	FM	exporté	0.03	4.10	6.48	11.45	340.49
C	T5	PCP C22b	Rota	S1	LB	Fu	exporté	0.01	4.70	7.41	6.48	368.79
C	T5	PCP C23b	Rota	S1	LB	FM	exporté	0.05	4.74	10.98	3.19	381.95
C	T5	PCP C26	Rota	S2	LB	FM	exporté	0.00	1.79	7.55	7.84	369.05
C	T5	PCP C27	Rota	S2	LB	Fu	exporté	0.01	0.64	3.87	5.91	362.63
C	T5	PCP C28b	Rota	S1	SCV	FM	restitué	0.01	12.81	9.38	8.55	385.87
C	T5	PCP C29b	Rota	S1	SCV	Fu	restitué	0.07	12.56	11.31	7.78	431.28
C	T5	PCP C30b	Riz	S3	LB	Fu	exporté	0.16	4.49	6.76	10.71	374.04
C	T5	PCP C30c	Riz	S3	LB	FM	exporté	0.01	6.35	7.67	8.93	361.06

Annexe 4-8 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc D à T5

Bloc	Date	Référence sur terrain	Culture	Plante couverture	gestion du sol	Fumure	gestion des résidus	Pi _{hydrosoluble} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{résine} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	Po _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	P total (mg P kg ⁻¹)
D	T5	PCP D1 b	Rota	S3	LB	Fu	exporté	0.01	4.35	6.56	4.41	379.27
D	T5	PCP D1 c	Rota	S3	LB	FM	exporté	0.00	3.70	6.53	4.75	401.81
D	T5	PCP D2 b	Rota	S1	LB	FM	exporté	0.01	5.95	7.61	2.96	398.31
D	T5	PCP D3 b	Rota	S1	LB	Fu	exporté	0.01	4.59	8.83		424.02
D	T5	PCP D4 b	Riz	S3	LB	Fu	exporté	0.00	2.46	4.55	2.84	359.84
D	T5	PCP D4 c	Riz	S3	LB	FM	exporté	0.01	3.24	8.04	3.48	450.91
D	T5	PCP D5 b	Rota	S3	SCV	FM	restitué	0.01	8.90	9.58	2.89	392.26
D	T5	PCP D6 b	Rota	S3	SCV	Fu	restitué	0.01	5.36	7.86	3.89	400.97
D	T5	PCP D9 b	Riz	S1	LB	Fu	exporté	0.01	4.55	8.79		354.06
D	T5	PCP D10 b	Riz	S1	LB	FM	exporté	0.01	7.72	9.06		416.13
D	T5	PCP D12	Riz	S2	SCV	Fu	restitué	0.00	5.28	6.30	1.88	383.72
D	T5	PCP D13	Riz	S2	SCV	FM	restitué	0.01	6.50	7.92	2.96	431.15
D	T5	PCP D14	Rota	S2	SCV	Fu	restitué	0.01	8.21	7.48	1.82	394.68
D	T5	PCP D15	Rota	S2	SCV	FM	restitué	0.03	10.76	9.07	1.12	381.69
D	T5	PCP D19 b	Riz	S1	SCV	FM	restitué	0.01	8.13	8.08		
D	T5	PCP D20 b	Riz	S1	SCV	Fu	restitué	0.01	5.26	8.55		399.50
D	T5	D21 b	Rota	S1	SCV	FM	restitué	0.02	13.04	10.37		423.27
D	T5	PCP D22 b	Rota	S1	SCV	Fu	restitué	0.02	13.72	12.66	0.26	436.25
D	T5	PCP D23 b	Riz	S3	SCV	FM	restitué	0.03	20.73	11.80		420.55
D	T5	PCP D24 b	Riz	S3	SCV	Fu	restitué	0.02	4.14	4.91		339.09
D	T5	PCP D27	Riz	S2	LB	Fu	exporté	0.00	4.99	7.27	3.24	368.45
D	T5	PCP D28	Riz	S2	LB	FM	exporté	0.00	1.20	2.70	0.25	301.30
D	T5	PCP D29	Rota	S2	LB	Fu	exporté	0.01	9.50	9.27	3.37	389.56
D	T5	PCP D30	Rota	S2	LB	FM	exporté	0.02	16.34	15.55	2.22	416.57

Annexe 4-9 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc A à T9

Bloc	Date	Référence sur terrain	Culture	Plante couverture	gestion du sol	Fumure	gestion des résidus	Pi _{hydrosoluble} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{résine} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	Po _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	P total (mg P kg ⁻¹)
A	T9	PCP A1 b	Riz	S3	LB	FM	exporté	-	4.75	-	-	-
A	T9	PCP A1 c	Riz	S3	LB	Fu	exporté	-	5.73	-	-	-
A	T9	PCP A6 b	Riz	S3	SCV	Fu	restitué	-	2.62	-	-	-
A	T9	PCP A7 b	Riz	S3	SCV	FM	restitué	-	10.57	-	-	-
A	T9	PCP A8 b	Rota	S1	SCV	Fu	restitué	-	3.53	-	-	-
A	T9	PCP A9 b	Rota	S1	SCV	FM	restitué	-	19.47	-	-	-
A	T9	PCP A10 b	Rota	S3	SCV	Fu	restitué	-	4.27	-	-	-
A	T9	PCP A11 b	Rota	S3	SCV	FM	restitué	-	12.36	-	-	-
A	T9	PCP A12	Rota	S2	SCV	FM	restitué	-	10.02	-	-	-
A	T9	PCP A13	Rota	S2	SCV	Fu	restitué	-	2.60	-	-	-
A	T9	PCP A14	Riz	S2	LB	Fu	exporté	-	1.43	-	-	-
A	T9	PCP A15	Riz	S2	LB	FM	exporté	-	7.15	-	-	-
A	T9	PCP A16	Rota	S2	LB	FM	exporté	-	9.00	-	-	-
A	T9	PCP A17	Rota	S2	LB	Fu	exporté	-	1.86	-	-	-
A	T9	PCP A20 b	Rota	S1	LB	Fu	exporté	-	1.31	-	-	-
A	T9	PCP A21 b	Rota	S1	LB	FM	exporté	-	3.26	-	-	-
A	T9	PCP A22 b	Rota	S3	LB	Fu	exporté	-	1.52	-	-	-
A	T9	PCP A22 c	Rota	S3	LB	FM	exporté	-	3.12	-	-	-
A	T9	PCP A23 b	Riz	S1	LB	Fu	exporté	-	1.57	-	-	-
A	T9	PCP A24 b	Riz	S1	LB	FM	exporté	-	3.61	-	-	-
A	T9	PCP A25 b	Riz	S1	SCV	FM	restitué	-	23.32	-	-	-
A	T9	PCP A26 b	Riz	S1	SCV	Fu	restitué	-	17.80	-	-	-
A	T9	PCP A27	Riz	S2	SCV	Fu	restitué	-	7.83	-	-	-
A	T9	PCP A28	Riz	S2	SCV	FM	restitué	-	23.59	-	-	-

Annexe 4-10 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc B à T9

Bloc	Date	Référence sur terrain	Culture	Plante couverture	gestion du sol	Fumure	gestion des résidus	Pi _{hydrosoluble} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{résine} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	Po _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	P total (mg P kg ⁻¹)
B	T9	PCP B1 b	Rota	S1	SCV	Fu	restitué	-	5.94	-	-	-
B	T9	PCP B2 b	Rota	S1	SCV	FM	restitué	-	18.45	-	-	-
B	T9	PCP B3	Riz	S2	SCV	FM	restitué	-	13.05	-	-	-
B	T9	PCP B4	Riz	S2	SCV	Fu	restitué	-	5.55	-	-	-
B	T9	PCP B5	Riz	S2	LB	FM	exporté	-	13.29	-	-	-
B	T9	PCP B6	Riz	S2	LB	Fu	exporté	-	3.76	-	-	-
B	T9	PCP B7 b	Riz	S1	LB	Fu	exporté	-	2.14	-	-	-
B	T9	PCP B8 b	Riz	S1	LB	FM	exporté	-	4.92	-	-	-
B	T9	PCP B9 b	Rota	S1	LB	FM	exporté	-	5.22	-	-	-
B	T9	PCP B10 b	Rota	S1	LB	Fu	exporté	-	3.61	-	-	-
B	T9	PCP B11	Rota	S2	SCV	FM	restitué	-	17.49	-	-	-
B	T9	PCP B12	Rota	S2	SCV	Fu	restitué	-	2.85	-	-	-
B	T9	PCP B15 b	Rota	S3	LB	FM	exporté	-	3.06	-	-	-
B	T9	PCP B15 c	Rota	S3	LB	Fu	exporté	-	7.10	-	-	-
B	T9	PCP B16 b	Rota	S3	SCV	FM	restitué	-	10.58	-	-	-
B	T9	PCP B17 b	Rota	S3	SCV	Fu	restitué	-	4.06	-	-	-
B	T9	PCP B20	Rota	S2	LB	Fu	exporté	-	1.35	-	-	-
B	T9	PCP B21	Rota	S2	LB	FM	exporté	-	2.45	-	-	-
B	T9	PCP B22 b	Riz	S3	SCV	FM	restitué	-	12.03	-	-	-
B	T9	PCP B23 b	Riz	S3	SCV	Fu	restitué	-	4.83	-	-	-
B	T9	PCP B24 b	Riz	S1	SCV	FM	restitué	-	12.17	-	-	-
B	T9	PCP B25 b	Riz	S1	SCV	Fu	restitué	-	2.66	-	-	-
B	T9	PCP B30 b	Riz	S3	LB	Fu	exporté	-	0.60	-	-	-
B	T9	PCP B30 c	Riz	S3	LB	FM	exporté	-	1.24	-	-	-

Annexe 4-11 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc C à T9

Bloc	Date	Référence sur terrain	Culture	Plante couverture	gestion du sol	Fumure	gestion des résidus	Pi _{hydrosoluble} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{résine} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	Po _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	P total (mg P kg ⁻¹)
C	T9	PCP C1	Riz	S2	SCV	FM	restitué	-	3.82	-	-	-
C	T9	PCP C2	Riz	S2	SCV	Fu	restitué	-	3.80	-	-	-
C	T9	PCP C5b	Riz	S3	SCV	FM	restitué	-	9.30	-	-	-
C	T9	PCP C6b	Riz	S3	SCV	Fu	restitué	-	4.78	-	-	-
C	T9	PCP C7b	Riz	S1	SCV	Fu	restitué	-	6.08	-	-	-
C	T9	PCP C8b	Riz	S1	SCV	FM	restitué	-	6.48	-	-	-
C	T9	PCP C9b	Riz	S1	LB	FM	exporté	-	3.73	-	-	-
C	T9	PCP C10b	Riz	S1	LB	Fu	exporté	-	6.19	-	-	-
C	T9	PCP C15	Riz	S2	LB	Fu	exporté	-	0.00	-	-	-
C	T9	PCP C16	Riz	S2	LB	FM	exporté	-	4.67	-	-	-
C	T9	PCP C17	Rota	S2	SCV	FM	restitué	-	9.67	-	-	-
C	T9	PCP C18	Rota	S2	SCV	Fu	restitué	-	6.26	-	-	-
C	T9	PCP C19b	Rota	S3	SCV	Fu	restitué	-	5.02	-	-	-
C	T9	PCP C20b	Rota	S3	SCV	FM	restitué	-	11.22	-	-	-
C	T9	PCP C21b	Rota	S3	LB	Fu	exporté	-	3.16	-	-	-
C	T9	C21 C	Rota	S3	LB	FM	exporté	-	4.48	-	-	-
C	T9	PCP C22b	Rota	S1	LB	Fu	exporté	-	2.76	-	-	-
C	T9	PCP C23b	Rota	S1	LB	FM	exporté	-	4.53	-	-	-
C	T9	PCP C26	Rota	S2	LB	FM	exporté	-	4.74	-	-	-
C	T9	PCP C27	Rota	S2	LB	Fu	exporté	-	2.69	-	-	-
C	T9	PCP C28b	Rota	S1	SCV	FM	restitué	-	18.91	-	-	-
C	T9	PCP C29b	Rota	S1	SCV	Fu	restitué	-	6.87	-	-	-
C	T9	PCP C30b	Riz	S3	LB	Fu	exporté	-	2.69	-	-	-
C	T9	PCP C30c	Riz	S3	LB	FM	exporté	-	12.26	-	-	-

Annexe 4-12 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux du bloc D à T9

Bloc	Date	Référence sur terrain	Culture	Plante couverture	gestion du sol	Fumure	gestion des résidus	Pi _{hydrosoluble} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{résine} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	Po _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	P total (mg P kg ⁻¹)
D	T9	PCP D1 b	Rota	S3	LB	Fu	exporté	-	2.52	-	-	-
D	T9	PCP D1 c	Rota	S3	LB	FM	exporté	-	5.33	-	-	-
D	T9	PCP D2 b	Rota	S1	LB	FM	exporté	-	11.93	-	-	-
D	T9	PCP D3 b	Rota	S1	LB	Fu	exporté	-	2.80	-	-	-
D	T9	PCP D4 b	Riz	S3	LB	Fu	exporté	-	3.41	-	-	-
D	T9	PCP D4 c	Riz	S3	LB	FM	exporté	-	9.89	-	-	-
D	T9	PCP D5 b	Rota	S3	SCV	FM	restitué	-	11.10	-	-	-
D	T9	PCP D6 b	Rota	S3	SCV	Fu	restitué	-	5.60	-	-	-
D	T9	PCP D9 b	Riz	S1	LB	Fu	exporté	-	2.97	-	-	-
D	T9	PCP D10 b	Riz	S1	LB	FM	exporté	-	6.78	-	-	-
D	T9	PCP D12	Riz	S2	SCV	Fu	restitué	-	2.51	-	-	-
D	T9	PCP D13	Riz	S2	SCV	FM	restitué	-	4.74	-	-	-
D	T9	PCP D14	Rota	S2	SCV	Fu	restitué	-	9.78	-	-	-
D	T9	PCP D15	Rota	S2	SCV	FM	restitué	-	11.78	-	-	-
D	T9	PCP D19 b	Riz	S1	SCV	FM	restitué	-	18.30	-	-	-
D	T9	PCP D20 b	Riz	S1	SCV	Fu	restitué	-	11.18	-	-	-
D	T9	D21 b	Rota	S1	SCV	FM	restitué	-	8.67	-	-	-
D	T9	PCP D22 b	Rota	S1	SCV	Fu	restitué	-	11.41	-	-	-
D	T9	PCP D23 b	Riz	S3	SCV	FM	restitué	-	3.13	-	-	-
D	T9	PCP D24 b	Riz	S3	SCV	Fu	restitué	-	6.11	-	-	-
D	T9	PCP D27	Riz	S2	LB	Fu	exporté	-	6.32	-	-	-
D	T9	PCP D28	Riz	S2	LB	FM	exporté	-	11.68	-	-	-
D	T9	PCP D29	Rota	S2	LB	Fu	exporté	-	9.14	-	-	-
D	T9	PCP D30	Rota	S2	LB	FM	exporté	-	13.15	-	-	-

Annexe 4-13 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux de blocs A et B au niveau des plantes de légumineuses à T9

Bloc	Date	Référence sur terrain	Culture	Plante couverture	gestion du sol	Fumure	gestion des résidus	Pi _{hydrosoluble} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{résine} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	Po _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	P total (mg P kg ⁻¹)
A	T9	PCP 8b	Rota	S1	SCV	Fu	restitué	-	8.47	-	-	-
A	T9	PCP 9b	Rota	S1	SCV	FM	restitué	-	9.03	-	-	-
A	T9	PCP 10b	Rota	S3	SCV	Fu	restitué	-	2.89	-	-	-
A	T9	PCP 11b	Rota	S3	SCV	FM	restitué	-	9.19	-	-	-
A	T9	PCP 12	Rota	S2	SCV	FM	restitué	-	11.09	-	-	-
A	T9	PCP 13	Rota	S2	SCV	Fu	restitué	-	3.77	-	-	-
A	T9	PCP 16	Rota	S2	LB	FM	labouré	-	1.56	-	-	-
A	T9	PCP 17	Rota	S2	LB	Fu	labouré	-	2.79	-	-	-
A	T9	PCP 20b	Rota	S1	LB	Fu	labouré	-	4.52	-	-	-
A	T9	PCP 21b	Rota	S1	LB	FM	labouré	-	7.07	-	-	-
A	T9	PCP 22b	Rota	S3	LB	Fu	labouré	-	1.78	-	-	-
A	T9	PCP 22c	Rota	S3	LB	FM	labouré	-	3.22	-	-	-
B	T9	PCP 1b	Rota	S1	SCV	Fu	restitué	-	5.60	-	-	-
B	T9	PCP 2b	Rota	S1	SCV	FM	restitué	-	12.65	-	-	-
B	T9	PCP 9b	Rota	S1	LB	FM	labouré	-	6.93	-	-	-
B	T9	PCP 10b	Rota	S1	LB	Fu	labouré	-	3.19	-	-	-
B	T9	PCP 11	Rota	S2	SCV	FM	restitué	-	7.14	-	-	-
B	T9	PCP 12	Rota	S2	SCV	Fu	restitué	-	2.32	-	-	-
B	T9	PCP 15b	Rota	S3	LB	FM	labouré	-	4.53	-	-	-
B	T9	PCP 15c	Rota	S3	LB	Fu	labouré	-	9.48	-	-	-
B	T9	PCP 16b	Rota	S3	SCV	FM	restitué	-	18.64	-	-	-
B	T9	PCP 17b	Rota	S3	SCV	Fu	restitué	-	5.29	-	-	-
B	T9	PCP 20	Rota	S2	LB	Fu	labouré	-	5.36	-	-	-
B	T9	PCP 21	Rota	S2	LB	FM	labouré	-	8.63	-	-	-

Annexe 4-14 : Résultats de l'essai au champ des systèmes culturaux de blocs C et D au niveau des plantes de légumineuses à T9

Bloc	Date	Référence sur terrain	Culture	Plante couverture	gestion du sol	Fumure	gestion des résidus	Pi _{hydrosoluble} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{résine} (mg P kg ⁻¹)	Pi _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	Po _{Olsen} (mg P kg ⁻¹)	P total (mg P kg ⁻¹)
C	T9	PCP 17	Rota	S2	SCV	FM	restitué	-	14.50	-	-	-
C	T9	PCP 18	Rota	S2	SCV	Fu	restitué	-	5.29	-	-	-
C	T9	PCP 19b	Rota	S3	SCV	Fu	restitué	-	14.71	-	-	-
C	T9	PCP 20b	Rota	S3	SCV	FM	restitué	-	3.72	-	-	-
C	T9	PCP 21b	Rota	S3	LB	Fu	labouré	-	3.82	-	-	-
C	T9	PCP 21c	Rota	S3	LB	FM	labouré	-	3.83	-	-	-
C	T9	PCP 22b	Rota	S1	LB	Fu	labouré	-	4.71	-	-	-
C	T9	PCP 23b	Rota	S1	LB	FM	labouré	-	5.03	-	-	-
C	T9	PCP 26	Rota	S2	LB	FM	labouré	-	4.08	-	-	-
C	T9	PCP 27	Rota	S2	LB	Fu	labouré	-	2.32	-	-	-
C	T9	PCP 28b	Rota	S1	SCV	FM	restitué	-	-	-	-	-
C	T9	PCP 29b	Rota	S1	SCV	Fu	restitué	-	11.23	-	-	-
D	T9	PCP 1b	Rota	S3	LB	Fu	labouré	-	3.83	-	-	-
D	T9	PCP 1c	Rota	S3	LB	FM	labouré	-	4.02	-	-	-
D	T9	PCP 2b	Rota	S1	LB	FM	labouré	-	3.36	-	-	-
D	T9	PCP 3b	Rota	S1	LB	Fu	labouré	-	10.93	-	-	-
D	T9	PCP 5b	Rota	S3	SCV	FM	restitué	-	2.61	-	-	-
D	T9	PCP 6b	Rota	S3	SCV	Fu	restitué	-	2.88	-	-	-
D	T9	PCP 14	Rota	S2	SCV	Fu	restitué	-	19.95	-	-	-
D	T9	PCP 15	Rota	S2	SCV	FM	restitué	-	7.20	-	-	-
D	T9	PCP 21b	Rota	S1	SCV	FM	restitué	-	6.41	-	-	-
D	T9	PCP 22b	Rota	S1	SCV	Fu	restitué	-	4.06	-	-	-
D	T9	PCP 29	Rota	S2	LB	Fu	labouré	-	5.96	-	-	-
D	T9	PCP 30	Rota	S2	LB	FM	labouré	-	4.77	-	-	-

Author : RAMAROSON Henintsoa Volaniaina

Title: **Incidence des modes de gestion des sols et des restitutions organiques sur la disponibilité du phosphore dans un sol sur « TANETY » des Hautes Terres de Madagascar (cas d'Andranomanelatra)**

Number of pages: 63

Number of tables: 10

Number of figures : 25

Number of annexes: 14

ABSTRACT

The upland soils (Tanety) of the highland of Madagascar, which are mostly Ferralsols, occupy most of the area suitable for cultivation. They are generally acidic and characterized by high phosphorus (P) retention capacity and low available phosphorus contents in the soil. The later constitutes a limiting factor in agricultural production. Therefore, it is necessary to enhance the development of the agriculture in this type of landscape.

The aim of this study is to propose sustainable management practices for the Tanety of the highland of Madagascar. In fact, a long-term experiment has been established in 2002 by the PCP/SCRid in Andranomanelatra, in order to conduct a diachronic study. This experimentation combines various soil management practices (zero-tillage - conventional tillage); different fertilizer inputs, i.e. only as organic form (Fu: 5 t ha⁻¹ of farmyard manure) or as mixed organo-mineral inputs (FM: 5 t ha⁻¹ of manure + 500 kg ha⁻¹ of dolomite + 300 kg NPK ha⁻¹ (11 -22 to 16) + 100 kg ha⁻¹ of urea); and rice in rotation with corn associated with grain legume or eleusine. Soil samples were collected in June 2003 (T1 = one year after the beginning of the experiment), in 2007 (T5) and in 2011 (T9) from the 0-5 cm horizon in order to determine the different forms and quantities of P in the various cropping systems. Analyses of phosphorus have been made to determine the available and total P contents through the following five methods (water-soluble Pi, Pi_{resin}, Pi_{Olsen}, Po_{Olsen}, and total P) for T1, T5 and T9. For T9, the Pi_{resin} is the only analysis that has been made.

The results showed that the concentration in water-soluble Pi varies from 0 to 0.21 mg P kg⁻¹ for T1 and T5, which exceeds the minimum value of the Ferralsols (0.005 mg P L⁻¹). The Pi_{resin} content varied from 0.78 to 15.03 mg P kg⁻¹ in T1, from 0.63 to 20.73 mg P kg⁻¹ in T5, and from 0 to 23.59 mg P kg⁻¹ in T9. These results confirm that the fertilization and the management of soil have effects on P availability of the soil. The Pi_{Olsen} varied from 3.34 to 28.48 mg P.kg⁻¹ for T1 and from 2.70 to 28.07 mg P kg⁻¹ for T5. The Po_{Olsen} varied from 0.08 to 21.49 mg P kg⁻¹ for T1 and from 0 to 24.39 mg P kg⁻¹ for T5. Finally, the concentration in total P ranged from 174.74 to 470.36 mg P kg⁻¹ for T1 and from 263.21 and 655.41 mg P kg⁻¹ for T5. However, more research, such as the determination of the content in P at T0 and the assessment of P stocks in depth, are needed to complete these results in order to validate them at broader scale.

Key words: Ferralsol, tanety, phosphorus availability, water-soluble Pi, Pi_{resin}, Pi_{Olsen}, Po_{Olsen}, total P.

DIRECTEURS DE MEMOIRE : Dr ANDRIAMALAZA Sahondra

Dr Thierry BECQUER

ADRESSE DE L'AUTEUR : Lot IAB 12F Ambohidrapeto, Itaosy, Antananarivo 102

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

FORMATION DOCTORALE SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'EVOLUTION

OPTION : GEORIQUES ET ENVIRONNEMENT

FILIERE : PEDOLOGIE APPLIQUEE

Courriel : volaniainah.ramaroson@gmail.com

Tél : + 261 33 14 147 58

Auteur : RAMAROSON Henintsoa Volaniaina

Titre: **Incidence des modes de gestion des sols et des restitutions organiques sur la disponibilité du phosphore dans un sol sur « TANETY » des Hautes Terres de Madagascar (cas d'Andranomanelatra)**

Number of pages: 63

Number of tables: 10

Number of figures: 25

Number of annexes: 14

RESUME

Les sols de *tanety* des Hautes Terres de Madagascar, qui sont majoritairement des Ferralsol, occupent la majorité des surfaces agricoles utiles. Ils sont généralement acides et caractérisés par une forte capacité de rétention du P et une faible teneur en phosphore disponible dans le sol, ce qui constitue un facteur limitant la production agricole. La mise en valeur de *tanety* est nécessaire face au nécessaire développement de la production agricole.

Cette étude vise à proposer des modes de gestion durable des *tanety* des Hautes Terres de Madagascar. A cet effet, un essai à long terme a été installé en 2002 par le PCP/SCRID à Andranomanelatra, afin de mener une étude diachronique. Cet essai combine divers modes de travail du sol (SCV – Labour), des apports de fertilisants uniquement sous forme organique (Fu : 5 t ha⁻¹ de fumier de ferme) et des apports mixtes (FM : 5 t ha⁻¹ de fumier + 500 kg ha⁻¹ la dolomie + 300 kg ha⁻¹ NPK (11-22-16) + 100 kg ha⁻¹ urée) et des cultures associées (haricot, soja, éleusine) dans une rotation riz / maïs + plantes associées. Des prélèvements de sol ont été réalisés en juin 2003 (après un an de culture = T1), en 2007 (T5) et en 2011 (T9). L'objectif de la présente étude est de déterminer les différentes formes et la quantité de phosphore (P) dans les divers systèmes de culture, dans l'horizon 0-5 cm de profondeur. Des analyses du phosphore ont été réalisées pour déterminer les teneurs en P total et évaluer la disponibilité du P dans le sol suivant cinq méthodes (Pi hydrosoluble, Pi résine, Pi Olsen, Po Olsen, P total) pour T1, T5 et T9. Pour T9, seule l'analyse du Pi résine a été réalisée.

Les résultats ont montré que la concentration en Pi hydrosoluble varie de 0 à 0,21 mg P.kg⁻¹ pour T1 et T5, ce qui dépasse la valeur minimale des Ferralsols : 0,005 mg P l⁻¹ (Rabeharisoa, 2004). La teneur en P disponible par les résines échangeuses d'ions (Pi résine) varie de 0,8 à 15 mg P.kg⁻¹ à T1, de 0,6 à 20,7 mg P.kg⁻¹ à T5, et de 0 à 23,6 mg P.kg⁻¹ à T9. Elle présente une différence significative marquée par les effets de la fertilisation et de la gestion du sol. La teneur en Pi Olsen varie de 3,3 à 28,5 mg P.kg⁻¹ pour T1 et de 2,7 à 28,1 mg P.kg⁻¹ pour T5. Celle de Po Olsen varie de 0,08 à 21,5 mg P.kg⁻¹ pour T1 et de 0 à 24,4 mg P.kg⁻¹ pour T5. Enfin, la concentration en P total se situe entre 174 et 470 mg P.kg⁻¹ pour T1 et entre 263 et 655 mg P.kg⁻¹ pour T5. Toutefois, des recherches complémentaires comme la détermination de la teneur en P à T0 et l'évaluation des stocks en profondeur, au delà de l'horizon 0-5 cm, devraient compléter ces résultats en vue de les valider à une échelle plus générale.

Mots clés : Ferralsol, *tanety*, disponibilité du P, Madagascar, Pi hydrosoluble, Pi résine, Pi Olsen, Po Olsen, P total.

DIRECTEURS DE MEMOIRE : Dr ANDRIAMALAZA Sahondra

Dr Thierry BECQUER

ADRESSE DE L'AUTEUR : Lot IAB 12F Ambohidrapeto, Itaosy, Antananarivo 102

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

FORMATION DOCTORALE SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'EVOLUTION

OPTION : GEORIQUES ET ENVIRONNEMENT

FILIERE : PEDOLOGIE APPLIQUEE

Courriel : volaniainah.ramaroson@gmail.com

Tél : + 261 33 14 147 58