

**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES
DEPARTEMENT DES EAUX ET FORETS
DEA – PROMOTION VOARY**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES
Foresterie – Développement – Environnement

**Disponibilité et dynamique du carbone, de l'azote et du phosphore sous association
culturelle Riz-Haricot soumise à différents types de fertilisation phosphatée apportée à
dose croissante.
Cas de l'expérimentation agronomique de Lazaina sur sol ferrallitique de « tanety »**

Par

HENINTSOA Manitranirina

Ingénieur Agronome

Soutenu publiquement le 03 Juillet 2013 devant le jury composé de :

Jean de Neupomuscène RAKOTOZANDRINY
Professeur titulaire ESSA

Président

Lilia RABEHARISOA
Professeur ESSA

Rapporteur

Thierry BECQUER
Directeur de recherche IRD

Co-Rapporteur

Marie-Antoinette RAZAFINDRAKOTO
Professeur ESSA

Examineur

Jean-Chrysostôme RANDRIAMBOAVONJY
Professeur ESSA

Examineur





**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES
DEPARTEMENT DES EAUX ET FORETS
DEA – PROMOTION VOARY**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES
Foresterie – Développement – Environnement

**Disponibilité et dynamique du carbone, de l'azote et du phosphore sous association
culturelle Riz-Haricot soumise à différents types de fertilisation phosphatée apportée à
dose croissante.
Cas de l'expérimentation agronomique de Lazaina sur sol ferrallitique de « tanety »**

Par

HENINTSOA Manitrarinina

Ingénieur Agronome

Soutenu publiquement le 03 Juillet 2013 devant le jury composé de :

Jean de Neupomuscène RAKOTOZANDRINY
Professeur titulaire ESSA

Président

Lilia RABEHARISOA
Professeur ESSA

Rapporteur

Thierry BECQUER
Directeur de recherche IRD

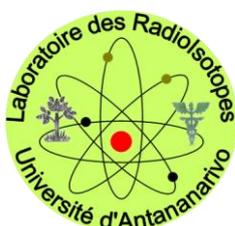
Co-Rapporteur

Marie-Antoinette RAZAFINDRAKOTO
Professeur ESSA

Examineur

Jean-Chrysostôme RANDRIAMBOAVONJY
Professeur ESSA

Examineur



Remerciements

Devant l'accomplissement de ce travail, je rends grâce au Seigneur Dieu sans qui rien n'est accompli. Je tiens aussi à adresser toute ma gratitude envers les personnes qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire.

Je tiens personnellement à remercier les membres du jury de ce mémoire :

- Mr Jean de Neupomuscène RAKOTOZANDRINY, Professeur titulaire à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques qui, malgré ses nombreuses responsabilités, a accepté de présider le jury de ce mémoire. Veuillez retrouver ici mes remerciements les plus sincères
- Mme Marie-Antoinette RAZAFINDRAKOTO, Professeur à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, qui a accepté d'examiner ce modeste mémoire. Veuillez retrouver mes profondes reconnaissances
- Mr Jean-Chrysostôme RANDRIAMBOAVONJY, Professeur à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, qui a accepté d'examiner ce mémoire. Veuillez retrouver ici mes vifs remerciements
- Mme Lilia RABEHARISOA, Professeur à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques et non moins Directeur du Laboratoire des Radioisotopes, qui a dirigé ce mémoire. Un grand merci pour votre accueil au LRI et vos encouragements
- Mr Thierry BECQUER, Docteur HDR, Directeur de Recherche à l'UMR Eco&Sols de l'IRD, qui a codirigé ce mémoire. Un grand merci pour vos conseils, votre encadrement sans faille et surtout pour les soutiens financiers.

Je tiens à remercier Mr Bruno Salomon RAMAMONJISOA, Professeur à l'ESSA-Forêt et Responsable de la Formation 3^{ème} Cycle du même Département.

Je tiens aussi à remercier mes parents et mes deux frères pour leurs encouragements. Je n'oublierai pas l'équipe du Laboratoire des Radioisotopes sans qui ce travail n'aurait pas pu voir le jour. Je tiens spécialement à remercier :

- Mr Andry ANDRIAMANANJARA et Mme Marie-Paule RAZAFIMANANTSOA qui m'ont aidé lors de la mise en place de l'expérimentation
- Tous les Chercheurs du LRI et de l'UMR Eco&Sols de l'IRD
- Tous les techniciens du LRI
- Tous les stagiaires en DEA et en Ingéniorat au LRI
- Tous mes amis de la Promotion VOARY (DEA)
- Tous mes amis de la Promotion AMPINGA
- Tous ceux qui me connaissent

Un grand merci à tous,

Rina.



Présentation du Projet et des Partenaires

Le projet Fabatropimed dans lequel s'inscrit ce mémoire de DEA est l'un des trois grands projets fédérateurs financés par Agropolis Fondation à partir de 2011. Il regroupe pour une durée de quatre ans 15 équipes des UMR Eco&Sols, Innovation, LSTM et les unités UPR SCA du CIRAD Montpellier et Diascope de l'INRA du campus de Montpellier en partenariat avec des pays africains comme le Maroc, la Tunisie, l'Algérie, le Burkina-Faso et Madagascar.

Fabatropimed a pour objectif d'augmenter le bénéfice des légumineuses pour les systèmes de culture céréalière et l'environnement dans des agro-écosystèmes d'Afrique méditerranéenne et tropicale :

- par réduction de l'utilisation des fertilisants minéraux et augmentation de la séquestration du carbone,
- par augmentation des interactions entre les microorganismes du sol pour l'acquisition et l'utilisation de l'azote et du phosphore par les plantes.

Quatre principaux work package (WP) sont prévus dans le cadre de ce projet et le présent mémoire s'inscrit dans le WP2 qui consiste notamment à identifier et caractériser les cycles et la dynamique du carbone, de l'azote et du phosphore dans le système sol-plante. L'UMR Eco&Sols de l'IRD et le Laboratoire des Radioisotopes sont les principaux acteurs du projet à Madagascar en mettant en place une expérimentation agronomique qui tente de répondre aux objectifs visés par le projet. Ce mémoire est donc tiré de cette expérimentation agronomique et a pour but d'identifier et caractériser la disponibilité et la dynamique du carbone, de l'azote et du phosphore sous une association faisant intervenir une céréale et une légumineuse. Plus spécifiquement, ce mémoire traitera les aspects biologiques du sol en évaluant la contribution du compartiment microbien du sol dans la séquestration du carbone, la fixation symbiotique et la dynamique de l'azote et enfin la dynamique et la mise à disposition du phosphore.

Résumé

La croissance démographique et la pression sur les bas-fonds sont les principales raisons qui obligent les agriculteurs à mettre en culture les collines ou « tanety ». Cependant, les sols ferrallitiques de « tanety » sont caractérisés par leur acidité et leur faible disponibilité en phosphore (P). Les oxyhydroxides de fer et d'aluminium présents en quantité abondante adsorbent très fortement le P du sol. La fertilisation azotée est complémentaire à la fertilisation phosphatée puisque l'azote (N) participe à l'élaboration du rendement. Toutefois, des apports de N sous forme minérale pourraient avoir des effets néfastes sur la durabilité des ressources naturelles incluant le sol et l'eau. L'association légumineuse-céréale pourrait alors remplacer les apports de N puisque les légumineuses sont aptes à améliorer la fertilité azotée du sol *via* la fixation symbiotique de l'azote et faire profiter le N fixé à la céréale associée. Ainsi, pour pouvoir améliorer la disponibilité du P et du N et dans un but final d'amélioration du rendement, une expérimentation agronomique a été mise en place sur un sol ferrallitique de « tanety ». Du riz et du haricot ont été cultivés en intercalaire sur le dispositif expérimental et trois facteurs y ont été étudiés : (i) le mode gestion du sol qui compare un système sans labour (NT) et un système avec labour conventionnel (CT), (ii) les doses d'apport croissant de P minéral sous forme de triple superphosphate (TSP) équivalent à 0, 5, 20 et 50 kg P ha⁻¹ et (iii) les apports de P organique sous forme de fumier (M) ou de résidus de stylosanthès (GM) équivalent à 20 kg P ha⁻¹. Cependant, la combinaison de ces trois facteurs n'était pas complète puisque seuls 14 traitements ont été retenus et chaque traitement a été répété quatre fois. Des prélèvements de sols rhizosphériques et d'échantillons de plante (riz et haricot) ont été réalisés au stade de floraison du haricot et des analyses physico-chimiques et biologiques des échantillons de sol ont été effectuées. Les rendements des deux cultures ont été aussi évalués. Des tests statistiques non-paramétriques à 5% ont été réalisés et les traitements ont été comparés. Les effets du mode de gestion du sol et des formes d'apport de P (TSP seul, TSP+fumier et TSP+résidus de stylosanthès) sur les différents paramètres ont été évalués. Ainsi, les résultats ont montré que les doses d'apport croissant de P ont eu des effets sur la disponibilité du P des sols (P résine) et que cette disponibilité répond mieux à la fertilisation minérale qu'à une fertilisation organo-minérale. Mais en comparant les trois formes d'apport de P, le traitement TSP seul a été le plus efficace chez le haricot. Chez le riz, le même traitement a été le plus efficace pour une dose inférieure à 50 kg P ha⁻¹ mais pour un apport supérieur à cette dose, le traitement TSP+fumier devient intéressant. Par ailleurs, les doses d'apport croissant de P n'ont pas eu d'effets sur le rendement des deux cultures. Le traitement TSP+fumier a permis d'améliorer la disponibilité de l'azote et le rendement des deux cultures par rapport aux deux autres traitements mais il n'a pas permis d'améliorer la disponibilité en P. Aucun effet des apports organiques n'apparaît sur l'activité biologique du sol. Enfin, aucun effet du mode de gestion du sol n'apparaît chez le haricot alors que chez le riz, les effets se sont manifestés sur le pH du sol et le P disponible.

Mots clés : phosphore, azote, biomasse microbienne, association de culture, sol ferrallitique

Abstract

Population growth and land pressure are the main reasons that force farmers to cultivate hills or "tanety". Ferralitic soils of "tanety" are characterized by their acidity and low phosphorus availability. Indeed, oxyhydroxids of iron and aluminum in soil adsorb strongly soil phosphorus (P). Nitrogen fertilization is complementary to phosphorus fertilization as nitrogen (N) involved in yield elaboration. Mineral N inputs could have adverse effects on the sustainability of natural resources including soil and water. In addition, cereal-legume association could replace N inputs because legumes are able to improve soil fertility through nitrogen symbiotic fixation and transfer fixed N to the associated cereal. In order to improve the P and N availability and yield, an agronomic experiment was carried out on a ferralitic soil of "tanety". Rice and bean were grown in intercropping on the experimental device and three factors have been studied : (i) soil management that compares no-till (NT) and conventional tillage (CT), (ii) mineral phosphorus inputs as triple superphosphate (TSP) equivalent to 0, 5, 20 and 50 kg P ha⁻¹ and (iii) organic P inputs as manure (M) or stylosanthès residues (GM) equivalent to 20 kg P ha⁻¹. However, the combination of these three factors was not complete since only 14 treatments were selected and each treatment was repeated four times. Rhizospheric soils and plant samples (rice and bean) were collected at flowering stage of bean and physico-chemical and biological analysis of soil samples were carried out. The yields of both crops were also assessed. Nonparametric statistical tests were performed at 5% and results were compared. Effects of soil management and forms of P input (TSP alone, TSP+manure and TSP+stylosanthès residues) on all parameters were assessed. The results showed that the increasing doses of P input had effects on P availability (resin P) and this availability is more responsive to mineral fertilization than organo-mineral fertilizers. Comparing the three forms of P input, the TSP treatment was the most effective for bean. For rice, the same treatment was more effective for less than 50 kg P ha⁻¹ input but above this dose, the TSP+manure becomes interesting. Although, the increasing doses of P did not have effect on the yield of both bean and rice. On the one side, TSP+manure treatment improved the nitrogen availability and yield compared to the other treatments. On the other side, TSP+manure does not improve the availability of P. In addition, organic matter inputs did not have effects on the soil biological activity. Finally, no effect of soil management appears in bean while in rice, the effects were on the soil pH and available P.

Keywords: phosphorus, nitrogen, microbial biomass, intercropping, ferralitic soil

Famintinana

Ny fotombon'ny mponina sy ny fahateren'ny lohasaha azo volena no tena antony lehibe mahatonga ny tantsaha hamboly eny amin'ny tanety. Ny tany mena eny amin'ny tanety eny anefa dia fantatra fa asidra ary kely ny fatran'ny faosfaoro azon'ny voly alaina avy aminy. Ny fahabetsahan'ny fatran'ny oksihidroksidana vy sy viraty ao amin'io karazana tany io tokoa mantsy no mahatonga azy hamikitra mafy ny faosfaoro ao aminy. Ny fitondrana azaoty ho fanampin'ny faosfaoro koa dia tena zava-dehibe satria ny azaoty dia mandray anjara feno amin'ny fahatomombanan'ny vokatra. Ny fitondrana azaoty mineraly anefa dia mety hisy vokadratsy eo amin'ny voaary indrindra ny tany sy ny rano. Ny fampivadiana ny legiomezy sy serealy ary dia fomba iray ahafahana mitondra azaoty satria ny legiomezy dia afaka mampitombo ny fatran'ny azaoty ao amin'ny tany amin'ny alalan'ny fifikirana ny azaotin'ny soson-drivotra ary manome izany ho an'ily serealy volena miaraka aminy. Mba ho fanatsarana ny fatran'ny azaoty sy faosfaoro azon'ny voly ampiasaina sy mba hanatsarana ny vokatra dia nisy andrana natao teo amina tany mena tamina tanety. Vary nampivadiana tamin'ny tsaramaso no novolena teo ary miisa telo ireo mpihazaka narahi-maso nandritra ny andrana dia (i) ny fiasana na tsia ny tany, (ii) ny fitondrana faosfaoro mineraly tamin'ny alalan'ny TSP ka 0, 5, 20 ary 50 kg F ha⁻¹ no nentina tamin'izany ary farany (iii) ny fitondrana faosfaoro organika tamin'ny alalan'ny zezi-pahitra na fako-na stylosanthès ka mitovy amin'ny 20 kg F ha⁻¹ ny fatra nentina. Tsy voavady tanteraka anefa ireo mpihazaka telo ireo satria miisa 14 monja ireo tranga natao andrana ary ny tranga iray dia naverina inefatra. Nony namelana ny tsaramaso dia naka santionan-tany niraikitra tamin'ny fako sy santionan-javamaniry hatao tsikera fizika, simika ary biolojika. Nosandaina ihany koa ny vokatra azo tamin'ireo voly roa. Rehefa azo ireo valin'ny tsikera sy ny vokatra dia notontosaina ny sedra ara-statistika tsy ara-mpihazaka nampiasaina tokonana 5% ary nampitahaina ireo tranga samihafa. Nodinihina manokana ny vokatra ny fiasana na tsia ny tany sy ny endrika nitondrana ny faosfaoro. Noho izany ary dia hita fa nisy fiatraikany teo amin'ny fatran'ny faosfaoro azon'ny voly ampiasaina ny fitondrana zezika faosfaoro ary ny fampiasana faosfaoro mineraly dia nanatsara bebe kokoa io fatran'ny faosfaoro azon'ny voly ampiasaina io noho ny fampiasana faosfaoro organika sy mineraly mitambatra. Rehefa ampitahaina anefa ireo endrika nitondrana ny faosfaoro dia hita fa ny TSP no tena nandaitra indrindra tamin'ny tsaramaso. Ho an'ny vary dia io TSP io ihany koa no tena nandaitra ho an'ny fatra latsaky ny 50 kg F ha⁻¹; raha mihoatra io fatra io kosa no entina dia ny TSP+zezi-pahitra no tsara ampiasaina. Tsy nahitana fiatraikany tamin'ny vokatra kosa anefa ny fitondrana faosfaoro amin'ny fatra misonga. Ny TSP+zezi-pahitra kosa dia nahafahana nahazo fatran'azaoty ambony sy vokatra tsara indrindra mihoatra ny TSP sy TSP+fako-na stylosanthès. Tsy nahafahana nanatsara ny fatran'ny faosfaoro azon'ny voly ampiasaina kosa anefa ny TSP+zezi-pahitra. Tsy nisy fiatraikany teo amin'ny fiainana ara-biolojikan'ny tany ny fitondrana zezi-pahitra sy fako-na stylosanthès. Ary farany, ho an'ny tsaramaso dia tsy nisy fiatraikany ny fiasana na tsia ny tany fa ho an'ny vary kosa dia nisy izany teo amin'ny maha asidra ny tany sy ny fatran'ny faosfaoro azon'ny voly ampiasaina.

Teny fanalahidy: faosfaoro, azaoty, ahabetsahan'ny mikroba, fampivadianam-boly, tany mena

Table des matières

Liste des tableaux	i
Liste des figures	i
Liste des acronymes	ii
Liste des unités	iii
1. Introduction	1
2. Etat des connaissances	3
2.1. Les sols ferrallitiques	3
2.1.1. Les sols ferrallitiques dans le monde	3
2.1.2. Les sols ferrallitiques à Madagascar	3
2.2. Le phosphore dans le système sol-plante	5
2.2.1. Rôles du phosphore dans les plantes	5
2.2.2. Les différentes formes du phosphore dans le sol	5
2.2.3. Dynamique du phosphore dans le système sol-plante.....	6
2.2.4. Statut phosphaté des sols ferrallitiques de « tanety ».....	7
2.3. L'azote dans le système sol-plante	8
2.3.1. Rôles de l'azote dans les plantes.....	8
2.3.2. Les formes d'azote dans le sol.....	8
2.3.2.1. L'azote organique.....	8
2.3.2.2. L'azote inorganique.....	9
2.3.3. Dynamique de l'azote dans le système sol-plante	9
2.3.3.1. Assimilation de l'azote par les plantes	9
a. Assimilation de nitrate (NO_3^-)	9
b. Assimilation de l'ion ammonium (NH_4^+).....	10
2.3.3.2. Les processus de gain d'azote autre que la fertilisation.....	10
a. La fixation symbiotique d'azote atmosphérique.....	10

b.	Les autres apports atmosphériques	11
2.3.3.3.	Les processus de pertes d'azote	11
a.	Dénitrification.....	11
b.	Volatilisation	12
c.	Lixiviation	12
d.	Erosions.....	12
2.3.3.4.	Processus majeurs régissant la dynamique de l'azote dans le sol	13
a.	Ammonification.....	13
b.	Nitrification	13
c.	Immobilisation/Réorganisation.....	13
2.4.	Le carbone dans le sol.....	15
2.4.1.	Le carbone et la matière organique du sol.....	15
2.4.2.	Rôle de la matière organique dans le sol	15
2.4.3.	Le cycle du carbone	16
2.5.	Biomasse microbienne carbone, azote et phosphore du sol	16
3.	Matériel et méthodes	18
3.1.	Problématiques et Hypothèses.....	18
3.1.1.	Problématiques	18
3.1.2.	Hypothèses	19
3.2.	Méthodologie	22
3.2.1.	Site expérimental	22
3.2.2.	Matériels végétaux.....	23
3.2.3.	Dispositif expérimental	23
3.2.3.1.	Intrants apportés.....	25
a.	Le fumier	25
b.	Les résidus de stylosanthès.....	26
c.	Le triple superphosphate et le sulfate de potassium.....	26
3.2.3.2.	Suivis et soins apportés	27
3.2.4.	Prélèvements de sols et de matériels végétaux au stade floraison du haricot	27
3.2.5.	Estimation du rendement du haricot et du riz	28

3.2.5.1.	Méthodes de récolte du haricot	28
3.2.5.2.	Méthodes de récolte du riz	29
3.2.6.	Analyses au laboratoire	30
3.2.6.1.	Détermination du carbone et de l'azote microbien du sol	30
3.2.6.2.	Détermination du phosphore microbien du sol et du phosphore disponible	30
3.2.6.3.	Détermination du carbone organique du sol	31
3.2.6.4.	Détermination de l'azote minéral du sol (NH_4^+ et NO_3^-)	32
3.2.6.5.	pHeau et pHKCl du sol	32
3.2.7.	Analyses statistiques	32
4.	Résultats et interprétations	34
4.1.	Rendements du haricot et du riz	34
4.2.	Biomasse microbienne carbone et phosphore microbien des sols rhizosphériques du haricot et du riz	35
4.2.1.	Biomasse microbienne carbone	35
4.2.2.	Phosphore microbien	35
4.3.	Teneurs en carbone organique et en phosphore et azote disponibles des sols rhizosphériques du haricot et du riz	39
4.3.1.	Pourcentages de carbone organique	39
4.3.2.	Teneurs en phosphore disponible (P résine)	39
4.3.3.	Teneurs en azote minéral (nitrate et ammonium)	40
4.4.	pHeau et pHKCl des sols rhizosphériques du haricot et du riz	44
5.	Discussion	47
5.1.	Discussion sur les hypothèses	47
5.1.1.	Hypothèse 1 : La disponibilité du phosphore augmente avec la dose d'apport de phosphore	47
5.1.2.	Hypothèse 2 : Le rendement du haricot et du riz augmente avec la dose d'apport de phosphore	50
5.1.3.	Hypothèse 3 : Le TSP combiné avec du fumier comme apport de phosphore sous forme organique fournira la meilleure disponibilité en N et P ainsi que le meilleur rendement	50
5.1.4.	Hypothèse 4 : L'ajout de matière organique en complément du TSP apporté intensifie l'activité biologique du sol par rapport à des apports exclusivement minéraux	53

5.1.5. Hypothèse 5 : Le mode de gestion du sol aurait des effets significatifs sur les paramètres physico-chimiques et biologiques du sol ainsi que sur le rendement des deux cultures.....	54
5.2. Discussion sur les points forts et les limites de l'étude.....	55
5.2.1. Points forts de l'étude.....	55
5.2.2. Limites de l'étude	55
6. Conclusion et perspectives	57
Références bibliographiques	59
Annexes.....	67
Annexe1. Quelques photos lors de la préparation des parcelles du dispositif expérimental de Lazaina.....	67
Annexe 2. Quelques photos lors de la mise en place de l'essai	68
Annexe 3. Quelques photos des parcelles du dispositif un mois après le semis	69
Annexe 4. Quelques photos lors du prélèvement des sols rhizosphériques au stade floraison du haricot.....	70
Annexe 5. Quelques photos sur les analyses biologiques réalisées au laboratoire	71

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques du sol du site d'expérimentation avant la mise en place du premier essai en 2006.	22
Tableau 2. Les 14 traitements retenus pour le dispositif expérimental	25
Tableau 3. Teneurs en phosphore, en azote et en carbone du fumier et des résidus de stylosanthès apportés	26
Tableau 4. Rendement du haricot et résultats des analyses physico-chimiques et biologiques des sols rhizosphériques de haricot.....	37
Tableau 5. Rendement du riz et résultats des analyses physico-chimiques et biologiques des sols rhizosphériques de riz	38
Tableau 6. Comparaison des paramètres étudiés en fonction du mode de gestion du sol (CT vs. NT). Cas du haricot.....	42
Tableau 7. Comparaison des paramètres étudiés en fonction du mode de gestion du sol (CT vs. NT). Cas du riz.....	43
Tableau 8. Comparaison des paramètres étudiés en fonction des formes d'apport de phosphore (TSP seul vs. TSP+fumier vs. TSP+ Résidus de stylosanthès). Cas du haricot sous labour conventionnel....	45
Tableau 9. Comparaison des paramètres étudiés en fonction des formes d'apport de phosphore (TSP seul vs. TSP+fumier vs. TSP+ Résidus de stylosanthès). Cas du riz sous labour conventionnel	46

Liste des figures

Figure 1. Carte pédologique de Madagascar. Classification CPCS	4
Figure 2. Dynamique du phosphore dans le système sol-plante.	7
Figure 3. Cycle simplifié de l'azote	14
Figure 4. Cycle simplifié du carbone	16
Figure 5. Sites de prélèvement de matériels végétaux et de sol au sein d'une parcelle. Exemple d'une parcelle subdivisée en deux sous-parcelles.	28
Figure 6. Sites de prélèvement des gousses de haricot et des biomasses et grains de riz au moment des récoltes au sein d'une parcelle. Exemple d'une parcelle subdivisée en deux sous-parcelles.	29
Figure 7. Corrélation entre le P résine et le P total apporté sous haricot.....	40
Figure 8. Corrélation entre le P résine et le P minéral apporté sous haricot.....	40
Figure 9. Corrélation entre le P résine et le P total apporté sous riz	40
Figure 10. Corrélation entre le P résine et le P minéral apporté sous riz	40
Figure 11. Effets des 3 formes d'apport du phosphore sur la disponibilité du P chez le haricot.....	48
Figure 12. Effets des 3 formes d'apport du phosphore sur la disponibilité du P chez le riz	49

Liste des acronymes

ADN	: Acide Désoxyribonucléique
ADP	: Adénosine Diphosphate
Al	: Aluminium
ARN	: Acide Ribonucléique
ATP	: Adénosine Triphosphate
C	: Carbone
Ca	: Calcium
CIRAD	: Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
C/N	: Rapport carbone sur azote
Co	: Control (témoin sans apport de phosphore)
CO	: Carbone Organique
C/P	: Rapport carbone sur phosphore
CPCS	: Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols
CT	: Conventional Tillage (labour conventionnel)
Eco&Sols	: Ecologie Fonctionnelle et Biogéochimie des Sols et des Agro-écosystèmes
FAO	: Food and Agriculture Organization
Fe	: Fer
FOFIFA	: Foibe Fikarohana ampiarina amin'ny Fampanandrosoana ny eny Ambanivohitra
FSN	: Fixation Symbiotique de l'Azote
GM	: Green Manure (engrais vert, résidus de stylosanthès dans le cadre de ce mémoire)
GOGAT	: Glutamine Oxoglutarate Aminotransférase
GS	: Glutamine Synthétase
INRA	: Institut National de la Recherche Agronomique
INSTAT	: Institut National de la Statistique
IRD	: Institut de Recherche pour le Développement
K	: Potassium
LRI	: Laboratoire des Radioisotopes
LSTM	: Laboratoire des Symbioses Tropicales et Méditerranéennes
M	: Manure (fumier)
MAEP	: Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche
MOS	: Matière Organique du Sol
N	: Azote
¹⁵N	: Isotope de l'azote dont le noyau est constitué de 7 protons et de 8 neutrons
NAD	: Nicotinamide Adénine Dinucléotide jouant le rôle d'oxydant

NADH	: Nicotinamide Adénine Dinucléotide jouant le rôle de réducteur
NADPH	: Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate jouant le rôle d'oxydo-réducteur
Ndfa	: Nitrogen derived from atmosphere (proportion d'azote provenant de la fixation atmosphérique)
Ndff	: Nitrogen derived from fertilizer (proportion d'azote provenant de l'engrais)
Ndfs	: Nitrogen derived from soil (proportion d'azote provenant du sol)
NT	: No-tillage (sans labour)
P	: Phosphore
pH	: Potentiel hydrogène
p-value	: seuil de probabilité où l'on se trompe si on refuse une hypothèse donnée (le plus souvent H_0)
R²	: Coefficient de détermination
SCV	: Semis direct sur Couverture Végétale permanente
TN	: Total Nitrogen (Azote total)
TOC	: Total Organic Carbon (Carbone organique total)
TSP	: Triple Superphosphate
UMR	: Unité Mixte de Recherche
UPR SCA	: Unité Propre de Recherche Systèmes de Cultures Annuelles
WP	: Work Package
XLSTAT	: Logiciel de statistique et d'analyse de données pour Microsoft Excel

Liste des unités

%	: pour cent
°C	: degré Celsius
µm	: micromètre
cm	: centimètre
cmol kg⁻¹	: centimole par kilogramme
g N kg⁻¹	: gramme d'azote par kilogramme
g	: gramme
kg ha⁻¹	: kilogramme par hectare
kg K ha⁻¹	: kilogramme de potassium par hectare
kg K₂O ha⁻¹	: kilogramme d'oxyde de potassium par hectare
kg P Fumier ha⁻¹	: kilogramme de phosphore issu du fumier par hectare
kg P ha⁻¹	: kilogramme de phosphore par hectare
kg P Stylo ha⁻¹	: kilogramme de phosphore issu des résidus de stylosanthès par hectare

kg P TSP ha⁻¹	: kilogramme de phosphore issu du triple superphosphate par hectare
km	: kilomètre
m	: mètre
m²	: mètre carré
mg C kg⁻¹	: milligramme de carbone par kilogramme
mg N-NH₄⁺ kg⁻¹	: milligramme d'ammonium par kilogramme
mg N-NO₃⁻ kg⁻¹	: milligramme de nitrate par kilogramme
mg P kg⁻¹	: milligramme de phosphore par kilogramme
mg P l⁻¹	: milligramme de phosphore par litre
ml	: millilitre
mm	: millimètre
nm	: nanomètre
ppm	: partie par million
t ha⁻¹	: tonne par hectare

1. Introduction

L'un des défis les plus importants auxquels l'humanité doit faire face aujourd'hui est de conserver les ressources naturelles et l'environnement, y compris le sol et l'eau, tout en augmentant la production alimentaire. Alors que la population mondiale augmente, les pressions sur les ressources naturelles s'accroissent, ce qui rend difficile le maintien de la sécurité alimentaire. La sécurité alimentaire à long terme exige un équilibre entre l'augmentation de la production agricole, le maintien de la « santé » des sols et la durabilité environnementale.

La population malgache n'échappe pas à cette croissance démographique avec un taux annuel de croissance de 2,8% pour atteindre 20,6 million en 2011 (INSTAT, 2012). La production agricole, et surtout rizicole, devrait suivre cette tendance étant donné l'insuffisance alimentaire qui gagne petit à petit le pays aussi bien en zone rurale qu'urbaine. L'augmentation de la production agricole s'avère alors nécessaire voire obligatoire. Les principales solutions pouvant être proposées s'orienteront surtout vers l'intensification des systèmes agricoles, associée en général à des apports d'engrais minéraux, et/ou l'augmentation des surfaces cultivées, en mettant en culture des espaces nouveaux tels que les collines ou « tanety ». Les sols de « tanety » sont des sols ferrallitiques riches en oxyhydroxides de fer et d'aluminium lesquels adsorbent très fortement le phosphore (Rabeharisoa, 2004). Il est alors nécessaire d'utiliser des engrais minéraux fournissant ce nutriment si important pour la production agricole. Cependant, l'utilisation excessive d'engrais minéraux conduit à une diminution de l'efficacité d'utilisation des nutriments (surtout phosphore et azote) et à des effets néfastes sur l'atmosphère (Aulakh et Adhya, 2005) et la qualité des eaux de surface et souterraines (Aulakh *et al.*, 2009) induisant des maladies et accentuant le changement climatique. A Madagascar, en matière de fertilisation, les paysans font appel à des déchets ou à du fumier de ferme en guise de fertilisant et très peu ont recours à des engrais chimiques de synthèse. Du fait du coût élevé de ces intrants et de difficultés de trésorerie des exploitants agricoles, le taux d'utilisation des engrais chimiques est faible en milieu rural car la dose moyenne d'utilisation sur l'ensemble des terres cultivées à Madagascar est de l'ordre de 6 à 8 kg ha⁻¹ en rizière. Ce taux est inférieur à la moyenne des pays africains qui était de 9 kg ha⁻¹ en 1995 (Randrianarisoa, 2003). Ainsi, l'augmentation de la production agricole doit plutôt s'orienter vers l'intensification écologique et la recherche de voies biologiques qui permettront d'obtenir des productions à la fois rentables et durables pour les paysans.

A Madagascar, l'utilisation de légumineuses dans les systèmes de culture (le plus souvent associées au maïs) remonte aux temps anciens puisque cette famille, grâce à la fixation symbiotique de l'azote, favorise la nutrition azotée de la plante qui lui est associée. Cette voie est donc l'une des plus intéressantes qui pourra améliorer la productivité agricole d'autant plus que ce processus est accentué par la présence de nombreux microorganismes du sol qui favorisent, avec les *rhizobia*, la mise en

disponibilité des nutriments notamment du phosphore et de l'azote. C'est dans ce contexte qu'il est important d'évaluer la contribution de ces microorganismes dans la mise à disponibilité et la dynamique du carbone, de l'azote et du phosphore dans le sol en estimant la biomasse microbienne du sol. La détermination de cette biomasse microbienne (carbone, azote et phosphore microbien) constituerait un élément important pour la compréhension de la dynamique du carbone et de la disponibilité de l'azote et du phosphore. Plus particulièrement, la taille de cette biomasse microbienne est proportionnelle au taux de minéralisation de l'azote dans le sol (Chaussod et Houot, 1993) et les activités biologiques se passant dans le sol sont en relation avec cette biomasse microbienne (Smith, 1993). Par ailleurs, le carbone total sous forme vivante est un bon indicateur du statut organique du sol (Pankhurst, 1994 ; Powlson, 1994) et il relève aussi de la composante résilience ou changement d'état du sol (Chaussod, 1996). Le phosphore microbien est un élément crucial puisque le phosphore est l'élément limitant des sols ferrallitiques. Ainsi, ce sera l'occasion d'évaluer la participation du pool microbien du phosphore dans la mise à disponibilité de cet élément. Pour les sols ferrallitiques de "tanety", très peu d'études se sont penchées sur cet aspect biologique du sol.

La présente étude consistera alors à évaluer la disponibilité et la dynamique du carbone, de l'azote et du phosphore dans une expérimentation agronomique installée sur un sol ferrallitique de « tanety » et visant à optimiser l'efficacité d'utilisation du phosphore du triple superphosphate (TSP), du fumier et des résidus de stylosanthès afin d'améliorer la productivité agricole d'un système de culture associant riz et haricot. Ainsi, ce travail débutera par un état des connaissances sur la dynamique du phosphore, de l'azote et du carbone dans le système sol-plante suivi par la partie « matériel et méthodes » incluant problématiques, hypothèses et méthodologie. Les résultats seront par la suite présentés et interprétés puis une discussion axée sur les hypothèses avancées et sur les points forts et les limites de l'étude sera présentée. Enfin, une conclusion et quelques perspectives clôtureront ce mémoire.

2. Etat des connaissances

2.1. Les sols ferrallitiques

2.1.1. Les sols ferrallitiques dans le monde

Les sols ferrallitiques, appellation selon la Classification de la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS), représentent plus de 15 % de la surface de la terre (Buol et Eswaran, 2000). Ils correspondent aux Ferralsols, Cambisols et Nitisols de la Classification de la FAO (Razafimahatratra, 2011). Ces sols ferrallitiques occupent essentiellement toute la ceinture chaude et humide de la planète entre les tropiques du cancer et capricorne. Certains sols, localisés aujourd'hui dans des zones arides et semi-arides ont également des caractères ferrallitiques en raison des caractéristiques climatiques humides dans des temps antérieurs (Boyer, 1982).

Les sols ferrallitiques sont caractérisés par une altération complète de la plupart des minéraux primaires (péridotes, amphiboles, feldspaths, feldspathoïdes, micas...), avec possibilité d'élimination de la majeure partie des bases alcalino-terreuses et d'une grande partie de la silice. Les produits d'altération conduisent à la néoformation de minéraux secondaires notamment : des argiles aluminosilicatés de la famille de la kaolinite ; des hydroxydes d'alumine (gibbsite et produits amorphes) ; des hydroxydes et oxydes de fer (goethite, hématite et produits amorphes) (Razafimahatratra, 2011). Quelques minéraux primaires non altérés persistent dans ces sols (minéraux hérités), en particulier une importante quantité de quartz résiduel, ainsi que des minéraux comme l'ilménite, la magnétite, l'illite.

2.1.2. Les sols ferrallitiques à Madagascar

A Madagascar, les sols ferrallitiques revêtent une importance particulière puisqu'ils couvrent près des 46% de la surface de la grande île (Delenne et Pelletier, 1981 *In* Razafimahatratra, 2011). Les sols ferrallitiques malgaches sont des sols profonds, caractérisés par une décomposition très poussée des minéraux primaires. Ils ont une forte teneur en sesquioxydes de fer et d'aluminium. Les minéraux argileux sont constitués par de la kaolinite et de la gibbsite ; l'illite lorsqu'elle est présente, ne l'est qu'à titre temporaire et elle ne s'observe que dans les sols jeunes. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est inférieur ou au plus égal à 2. La couleur généralement vive des horizons supérieurs est liée à la présence de fortes quantités de sesquioxydes de fer individualisés (Aubert, 1965). Dans les horizons jaunes, le fer se présente presque exclusivement sous forme de goethite. Dans les horizons rouges il peut exister, en partie, sous forme de goethite ; dans ce cas, on note une proportion variable, mais toujours importante, de fer amorphe ou d'hématite (Segalen, 1969).

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. Dans celui-ci on a reconnu, dans les régions humides, des minéraux primaires assez profondément altérés.

Par ailleurs, les sols ferrallitiques se forment sous un climat agressif caractérisé par une pluviométrie et une température élevée, la saison chaude correspondant à la saison des pluies (Bourgeat et Aubert, 1971).

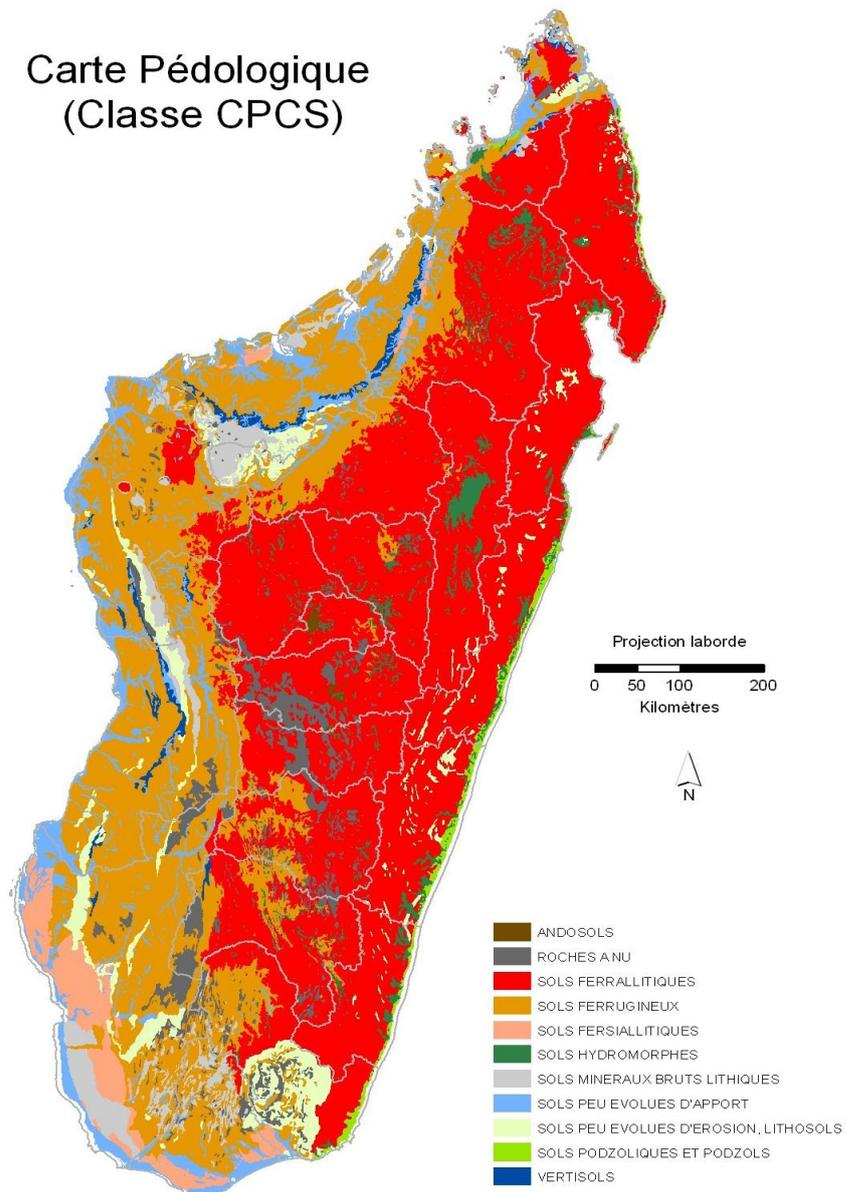


Figure 1. Carte pédologique de Madagascar. Classification CPCS (Delenne et Pelletier, 1981)

2.2. Le phosphore dans le système sol-plante

2.2.1. Rôles du phosphore dans les plantes

Le phosphore joue des rôles primordiaux dans le fonctionnement biologique des plantes puisqu'il participe à de nombreux processus physico-chimiques, biologiques et enzymatiques. Il est l'un des principaux constituants des acides nucléiques en joignant les nucléotides (Schachtman *et al.*, 1998 ; Balemi, 2009). Il est aussi un des constituants des phospholipides des membranes végétales (Lerot, 2006 ; Sánchez Chávez *et al.*, 2009).

Il participe au système de transport d'énergie dans les cellules étant donné qu'il entre dans la composition des adénosines di- et triphosphates lesquelles sont les principales sources d'énergie du métabolisme (Johnston et Steén, 2000 ; Stroia, 2007). Au point de vue métabolique, le phosphore catalyse la synthèse des glucides à partir de CO₂ et de H₂O (Johnston et Steén, 2000) et il fait aussi partie du complexe ADN-ARN, ces derniers étant responsables de la transcription des informations génétiques et de la synthèse des protéines (Johnston et Steén, 2000 ; Sánchez Chávez *et al.*, 2009). Enfin, le phosphore active la croissance des bourgeons et des racines et joue aussi le rôle d'activateur dans la mise en réserve des glucides. Le P est mis en réserve dans les grains/graines sous forme de phytate (Lerot, 2006).

2.2.2. Les différentes formes du phosphore dans le sol

Dans les sols, et surtout les sols ferrallitiques, le phosphore se présente sous diverses formes. Ces formes sont fonctions de la mobilité et de la dynamique de cet élément. Les différentes formes du phosphore dans le sol sont :

- Le P contenu dans la solution du sol : c'est le P dissous se trouvant dans la solution du sol. Il se présente sous forme de HPO₄²⁻ et/ou de H₂PO₄⁻ et la concentration de ces deux anions dépend étroitement du pH. Ce sont les seules formes de P assimilables directement par les végétaux (Hinsinger, 2001 ; Hammond et White, 2008 ; Pereda Campos, 2008),
- Le « pool » de P sous forme labile de la phase solide du sol : ce P est susceptible de passer en solution et d'être absorbé par les végétaux. Ce sont les phosphates adsorbés sur la surface des argiles et des oxyhydroxides de Fe et d'Al ainsi que sur les carbonates. Il peut s'équilibrer avec la solution du sol (Cheaïb, 2006),
- Le P dans le « pool » non-labile de la phase solide du sol qui comprend le P insoluble. Ce P ne sera disponible pour les végétaux qu'après plusieurs années (Sanchez *et al.*, 1997),
- Le P sous forme organique : le myo-inositol hexakisphosphate, les phosphomonoesters, les phosphodiesteres comprenant les acides nucléiques et les phospholipides (Pavinato *et al.*, 2010) et le P contenu dans la biomasse microbienne.

2.2.3. Dynamique du phosphore dans le système sol-plante

La plupart des sols, y compris les sols ferrallitiques des hautes terres malgaches, renferment une quantité importante de P total (Rabeharisoa, 2004). Pourtant, une faible proportion, généralement inférieur à 1%, serait disponible pour le végétaux (Richardson *et al.*, 2009). Seulement une faible proportion (2%) serait directement interceptée par les racines et le reste, c'est-à-dire 98%, serait transporté par diffusion. Ce processus est tellement lent et c'est pour cela que la quantité de P en solution est faible (Smith *et al.*, 2003). Par ailleurs, la disponibilité du phosphore dans le sol est contrôlée par les mécanismes de désorption et de solubilisation du P inorganique ainsi que de la minéralisation de la matière organique renfermant du P (Richardson *et al.*, 2009). Les principaux mécanismes régissant la disponibilité du phosphore et régnant dans les différents compartiments du sol sont notamment : (i) la dissolution et précipitation de P avec le carbonate de Ca (secondaire pour les sols ferrallitiques) et les formes amorphes du Fe et de l'Al ; (ii) l'adsorption et désorption de P sur les sites d'adsorption des argiles (Rao *et al.*, 2004) ; (iii) la minéralisation et immobilisation du P organique par les microorganismes du sol, (iv) la complexation et chélation des constituants du sol (oxyhydroxydes de Al et Fe) par les exsudats racinaires.

Pour faire face à cette faible disponibilité du P, les végétaux font intervenir différents processus physico-chimiques. En effet, le prélèvement racinaire de plus d'équivalent cations que d'équivalent anions entraîne la libération de protons (H^+) qui vont maintenir l'équilibre de charge interne, ce qui aboutira alors à l'acidification de la rhizosphère (Hinsinger, 2001 ; Rengel, 2008 ; Sánchez Chávez *et al.*, 2009). Cette acidification peut modifier la disponibilité du P inorganique en influençant la cinétique d'adsorption et de désorption du P (Richardson *et al.*, 2009). Par ailleurs, les racines de la plupart des plantes forment des associations mutualistes avec les champignons mycorhiziens de la rhizosphère (Mousain *et al.*, 1997 ; Turner, 2008 ; Richardson *et al.*, 2009). Les associations mycorhiziennes ont l'avantage d'intensifier l'absorption de P et de certains oligoéléments grâce à leur capacité à augmenter la longueur effective et la surface des racines, permettant l'exploitation d'un plus grand volume de sol (Clement et Habte, 1994 ; Stroia, 2007 ; Pereda Campos, 2008 ; Richardson *et al.*, 2009 ; Marschner *et al.*, 2010). Les champignons mycorhiziens sont capables de synthétiser les enzymes phosphatases ce qui permet de mobiliser les P organiques provenant notamment des apports de matières organiques (Turner, 2008).

Le P organique contenu dans la matière organique ne peut être disponible pour les plantes qu'après décomposition et minéralisation à travers les microorganismes (Smith *et al.*, 2003 ; Pereda Campos, 2008). Le taux de libération de P durant la minéralisation est contrôlé par des facteurs tels que l'humidité du sol, la composition de la matière organique elle-même, la concentration en oxygène dans le sol et le pH (Espinoza *et al.*, 2005 ; Stroia, 2007).

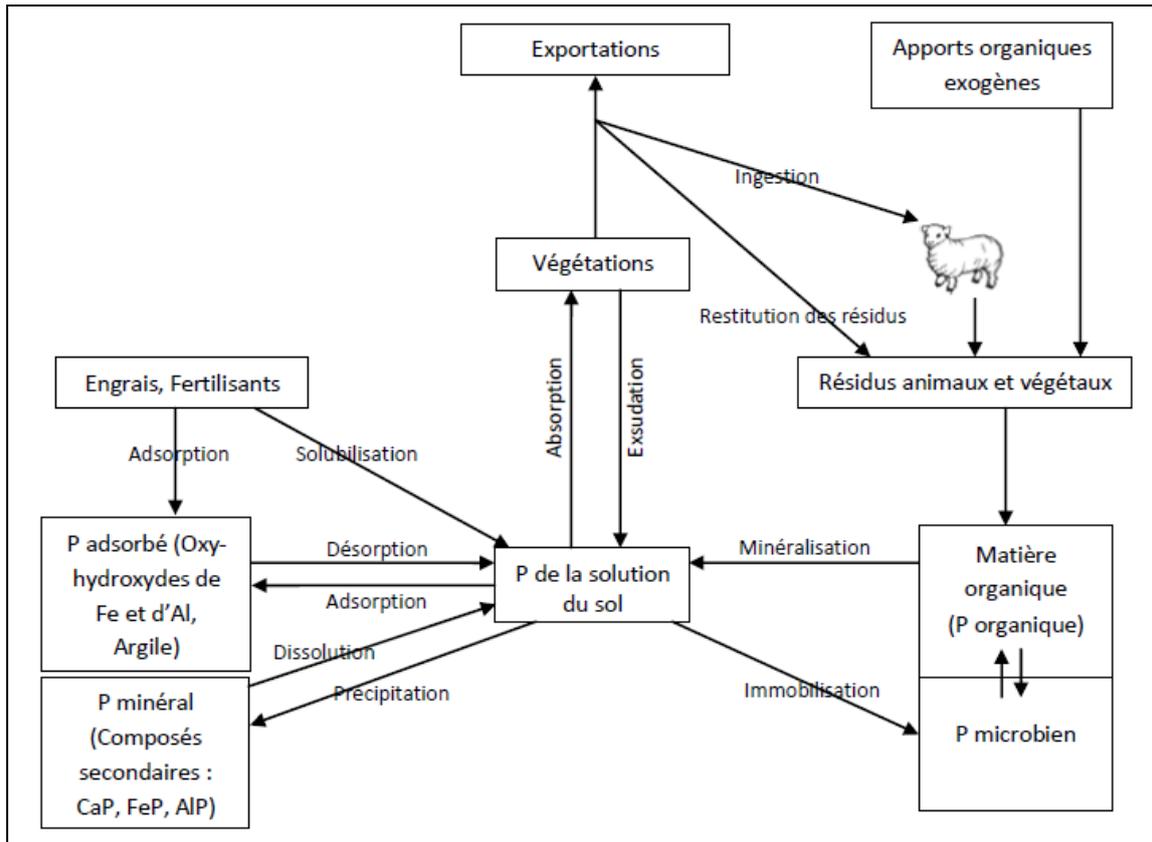


Figure 2. Dynamique du phosphore dans le système sol-plante.

(Schéma adapté d'après ceux de De Brouwere *et al.* (2003) et Richardson *et al.* (2009))

2.2.4. Statut phosphaté des sols ferrallitiques de « tanety »

Pour le cas particulier des sols ferrallitiques de « tanety » des hautes terres malgaches, ils sont caractérisés par leur faible teneur en P disponible en raison de la présence en quantité importante de colloïdes électropositifs tels que les oxydes et hydroxydes de Fe et d'Al (Rabeharisoa, 2004). En effet, comme il a été dit plus haut, ces constituants ont la capacité de fixer les ions orthophosphates par adsorption voire par précipitation (Hinsinger, 2001 ; Morel, 2002 ; Smith *et al.*, 2003 ; Rabeharisoa, 2004 ; Espinosa *et al.*, 2005 ; Richardson *et al.*, 2009). Ainsi, la teneur de P en solution est extrêmement faible, entre 0,005 et 0,05 mg P l⁻¹ (Rabeharisoa, 2007), alors que le P total varie de 20 à 3000 mg P kg⁻¹ (Rabeharisoa, 2004). De plus, ces sols sont caractérisés par une acidité élevée avec des pH variant entre 4 et 5 ainsi qu'une teneur élevée en aluminium échangeable (0,7 à 1,2 cmol kg⁻¹) ce qui réduit de plus la disponibilité du P. En effet, le pH influe sur les charges de surface des constituants du sol, donc sur la fixation du P sur ces constituants (Hinsinger, 2001) tandis que l'Al échangeable contribue à la fois à l'acidité du sol et à la précipitation du P (Rabeharisoa, 2004). La

faible disponibilité du P a alors pour conséquence une faible productivité des sols ferrallitiques (Rabeharisoa, 2007).

2.3. L'azote dans le système sol-plante

La principale source d'azote est l'atmosphère où on le rencontre sous sa forme diatomique (N₂). La fixation biologique, symbiotique ou non, est à l'origine de l'enrichissement du sol en produits organiques azotés. La majorité de l'azote du sol est formée d'azote organique qui ne sera disponible pour les plantes que par minéralisation, processus lié étroitement avec l'activité des microorganismes. Seule une petite fraction se trouve sous des formes inorganiques et est directement disponible pour les plantes. Ainsi, la matière organique constitue la principale réserve d'azote du sol.

2.3.1. Rôles de l'azote dans les plantes

Parmi les éléments nutritifs apportés aux cultures, le plus important est souvent l'azote, auquel on peut imputer, dans certains cas, 75% de l'augmentation observée des rendements (Danso et Eskew, 1984). En effet, il participe au développement et à la croissance de toutes les parties de la plante : feuilles, tiges et racines. L'azote joue un rôle essentiel dans la synthèse de la matière vivante. Il entre, avec d'autres éléments (carbone, oxygène, hydrogène...), dans la composition des acides aminés formant les protéines. L'azote est un élément essentiel pour la constitution des cellules et la photosynthèse (chlorophylle). C'est le principal facteur de croissance des plantes et un facteur de qualité qui influence sur le taux de protéines des végétaux (Anon, 2005).

2.3.2. Les formes d'azote dans le sol

2.3.2.1. L'azote organique

L'azote organique compose la majorité de l'azote présent dans le sol puisqu'il constitue 85 à 95% de l'azote total du sol (Söderlund et Svensson, 1976 ; Scheiner ; 2005). Cette fraction peut être composée jusqu'à 50% d'acides aminés et d'une proportion très réduite de sucres aminés. Le reste est constitué par des formes difficilement identifiables ou des composantes de la partie des hétérocycles des molécules humiques qui sont stables et de dégradation lente (Scheiner, 2005).

Les réserves minéralisables à court terme sont issues de la matière organique fraîche, des fractions les plus labiles de la matière organique humifiée, de la biomasse morte et des chaînes peptidiques (Campbell, 1978).

La biomasse microbienne N représente en moyenne entre 4% et 8% de l'azote total du sol. Elle constitue la fraction la plus labile de la matière organique. Elle est une des sources principales de d'azote disponible pour les plantes.

2.3.2.2. L'azote inorganique

L'azote inorganique du sol constitue la fraction disponible pour les cultures. Le sol contient rarement plus de 10% d'azote inorganique total. C'est sous la forme de nitrate (NO_3^-) qu'il est principalement absorbé par les cultures, exception faite de certains cas où la culture se développe en conditions d'anoxie. C'est le cas des rizières où la forme prédominante est l'ammonium NH_4^+ (Scheiner, 2005). Ainsi, les plantes absorbent l'azote sous forme d'ion nitrate (NO_3^-) ou d'ion ammonium (NH_4^+) plutôt que des acides aminés (ou d'autres monomères) sauf dans les écosystèmes où la minéralisation de l'azote est très faible (Andrianarisoa, 2009). Dans ce cas, les ectomycorhizes jouent un rôle essentiel dans la dépolymérisation des protéines (Abuzinadah et Read, 1986) pour libérer les acides aminés.

2.3.3. Dynamique de l'azote dans le système sol-plante

2.3.3.1. Assimilation de l'azote par les plantes

a. Assimilation de nitrate (NO_3^-)

L'assimilation de nitrate consiste en la réduction du nitrate (NO_3^-) en nitrite (NO_2^-) par la nitrate réductase, enzyme localisée au niveau du cytoplasme, puis la réduction du nitrite en ammonium (NH_4^+) par la nitrite réductase, une autre enzyme localisée au niveau des chloroplastes des feuilles et dans les proplastides des racines ou des organes non verts (Andrianarisoa, 2009).

En effet, le nitrate subit une séquence de réduction qui le conduit à l'ion ammonium comme produit final. Dans la racine, les électrons nécessaires à la réduction sont apportés par le NADPH, H^+ ou le NADH, H^+ . Cette réaction est inhibée par le NH_4^+ et stimulée par le NO_3^- . La nitrate réductase est sensible à la lumière et aux hormones (cytokinines).

La réaction catalysée est la suivante :



Ensuite, le nitrite rentre dans une séquence de réaction dont le produit final est l'ion ammonium. La nitrite réductase, enzyme qui intervient dans cette deuxième partie de la réaction de transformation, est une métallo-protéine contenant du fer. Dans le stroma, le donneur des électrons est la ferrédoxine ou le NADPH, H^+ .

La réaction globale catalysée est :



Les plantes préfèrent absorber l'ion NO_3^- et en assurer elles-mêmes la réduction.

Les racines peuvent réduire entre 5 à 95% du nitrate absorbé (Andrianarisoa, 2009). Lorsque l'apport de nitrate externe est faible, une grande proportion de nitrate est réduite au niveau de la racine, mais lorsque l'apport de nitrate externe est élevé, la capacité de réduction du nitrate par les racines devient un facteur limitant et la proportion de l'azote total transférée aux bourgeons sous forme de nitrate augmente (Andrianarisoa, 2009). La réduction et l'assimilation du nitrate nécessitent de l'énergie et deviennent coûteuses quand elles sont effectuées au niveau de la racine. Par contre, au niveau des feuilles, l'énergie nécessaire pour la réduction du nitrate peut être directement fournie par le photosystème I et par l'ATP provenant de la phosphorylation (Andrianarisoa, 2009).

b. Assimilation de l'ion ammonium (NH_4^+)

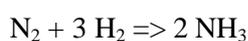
L'ammonium est un composé toxique pour la plante même à faible concentration, il ne peut pas alors s'accumuler dans les cellules. Presque la totalité de l'ammonium absorbé par la plante est directement assimilée au niveau de la racine. L'assimilation du NH_4^+ induit la production d'un proton qui doit être excrété dans le milieu externe pour compenser la charge (Andrianarisoa, 2009). La voie d'assimilation de l'ammonium par les plantes fait intervenir d'une façon combinée la glutamine synthétase (GS) et la glutamate synthase (GOGAT) (Morot-Gaudry, 1997 ; Temple *et al.*, 1998). L'ammonium réagit avec la glutamate et forme la glutamine sous l'action de la glutamine synthétase. La glutamine transfère ensuite son groupement amide vers l' α -cetoglutarate sous l'action de la glutamate synthase (Temple *et al.*, 1998). La réaction produit deux molécules de glutamate : l'une est nécessaire pour maintenir le cycle d'assimilation de l'ammonium et l'autre est source d'azote organique pour les réactions de transamination qui aboutissent à la synthèse de l'ensemble des acides aminés (Andrianarisoa, 2009). Dans le cas d'un apport élevé en ammonium, l' α -cetoglutarate se combine directement avec l'ammonium et forment du glutamate sous l'action de la glutamate déshydrogénase. L'azote assimilé est transporté par le xylème jusqu'aux feuilles sous forme d'acides aminés ou d'amides (Andrianarisoa, 2009).

2.3.3.2. Les processus de gain d'azote autre que la fertilisation

a. La fixation symbiotique d'azote atmosphérique

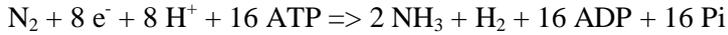
La fixation biologique de l'azote consiste en la transformation de l'azote gazeux (N_2) atmosphérique en ammoniac (NH_4^+). Seuls quelques micro-organismes diazotrophes sont capables d'assurer ce processus, parmi lesquels on distingue : (i) les bactéries libres vivant dans le sol (Genre *Klebsiella* et Genre *Azotobacter*), (ii) les cyanobactéries et les rhizobactéries qui sont des bactéries symbiotiques vivant en association avec les légumineuses dans des structures racinaires ou caulinaires organisées appelées nodosités (Scheiner, 2005).

Ces bactéries et certaines levures sont capables de réduire l'azote suivant la réaction globale :



La fixation biologique de l'azote est catalysée par un complexe enzymatique : la *Nitrogenase/Hydrogenase*. La réaction, réalisée par les fixateurs biologiques, exige 8 électrons et 8 protons pour la réduction et 16 ATP pour la fourniture de l'énergie d'activation.

La réaction globale devient alors :



Dans le cas de la symbiose *Rhizobium*-légumineuse, comme il a été dit plus haut, l'activité symbiotique se place au niveau de structures racinaires ou caulinaires organisées, appelées *nodosités* où sont hébergées les bactéries fixatrices. Dans les nodosités, se forme une protéine spécifique appelée *leghemoglobine* (Scheiner, 2005). La fonction de la leghemoglobine est de maintenir la pression de l'oxygène à un niveau assez bas dans l'environnement de la nitrogénase, compatible avec le fonctionnement de la fixation de l'azote, le complexe enzymatique Nitrogénase/Hydrogénase est en effet très sensible à l'oxygène (Scheiner, 2005).

b. Les autres apports atmosphériques

Autre que la fertilisation et les processus biologiques divers comme la fixation biologique de l'azote, l'on pourrait citer les apports d'azote minéral *via* les dépôts humides (sous forme de NO_3^- et NH_4^+), les dépôts secs (NH_3 et NO_x sous formes gazeuses, poussières atmosphériques) et les dépôts occultes (dans la brume et le brouillard). Les oxydes azotés (NO_x) réagissent avec des OH^- et forment de l'acide nitrique, composant des pluies acides (Andrianarisoa, 2009).

L'origine des dépôts secs et humides d'azote est essentiellement la pollution automobile, l'industrie et l'élevage. Les apports excessifs d'azote atmosphérique peuvent avoir des conséquences négatives telles que la toxicité directe au niveau des feuilles (Skeffington et Wilson, 1988) ; l'acidification du sol (Dambrine *et al.*, 1991; Godbold, 1991) et l'augmentation des formes toxiques d'aluminium soluble (Boudot *et al.*, 1994).

2.3.3.3. Les processus de pertes d'azote

a. Dénitrification

La dénitrification est le processus réductif résultant de l'action de bactéries anaérobies dites *dénitrifiantes* et se traduisant par la transformation du nitrate (NO_3^-) en ion nitrite (NO_2^-) puis en monoxyde d'azote (NO), après en oxyde nitreux (N_2O) et enfin en diazote (N_2) perdu pour le sol. Elle se produit principalement en sol soumis à des conditions d'anaérobiose. Il arrive que les bactéries n'aillent pas jusqu'à la phase ultime de cette réaction, si le taux de dioxygène est en partie suffisant pour satisfaire leur besoin. La dénitrification est alors en partie arrêtée aux stades NO ou, plus souvent, N_2O qui est un gaz à effet de serre (Germon *et al.*, 1999).

Les conditions qui favorisent la dénitrification sont un pH du sol neutre à légèrement basique, une température autour de 25°C, des conditions anaérobies, la présence de substrats azotés et de substrats

carbonés (Germon et Couton, 1999 ; Scheiner, 2005). Par ailleurs, dans le sol le fonctionnement de la dénitrification dépend du niveau d'humidité qui conditionne l'aération et le niveau d'anoxie (Grundman et Rolston, 1987).

b. Volatilisation

C'est la perte d'azote, à partir du sol ou d'une matière fertilisante, par dégagement direct dans l'atmosphère de diazote (N_2), d'oxyde d'azote (NO) ou d'ammoniac (NH_3). Cette voie de perte est favorisée dans les sols alcalins et les sols à faible capacité d'échange cationique en raison du fait que les sites d'échange n'arrivent pas à retenir la majorité du NH_4^+ (Hargrove, 1988 ; Rochette, 2008). Bien que les pertes les plus importantes soient liées à l'application d'urée et de lisiers riches en NH_4^+ , on en observe également sur des parcelles immédiatement après l'application de différents types d'amendements organiques. Dans un système de production, la sous-estimation des pertes par volatilisation a pour conséquence la sous-estimation de la fertilisation. Par ailleurs, la surestimation entraîne une sur-application et, par conséquent, le risque d'augmenter les pertes par lixiviation (Eghball *et al.*, 1997 ; Palma *et al.*, 1998 ; Chantigny *et al.*, 2004).

c. Lixiviation

La lixiviation est un phénomène général qui concerne tous les ions. Pour l'azote, le nitrate et l'ion ammonium pourraient être entraînés en profondeur par les eaux de percolation. L'azote sous forme nitrate est le plus vulnérable à cette lixiviation (Schvartz *et al.*, 2005). En effet, le NO_3^- , aussi bien celui issu de la minéralisation que de la fertilisation, s'accumulant dans les horizons de surface, peut être entraîné en profondeur. Le NH_4^+ peut aussi être lixivié dans les sols où le drainage est important et où la capacité d'échange cationique est faible, ce qui est le cas pour de nombreux sols tropicaux. L'agriculture, à travers la gestion des systèmes de culture, permet de minimiser ces pertes comme pour le cas du système de culture sous couvert végétal où la minéralisation de la matière organique est décalée par rapport au labour, ce qui permet d'avoir un maximum de minéralisation au moment où la plante aura besoin de nutriment.

d. Erosions

L'azote, comme d'autres éléments majeurs et mineurs du sol, peut être perdu par érosion. En effet, les érosions, notamment hydriques, peuvent entraîner des particules terreuses qui contiennent des nutriments. Ces nutriments sont alors perdus pour le sol et pour les plantes qui y sont cultivées. L'estimation des pertes d'azote par érosion devient donc un volet très important puisqu'elle permet non seulement de quantifier l'azote perdu mais aussi de quantifier d'éventuels apports azotés pour pallier à la carence en azote.

2.3.3.4. Processus majeurs régissant la dynamique de l'azote dans le sol

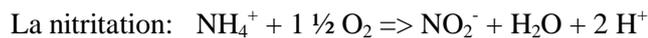
a. Ammonification

L'ammonification est la transformation de l'azote organique en ammonium (NH_4^+) sous l'action de microorganismes hétérotrophes qui utilisent des substrats carbonés comme source d'énergie (Schvartz *et al.*, 2005 ; Valé, 2006). Cette forme est souvent transitoire et sera transformée ensuite en azote nitrique. Les bactéries responsables de ce processus sont appelées *bactéries ammonifiantes* et on peut citer les genres *Bacillus*, *Clostridium*, *Proteus*, *Pseudomonas*, *Streptomyces*.

Vu la diversité des microorganismes ammonifiants, l'ammonification est un processus sans exigence écologique particulière, car quelles que soient les conditions de l'environnement, il se trouve toujours dans les sols des espèces microbiennes ammonifiantes adaptées à ces conditions.

b. Nitrification

La nitrification est le processus d'oxydation biologique de l'azote réalisé par des bactéries aérobies du sol au cours duquel l'azote passe de la forme ammoniacale à la forme nitrique en deux stades successifs : la nitritation et la nitratisation (Scheiner, 2005).



La nitrification est produite par des microorganismes hétérotrophes ou autotrophes ; ces derniers sont les plus importants. En effet, la nitritation est réalisée par des bactéries nitreuses du genre *Nitrosomonas* tandis que la nitratisation est réalisée par des bactéries du genre *Nitrobacter*.

Les conditions optimales pour la nitrification sont plus restrictives que pour l'ammonification. Les sols neutres ou légèrement basiques favorisent la nitrification. Néanmoins, une nitrification active est observée dans de nombreux sols acides. La teneur en oxygène affecte la nitrification car il s'agit d'un processus aérobie. L'humidité constitue aussi un autre facteur déterminant, l'optimum se situant autour de 60% de la capacité au champ (Bonde et Lindberg, 1988).

c. Immobilisation/Réorganisation

L'immobilisation s'effectue simultanément avec la minéralisation. C'est une forme de perte temporaire pour les cultures où la biomasse microbienne du sol consomme l'azote minéral. En effet, c'est le processus par lequel cette biomasse microbienne du sol assimile l'azote minéral pour ses propres besoins de renouvellement et de croissance (Andrianarisoa, 2009). L'immobilisation ou la réorganisation est d'autant plus importante que le sol a une forte activité biologique.

L'immobilisation et la minéralisation sont deux phénomènes qui opèrent simultanément et dépendent du rapport carbone-azote (Gagnon, 2009).

En effet :

- Si C/N est inférieur à 30 : la minéralisation est plus importante que l'immobilisation

- Si C/N est supérieur à 30 : l'immobilisation est accentuée.

L'immobilisation ou la réorganisation ne doit pas être considérée comme une perte pour le système sol plante, mais elle représente une immobilisation de l'engrais dans le compartiment organique ou microbien du sol. Elle arrive souvent lorsque, stimulés par un apport excessif en carbone facilement assimilable, la biomasse microbienne du sol prolifère et risque de consommer tout l'azote disponible ; l'azote « immobilisé » dans les cellules bactériennes est alors hors de portée des plantes pour un temps, c'est la *faim d'azote* (Gagnon, 2009).

Tous ces processus aussi bien physico-chimiques, biologiques ou enzymatiques lesquels régissent la disponibilité de l'azote dans le système sol-plante peuvent être résumés par le schéma suivant.

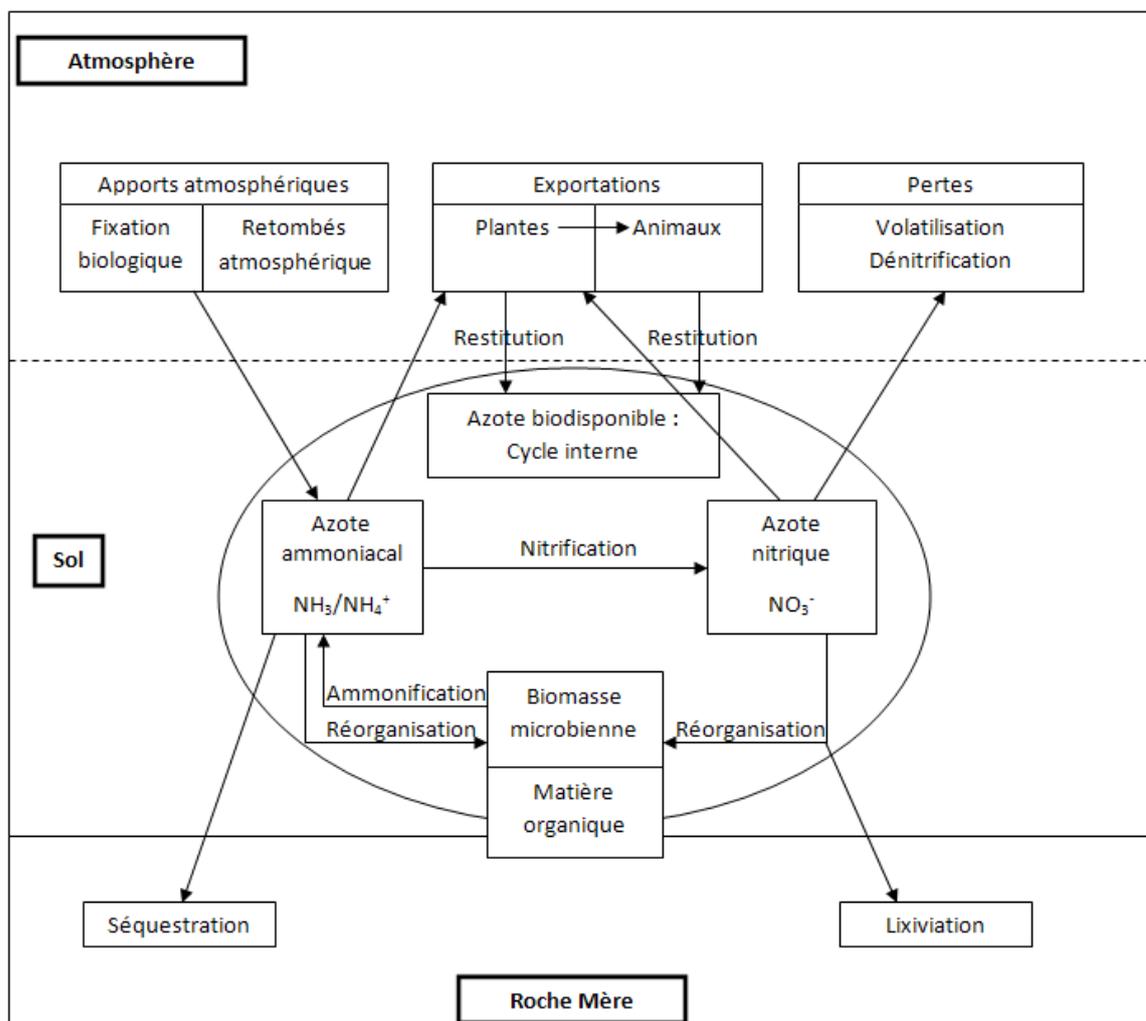


Figure 3. Cycle simplifié de l'azote (Schéma adapté d'après Schwartz *et al.*, 2005)

2.4. Le carbone dans le sol

2.4.1. Le carbone et la matière organique du sol

Le stock de carbone organique présent dans les sols naturels présente un équilibre dynamique entre les apports de débris végétaux et la perte due à leur décomposition (minéralisation). Dans les conditions normales d'aérobie des sols, la majorité du carbone apporté est labile et seulement une petite fraction (1%) de ce qui entre dans le sol s'accumule dans la fraction stable qui est la fraction humique (FAO, 2002). La matière organique du sol (MOS) a une composition très complexe et hétérogène et elle est le plus souvent mélangée ou associée aux constituants minéraux du sol. La séparation traditionnelle de la matière organique en fraction humique et fulvique ne sépare pas des fractions qui ont des cycles différents (Balesdent, 1996). Des méthodes de séparation physique telles que le fractionnement en fonction de la dimension des particules, le fractionnement densimétrique ou le fractionnement selon la dimension des agrégats permet de séparer des fractions qui ont un sens cinétique (Feller, 1979 ; Balesdent, 1996).

Parmi ces fractions, la matière organique particulaire a été identifiée comme une fraction très sensible aux modifications de l'usage des terres (Cambardella, 1998; Gregorich *et al.*, 1996). Des méthodes directes existent également pour déterminer la biomasse microbienne (Vance *et al.*, 1987) qui représente 1 à 5% de la matière organique totale et est un réservoir d'éléments nutritifs (notamment N et P). C'est une fraction labile qui change avec la saison, mais a aussi une réponse rapide aux changements d'utilisation des terres (FAO, 2002).

2.4.2. Rôle de la matière organique dans le sol

La matière organique du sol représente l'indicateur principal de la qualité des sols, à la fois pour des fonctions agricoles et pour les fonctions environnementales parmi lesquelles la séquestration du carbone et la qualité de l'air (FAO, 2002). Elle est le principal déterminant de l'activité biologique. La quantité, la diversité et l'activité de la faune et des microorganismes sont en relation directe avec sa présence (FAO, 2002). La matière organique et l'activité biologique qui en découle ont une influence majeure sur les propriétés physiques et chimiques des sols (Robert, 1996). L'agrégation et la stabilité de la structure du sol augmentent avec le contenu en carbone des sols (Razafimbelo, 2005). Les conséquences sont directes sur la dynamique de l'eau et la résistance à l'érosion par l'eau et le vent. Le carbone des sols affecte aussi la dynamique et la biodisponibilité des principaux éléments nutritifs (FAO, 2002). Les principales méthodes développées pour favoriser l'augmentation de la matière organique du sol sont réalisées actuellement par l'agriculture de conservation impliquant un labour minimal ou un non-labour et une couverture protectrice continue faite de matériel végétal vivant ou mort sur la surface du sol (Razafimbelo, 2005).

2.4.3. Le cycle du carbone

Le cycle du carbone est bien connu de tous. Il part de la photosynthèse puis de la décomposition de la matière organique de la litière qui dégage du CO₂. Le CO₂ émis peut être réabsorbé au niveau des feuilles par la photosynthèse ou bien d'autres compartiments comme les océans. D'autres compartiments participent aussi dans ce cycle.

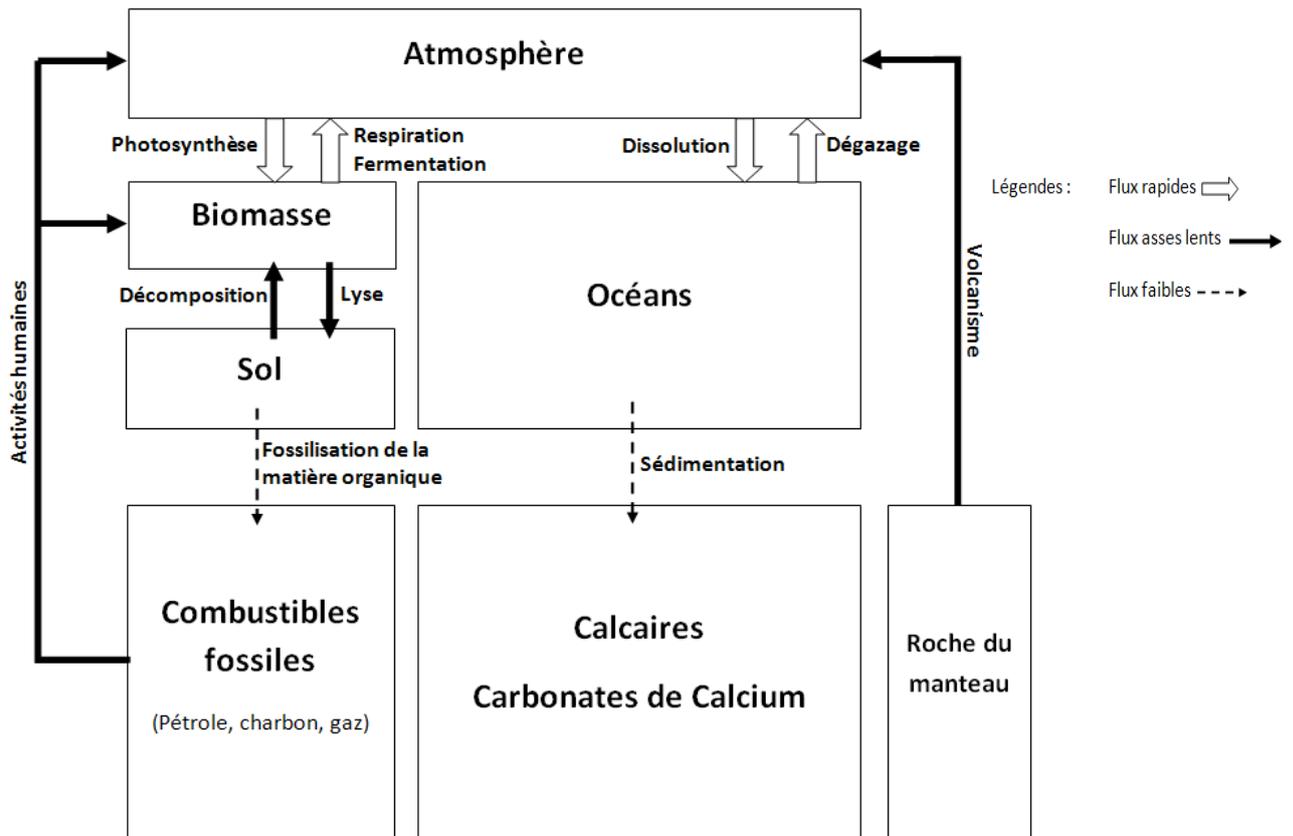


Figure 4. Cycle simplifié du carbone (Source : <http://1blog.2bio.org/post/Le-cycle-du-carbone>)

2.5. Biomasse microbienne carbone, azote et phosphore du sol

Outre les caractéristiques physico-chimiques des sols, la connaissance du pool microbien revêt aussi une importance particulière en raison de leur implication dans de nombreux processus de transformations biologiques. Du fait de l'importance de la biomasse microbienne dans les métabolismes du sol ainsi que son rôle comme source d'éléments nutritifs, la biomasse microbienne est considérée comme l'un des principaux déterminants de la fertilité du sol (Jenkinson et Ladd, 1981). Plus particulièrement, l'évaluation de l'azote microbien pour la quantification de la dynamique de l'azote dans les écosystèmes cultivés est importante puisqu'il contrôle la disponibilité et la perte de

l'azote organique du sol particulièrement dans les systèmes à haut apport de fertilisant (Moore *et al.*, 2000). De plus, la taille de la biomasse microbienne est proportionnelle au taux de minéralisation de l'azote dans le sol (Chaussod et Houot, 1993). Ainsi, la biomasse microbienne contribue à la caractérisation du statut microbiologique du sol (Nannipieri *et al.*, 1990) et aide à déterminer les effets de la culture (Anderson et Domsch, 1993) et du mode de gestion du sol (Perott *et al.*, 1992) sur les microorganismes du sol.

D'après Moore *et al.* (2000), le phosphore microbien du sol varie en fonction de la température et de l'humidité du sol et, surtout, du type de fertilisant apporté. Ainsi, la disponibilité du phosphore est directement contrôlée par l'activité microbiologique du sol et la taille de cette biomasse microbienne. Même si la biomasse microbienne ne contient que 0,4 à 2,5% du phosphore total dans les sols cultivés, il peut jouer un rôle fondamental dans le cycle de P du sol (Obersson et Joner, 2005). L'immobilisation du P par la biomasse microbienne peut affecter la disponibilité de P en soutirant du P inorganique de la solution du sol, en particulier lorsque le carbone soluble est disponible pour la croissance microbienne (Bünemann *et al.*, 2004; Olander et Vitousek, 2004). Logah *et al.* (2010) ont par exemple trouvé que le phosphore pouvait être immobilisé par la biomasse microbienne au moment de la croissance de la plante et être libéré ensuite, la libération ne coïncidant pas avec le pic de demande en éléments nutritifs des cultures.

Par ailleurs, le carbone total sous forme vivante est un bon indicateur du statut organique du sol (Powlson, 1994; Pankhurst, 1994). C'est la fraction carbonée la plus labile du sol (Chaussod *et al.*, 1992). Elle relève aussi de la composante résilience ou changement d'état du sol (Chaussod, 1996). La biomasse microbienne peut être associée à l'utilisation de modèle pour prévoir l'évolution à long terme des stocks organiques du sol (Powlson *et al.*, 1987). Par rapport au mode de gestion du sol, le labour entraîne la diminution de la taille de la population bactérienne (Doran, 1980) et la biomasse microbienne de la couche superficielle du sol (Saffigna *et al.*, 1989; Angers *et al.*, 1993).

3. Matériel et méthodes

3.1. Problématiques et Hypothèses

3.1.1. Problématiques

Madagascar est un pays à vocation agricole puisque 74% de la population ont des activités rurales (Rabeharisoa, 2004). La forte croissance démographique ainsi que la forte pression sur les bas-fonds occupés souvent par le riz irrigué obligent les paysans à chercher de nouveaux terroirs tels que les "tanety" ou collines sur lesquels les problèmes de fertilité sont très importants. En effet, les sols ferrallitiques, y compris ceux de "tanety", sont des sols acides et peu fertiles (Rabeharisoa, 2007) qui se sont développés soit sur socle cristallin, soit sur substrats fluviolacustres, soit sur basalte (Rabeharisoa, 2004). Les sols ferrallitiques de « tanety » sont caractérisés notamment par leur faible teneur en P disponible liée à la présence importante de colloïdes électropositifs tels que les oxydes et hydroxydes de fer (Fe) et d'aluminium (Al) (des sesquioxydes) et les argiles (Rabeharisoa, 2004). En effet, ces constituants du sol, notamment les sesquioxydes, ont la capacité de fixer les ions orthophosphates par adsorption voire par précipitation (Hinsinger, 2001 ; Morel, 2002 ; Smith *et al.*, 2003 ; Rabeharisoa, 2004 ; Espinosa *et al.*, 2005 ; Stroia, 2007 ; Richardson *et al.*, 2009). Par conséquent, les quantités de P disponible sont très faibles, avec des teneurs dans la solution des sols situées entre 0,005 et 0,05 mg P l⁻¹ (Rabeharisoa, 2007), alors que le P total du sol varie de 20 à 3000 mg P kg⁻¹ (Rabeharisoa, 2004). Par ailleurs, ces sols sont caractérisés par une forte acidité avec des pH variant entre 4 et 5 ainsi qu'une teneur élevée en Al échangeable (0,7 à 1,2 cmol kg⁻¹) ce qui accentuent la sorption du phosphore. En effet, le pH influe sur les charges de surface des constituants du sol, donc sur la fixation du P sur ces constituants (Hinsinger, 2001 ; Stroia, 2007) tandis que l'Al échangeable contribue à la fois à l'acidité du sol et à la précipitation du P (Rabeharisoa, 2004). La faible disponibilité du P a alors pour conséquence une faible productivité des sols ferrallitiques (Rabeharisoa, 2007).

La plupart des études réalisées concernant la nutrition phosphatée et l'amélioration de la productivité agricole se sont uniquement concentrées sur l'évaluation des aspects physico-chimiques qui reflètent la disponibilité du phosphore sans prendre en considération la participation du compartiment microbien du sol dans la dynamique et la disponibilité non seulement du phosphore mais aussi de l'azote et de la dynamique du carbone. Ces aspects microbiologiques mériteraient d'être approfondis puisqu'ils jouent un rôle important dans la durabilité et la résilience des systèmes de culture (Chaussod, 1996) et la minéralisation, donc la mise à disponibilité, de la matière organique apportée aux cultures (Chaussod et Houot, 1993). Par ailleurs, une forte activité biologique pourrait aussi avoir des effets indésirables sur la disponibilité des nutriments (notamment du P) puisque les microbes peuvent immobiliser le P assimilable contenu dans le sol et entrer donc en concurrence avec les plantes cultivées (Logah *et al.*, 2010).

Ainsi, améliorer la productivité de ces sols ferrallitiques de « tanety » et produire tout en minimisant les pressions sur les ressources naturelles sont au cœur des problématiques scientifiques et socio-économiques actuelles dans un contexte d'une agriculture durable. Ce travail tentera alors de s'y atteler en retenant les principaux questionnements suivants à la fois complexes et fascinants : Comment pourra-t-on améliorer la disponibilité des principaux nutriments dans les sols ferrallitiques de « tanety » ? Quel type de fertilisant, quel système de culture, quel mode de gestion du sol permettront une plus grande productivité agricole sans nuire à l'environnement et à ses composantes tout en maintenant une activité agricole économiquement durable et rentable ?

3.1.2. Hypothèses

Les hypothèses proposées ici se basent sur la disponibilité et la dynamique de l'azote et du phosphore ainsi que le rendement du riz et du haricot en fonction de la dose d'apport d'engrais phosphaté, du mode de gestion du sol et de la forme d'apport du phosphore. Dans cette optique, ce travail se propose de vérifier les cinq hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 : La disponibilité du phosphore augmente avec la dose d'apport de phosphore

Etant donné que nous faisons face à des sols ferrallitiques de « tanety », la disponibilité du phosphore dans ces types de sols est très limitée et conditionnée par le statut minéralogique notamment par la présence en quantité abondante d'oxyhydroxyde de Fe et d'Al qui adsorbent énergiquement les ions orthophosphates présents dans le sol (Morel, 2002 ; Rabeharisoa, 2004). En effet, les ions orthophosphates sont des ions électronégatifs alors que les oxyhydroxydes de Fe et d'Al sont chargés positivement (Rabeharisoa, 2004), ce qui aura pour conséquence la rétention des ions orthophosphates sur ces constituants minéraux du sol limitant ainsi la disponibilité du P pour les plantes cultivées. Les apports de phosphore à partir de matières exogènes ou de fertilisants minéraux doivent alors compenser cette faible disponibilité du phosphore grâce à l'augmentation de la concentration de P assimilable dans le sol notamment à partir d'apports de P minéral immédiatement disponible pour les plantes. Cette hypothèse propose alors que la disponibilité du phosphore pour deux plantes cultivées en association augmentera aussi bien avec les doses d'apport de P sous forme minérale (apport de triple superphosphate) qu'avec les doses d'apport de P total (apport de triple superphosphate+matière organique source de P). Par ailleurs, cette hypothèse se propose aussi de comparer si un apport exclusivement minéral est plus efficace (meilleure réponse) par rapport à un apport organo-minéral vis-à-vis de la disponibilité du P des deux cultures entreprises.

Hypothèse 2 : Le rendement du haricot et du riz augmente avec la dose d'apport de phosphore

Cette deuxième hypothèse sera plutôt axée sur les éventuels effets des doses d'apport croissant de phosphore sur le rendement du haricot et du riz qui seront cultivées en association. En effet, le phosphore étant un des principaux nutriments qui participe à un certain nombre de réaction physico-chimique, biologique et enzymatique. En l'occurrence, le phosphore fait partie intégrante des adénosines di- et triphosphates lesquels jouent le rôle principal de source d'énergie du métabolisme vivant (Lerot, 2006 ; Johnston et Steén, 2000 ; Sánchez Chávez *et al.*, 2009). Mais l'un des rôles le plus important du phosphore est son implication dans la synthèse des glucides, principal constituant de la matière végétale et certainement un important facteur de rendement, en catalysant les réactions de transformation du CO₂ et du H₂O en glucides qui seront par la suite acheminés vers les différentes parties de la plante (Stroia, 2007). Ainsi, le phosphore est indirectement un facteur de rendement puisqu'il participe alors dans les processus de fabrication des glucides. C'est pour cette raison que cette deuxième hypothèse a été axée sur les effets des apports croissants de P sur le rendement du haricot et du riz dans un contexte de cultures associées.

Hypothèse 3 : Le TSP combiné avec du fumier comme apport de phosphore sous forme organique fournira la meilleure disponibilité en N et P ainsi que le meilleur rendement

Comme il a été dit plus haut, l'apport de phosphore sous forme minérale pourrait améliorer la disponibilité du phosphore dans le sol. Toutefois, les ions orthophosphates apportés par des engrais minéraux tels que le triple superphosphate (TSP) pourraient aussi être adsorbés par les minéraux du sol. L'apport de fumier en tant que matière organique combiné avec l'apport d'engrais minéraux pourrait être une solution importante pour pallier à l'adsorption des ions orthophosphates au niveau des sites d'adsorption. En effet, la décomposition du fumier permettrait la libération d'anions du type RCOO⁻ qui entreraient directement en concurrence avec les ions orthophosphates sur lesdits sites d'adsorption (Dubus, 1997 ; De Brouwere *et al.*, 2003 ; Siddique et Robinson, 2003 ; Fuentes *et al.*, 2006). Ce processus améliorerait la concentration en ions orthophosphates dans la solution du sol et contribuerait alors à l'amélioration du rendement des plantes cultivées. Par ailleurs, la décomposition du fumier apporté, dont la vitesse dépend du taux de lignine et de l'activité biologique du sol, permet aussi la libération d'azote et de phosphore directement disponibles pour les plantes *via* la minéralisation (Vericel et Minette, 2010). Enfin, la dégradation de la matière organique apportée *via* le fumier est un processus alcalinisant conduisant ainsi à une augmentation transitoire du pH. Ceci induit une augmentation de la charge électro négative des colloïdes et, en conséquence, une diminution du potentiel de sorption du P (Haynes et Mokolobate, 2001). Ainsi, l'apport de fumier en tant que matière organique améliorerait la disponibilité du P et du N dans le sol (Oberson *et al.*, 2006 ; Richardson *et al.*, 2009) et, par conséquent, le rendement.

Hypothèse 4 : L'ajout de matière organique en complément du TSP apporté intensifie l'activité biologique du sol par rapport à des apports exclusivement minéraux

La biomasse microbienne permet d'évaluer l'importance de l'activité biologique dans le sol. Cette dernière est d'autant plus importante que les valeurs du carbone, de l'azote et du phosphore microbiens soient élevées. Cette activité microbiologique du sol est favorisée par la présence des éléments dont les microbes ont besoin : le carbone et l'azote. Le carbone est en fait le premier élément dont les microbes ont besoin. Ainsi, les traitements faisant intervenir des apports organiques devront correspondre à une importante activité microbiologique donc à une importante biomasse microbienne. Par ailleurs, la biomasse microbienne joue des rôles importants dans la minéralisation de l'azote (Smith, 1993) et constitue un très bon indicateur du statut organique du sol (Powlson, 1994).

Ainsi, l'incorporation dans le sol de résidus organiques en complément des apports minéraux de P permettrait, selon cette hypothèse, d'augmenter la biomasse microbienne. Cette forte activité microbiologique du sol pourrait être accompagnée par de nombreuses réactions biologiques et physico-chimiques telles que l'hydrolyse enzymatique de la matière organique par des phosphatases (Machado et Furlani, 2004 ; Rodriguez *et al.*, 2006 ; Rengel, 2008 ; Turner, 2008) ou bien la libération d'exsudats racinaires et d'acides organiques qui vont à leur tour libérer progressivement les ions P adsorbés au niveau des sites d'adsorption (Dubus, 1997). Cependant, une forte activité biologique pourrait être aussi accompagnée par une immobilisation momentanée des nutriments, notamment du phosphore, puisque les microbes peuvent soutirer du P inorganique de la solution du sol et provoquer, par conséquent, un appauvrissement momentané du sol (Bünemann *et al.*, 2004 ; Olander et Vitousek, 2004 ; Logah *et al.*, 2010). Toutefois, après lyse des microbes le phosphore sera de nouveau disponible pour les plantes. Ainsi, cette quatrième hypothèse a été axée sur les éventuels effets de l'ajout de matière organique source de phosphore sur l'activité biologique du sol.

Hypothèse 5 : Le mode de gestion du sol aurait des effets significatifs sur les paramètres physico-chimiques et biologiques du sol ainsi que sur le rendement des deux cultures qui seront associées

Les deux modes de gestion du sol que l'on testera ici sont : (i) un système avec labour classique et (ii) un système sans labour (SCV). De nombreux auteurs se penchent en faveur d'un système sans labour qui permet au sol une plus grande activité biologique (Razafimbelo, 2005) ainsi qu'une meilleure utilisation des nutriments du sol couplée à une minimisation des pertes de nutriments par d'éventuels phénomènes d'érosion. Cette cinquième hypothèse essaiera alors de mettre en évidence si le mode de gestion du sol aurait des effets significatifs sur les paramètres physico-chimiques et biologiques du sol ainsi que sur le rendement des deux cultures qui seront associées.

3.2. Méthodologie

Pour pouvoir vérifier les hypothèses proposées dans cette étude, une expérimentation agronomique de longue durée a été mise en place en Novembre 2011 sur un sol ferrallitique de « tanety » sur lequel des problèmes de fertilité sont rencontrés. Ce dispositif reprend des essais qui se sont succédés depuis 2006 débuté par du maïs (*Zea mays*) en 2006, du pois de terre (*Vigna subterranea*) en 2007 et du riz pluvial (*Oryza sativa*) en 2008. Aucune plante n'y a été cultivée en 2009 et en 2010. Ces précédents culturaux ont fait l'objet d'apport phosphaté dont les doses ont été les mêmes que celles utilisées dans l'actuel dispositif. La mise en place de la présente expérimentation s'inscrit bien évidemment dans le cadre du Projet Fabatropimed dans lequel s'inscrit ce mémoire. Le dispositif agronomique est géré conjointement par le Laboratoire des Radioisotopes et l'UMR Eco&Sols de l'IRD présente sur place.

3.2.1. Site expérimental

Le dispositif expérimental a été mis en place dans le Fokontany de Mahatsinjo à 3 km de Lazaina, Commune Rurale d'Ambohimanga Rova, Région Analamanga, à environ 12 km au Nord d'Antananarivo. Les coordonnées géographiques sont 18°46'53.56''Sud et 47°32'05.03''Est. Ce site se trouve à 1290 m d'altitude. Le terrain sur lequel le dispositif a été installé appartient à la Société Vohitra Environnement. Avant la mise en place du premier essai, en 2006, le sol était en défriche depuis plus de dix ans avec une végétation composée essentiellement de « bozaka » dont *Aristida sp.* Le climat du site est du type tropical d'altitude avec une pluviométrie annuelle de 1300 mm et des températures annuelles allant de 15 à 23°C (Rasoamaharo, 2008). Les caractéristiques physico-chimiques du sol du site avant la mise en place de la première expérimentation en 2006 sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques du sol du site d'expérimentation avant la mise en place du premier essai en 2006.

Teneur en phosphore total	Teneur en azote total	Pourcentage d'argile	pHeau
200 mg P kg ⁻¹	1 g N kg ⁻¹	26%	5,4

Source : Rasoamaharo, 2008

3.2.2. Matériels végétaux

Etant donné la nécessité d'augmenter la production rizicole à Madagascar, il est tout à fait logique et rationnel que la plupart des recherches en matière agricole se focalisent sur le riz. Cette expérimentation n'échappe pas à cette «habitude» car une fois de plus le riz a été de nouveau l'objet de nos recherches. Mais dans cette étude, le riz (*Oryza sativa*) a été cultivé en intercalaire/association avec le haricot (*Phaseolus vulgaris*).

La variété de riz FOFIFA 154, appelée aussi «Ravokatra», a été utilisée dans cette expérimentation étant donné sa capacité d'adaptation dans les zones de hautes et moyennes altitudes (500 à 1600 m) ainsi qu'à sa bonne aptitude au tallage. De plus, cette variété a une productivité satisfaisante avec un rendement moyen de 3,3 t ha⁻¹, rendement qui est parfois limité par la verse, la sécheresse et la pyriculariose (Dzido, 2001 ; MAEP, 2007). La variété de haricot utilisée en intercalaire avec le riz est la variété « ranjonomy » ou lingot blanc. Cette variété a été choisie puisqu'elle est très appréciée par les paysans et bien sûr par les consommateurs. En ce qui concerne les exigences du haricot, il demande 300 à 400 mm d'eau pendant toute la durée de sa végétation et un manque d'eau accompagné d'un excès de chaleur provoque le flétrissement des fleurs et leur coulure (Hubert, 1978). Le haricot est indifférent à l'altitude puisqu'il pousse aussi bien sur les hautes terres que sur les côtes. Du point de vue de ses exigences édaphiques, il préfère les terres légères, limoneuses ou sablo-argileuses. En ce qui concerne le pH, le haricot est tolérant et arrive à croître dans une fourchette de pH comprise entre 6 et 7,5 mais préfère les sols légèrement acides (6,5) (Hubert, 1978).

3.2.3. Dispositif expérimental

L'expérimentation consiste à tester l'efficacité d'un certain nombre de fertilisants sources de phosphore sur la disponibilité de l'azote, du phosphore et la dynamique du carbone ainsi que sur la biomasse microbienne du sol dans un contexte de système de culture intercalaire de riz et de haricot (association).

Les facteurs qui ont été étudiés dans ce dispositif expérimental sont le mode de gestion du sol, les doses d'apport de P, les sources de P et les types de matière organique apportée. Ainsi, le dispositif comprend :

- Deux systèmes de culture: un système sans labour (NT) et un système avec labour classique (CT)
- Apport annuel de phosphore minéral sous forme de triple superphosphate (TSP) équivalent à 0, 5, 20 et 50 kg P ha⁻¹

- Apport annuel de phosphore organique sous forme de fumier (M) ou de résidus de stylosanthès (GM) équivalent à 20 kg P ha⁻¹

Cependant, ces facteurs n'ont pas été totalement combinés puisque seuls 14 traitements sur les 24 possibilités ont été retenus (Tableau 2). Les parcelles du dispositif mesurent chacune 6 m x 4 m et du riz (*Oryza sativa*) a été cultivé en intercalaire avec du haricot (*Phaseolus vulgaris*) avec un espacement de 25 cm entre les lignes de riz et de haricot et 25 cm à l'intérieur des lignes. Il faudrait préciser que certaines parcelles ont été subdivisées en deux sous-parcelles inégales pour pouvoir comparer les deux matières organiques sources de P apportées c'est-à-dire le fumier et les résidus de stylosanthès lorsque ces derniers sont combinés au TSP. Pour ces cas particuliers, la partie amont de la parcelle mesurant seulement 10 m² a été traitée avec du stylosanthès tandis que la partie aval mesurant 14 m² a été traitée avec du fumier.

En ce qui concerne le semis, deux graines de haricot par trou ont été mises en terre contre sept grains par trou pour le riz. Afin de remplacer les manquants, un ressemis a été réalisé 10 jours après le semis. Les traitements ont été totalement repartis en randomisation complète au sein d'un bloc et chaque traitement a été répété quatre fois. Il y a donc quatre bloc en tout.

Avant la mise en place de l'expérimentation, toutes les parcelles du dispositif ont été labourées à l'« angady » sur une profondeur de 20 cm. Ceci concerne aussi les parcelles mises sous couvert étant donné qu'en SCV, dans la pratique, les parcelles sont labourées en première année de culture.

Tableau 2. Les 14 traitements retenus pour le dispositif expérimental

Codes Traitements	Mode de gestion du sol	Types de fertilisants	Doses d'apport de Phosphore	
			P inorganique	P organique
CT-Co	Avec labour	Témoin absolu	0	0
CT-TSP5			5 kg P TSP ha ⁻¹	0
CT-TSP20	Avec labour	Minéral (TSP ¹)	20 kg P TSP ha ⁻¹	0
CT-TSP50			50 kg P TSP ha ⁻¹	0
CT-M20	Avec labour	Organique (Fumier ²)	0	20 kg P fumier ha ⁻¹
CT-TSP5-M20			5 kg P TSP ha ⁻¹	20 kg P fumier ha ⁻¹
CT-TSP20-M20	Avec labour	Minéral (TSP) et Organique (Fumier)	20 kg P TSP ha ⁻¹	20 kg P fumier ha ⁻¹
CT-TSP50-M20			50 kg P TSP ha ⁻¹	20 kg P fumier ha ⁻¹
CT-TSP5-GM20			5 kg P TSP ha ⁻¹	20 kg P Stylo ha ⁻¹
CT-TSP20-GM20	Avec labour	Minéral (TSP) et Organique (Stylo ³)	20 kg P TSP ha ⁻¹	20 kg P Stylo ha ⁻¹
CT-TSP50-GM20			50 kg P TSP ha ⁻¹	20 kg P Stylo ha ⁻¹
NT-TSP5-M20	Sans labour	Minéral (TSP) et Organique (fumier)	5 kg P TSP ha ⁻¹	20 kg P fumier ha ⁻¹
NT-TSP20-M20			20 kg P TSP ha ⁻¹	20 kg P fumier ha ⁻¹
NT-TSP20-GM20	Sans labour	Minéral (TSP) et Organique (Stylo)	20 kg P TSP ha ⁻¹	20 kg P Stylo ha ⁻¹

3.2.3.1. Intrants apportés

a. Le fumier

Le fumier qui a été utilisé durant l'essai est un mélange de paille de riz, de « bozaka » utilisés comme litière dans les étables et de déjections de bœufs. Le mélange a été stocké pendant plusieurs semaines dans l'étable avant utilisation. On obtient alors une matière avec des débris de végétaux à l'état de décomposition bien avancée, de couleur très sombre et d'odeur très caractéristique. Avant application, des échantillons ont été analysés pour en déterminer la teneur en P en vue d'ajuster les quantités apportées. Le fumier a été apporté soit par enfouissement (CT) soit en couverture (NT). Le fumier a été apporté 2 jours avant le semis. Les teneurs en nutriments du fumier sont données dans le Tableau 3.

¹ TSP : Triple Superphosphate à 43% de P₂O₅

² Fumier : composé essentiellement d'excrément de bovin et de résidu et/ou paille de riz

³ Stylo : résidus de stylosanthès

b. Les résidus de stylosanthès

Les résidus de stylosanthès apportés sont constitués de biomasse aérienne de stylosanthès principalement de tige. Cette plante a été cultivée dans le Moyen-Ouest et a été transportée sur le site d'expérimentation au début de la mise en place de l'essai. C'est donc un apport exogène de matière organique. Le stylosanthès est une légumineuse fixatrice de N dont les résidus sont alors sensés apporter de l'azote en quantité abondante. Dans cette expérimentation, les résidus de stylosanthès ont été soit enfouis dans le cas d'un système avec labour classique soit en couverture pour le système sans labour. Les résidus de stylosanthès ont été apportés 2 jours avant le semis. Les teneurs en nutriments des résidus de stylosanthès sont données dans le Tableau 3.

Tableau 3. Teneurs en phosphore, en azote et en carbone du fumier et des résidus de stylosanthès apportés

	Teneur en phosphore (mg P kg ⁻¹)	Teneur en azote (g N kg ⁻¹)	Teneur en carbone (%)	Rapport C/P	Rapport C/N	Humidité de la matière apportée (%)	Apport équivalent à 20 kg P ha ⁻¹ (t ha ⁻¹)
Fumier	2000	14	24	119	17	46,8	18,8
Résidus de stylosanthès	1150	12,8	52	451	40	10	19,3

c. Le triple superphosphate et le sulfate de potassium

L'engrais phosphaté sous forme minérale utilisé durant l'expérimentation était le Triple Super Phosphate (TSP) renfermant 43 % de P₂O₅. Le TSP a été enfouis ou non, selon le mode de gestion du sol, 2 jours avant le semis c'est-à-dire en même temps que les apports de fumier et de stylosanthès.

Un apport de potassium a été aussi réalisé sur toutes les parcelles en vue d'uniformiser la teneur en K dans l'ensemble du dispositif. Le potassium a été apporté sous forme de sulfate de potassium (K₂SO₄) avec un apport équivalent à 40 kg K ha⁻¹ (soit 48 kg K₂O ha⁻¹). Le K₂SO₄ a été apporté en couverture au moment du ressemis, c'est-à-dire environ 10 jours après le semis.

Le fumier, les résidus de stylosanthès, le triple superphosphate et le sulfate de potassium ont été tous apportés par épandage et non localisés.

3.2.3.2. Suivis et soins apportés

Des sarclages et des binages ont été réalisés durant tout le cycle en fonction du développement des mauvaises herbes et du tassement du sol. Le nettoyage du pourtour des parcelles revêt aussi une grande importance dans la gestion des nuisibles puisque ces derniers trouvent refuge le plus souvent dans les buissons entourant le dispositif, ce qui augmentera les risques d'attaque d'insectes.

3.2.4. Prélèvements de sols et de matériels végétaux au stade floraison du haricot

Les prélèvements de sol et de matériels végétaux ont été réalisés au stade floraison du haricot, période où l'activité biologique du sol est la plus importante et où les deux plantes absorbent le plus de nutriments. C'est donc le moment propice pour évaluer la dynamique des nutriments dans le sol.

Pour chaque traitement, des sols rhizosphériques (sols adhérant aux racines de riz et de haricot) et des sols non rhizosphériques (prélevés entre les lignes de plantation) ont été prélevés. Pour le prélèvement de sol rhizosphérique de riz, 4 pieds de riz ont été sélectionnés vers la partie haute de la parcelle (Site 1) et 4 autres pieds vers la partie avale (Site 2) (Figure 5). Les sols rhizosphériques de ces 8 pieds ont été prélevés et mélangés afin d'obtenir une aliquote qui représente l'échantillon de sol rhizosphérique de riz pour le traitement en question. Le même principe a été suivi lors du prélèvement et de l'échantillonnage du sol rhizosphérique de haricot, mais les haricots prélevés devront être ceux qui sont directement juxtaposés aux riz précédemment prélevés pour pouvoir évaluer d'éventuels transferts de nutriments entre les deux cultures. Le sol non rhizosphérique (bulk soil ou sol n'étant pas en contact avec les racines) pour le traitement en question a été prélevé entre les lignes sur une profondeur de 20 cm.

Après le prélèvement des 8 pieds de riz du site 1 et 2, les matériels végétaux ont été conservés dans une enveloppe, il en était de même pour les 8 pieds de haricot. Une fois arrivé au laboratoire, les nodules présents au niveau des racines de haricot ont été enlevés et comptés un à un. Le reste de la biomasse de haricot ainsi que les matériels végétaux de riz ont été étuvés à 40°C pour les faire sécher.

Par ailleurs, une partie du sol rhizosphérique du riz et du haricot a été directement séchée à l'air libre tandis qu'une autre partie a été conservée au frais à 4°C pour les besoins des analyses microbiologiques (biomasse microbienne) et la détermination de l'azote minéral. Le sol non rhizosphérique a été aussi traité de la même sorte en séchant une partie et en conservant une autre partie au frais. Les échantillons devant être conservés au frais ont été gardés au réfrigérateur en attendant leurs analyses.

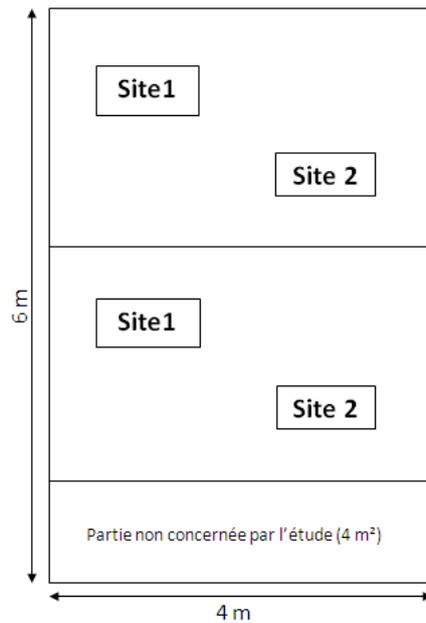


Figure 5. Sites de prélèvement de matériels végétaux et de sol au sein d'une parcelle. Exemple d'une parcelle subdivisée en deux sous-parcelles.

3.2.5. Estimation du rendement du haricot et du riz

3.2.5.1. Méthodes de récolte du haricot

Le haricot a été récolté bien avant le riz car la durée de son cycle est plus courte que celle du riz. Etant donné que la densité de semis était de 16 pieds de plantes par m^2 (dont 8 pieds de riz et 8 pieds de haricot), on peut alors avoir 8 pieds de haricots par m^2 . Ainsi, la récolte du haricot consistait à prendre deux surfaces de $1 m^2$ chacune c'est-à-dire deux sites de prélèvement par traitement (Site 3 et Site 4) (Figure 6). Les gousses des haricots contenues dans cette surface ($2 m^2$) ont toutes été prélevées alors que la biomasse (tige, feuille et racine) a été laissée sur place. Dans le cas où le nombre de pieds contenu dans cette surface ($2 m^2$) n'était pas égal à 16 pieds, les gousses des pieds se trouvant à l'extérieur des deux carrés ont été prélevées pour combler le manque et faire en sorte que l'on obtient 16 pieds dans les $2 m^2$.

A l'arrivée au laboratoire, les gousses ont été étuvées à $40^\circ C$ durant une semaine, pesées puis égoussées. Le poids des graines a été noté et c'était à partir des valeurs obtenues que le rendement du haricot a été calculé.

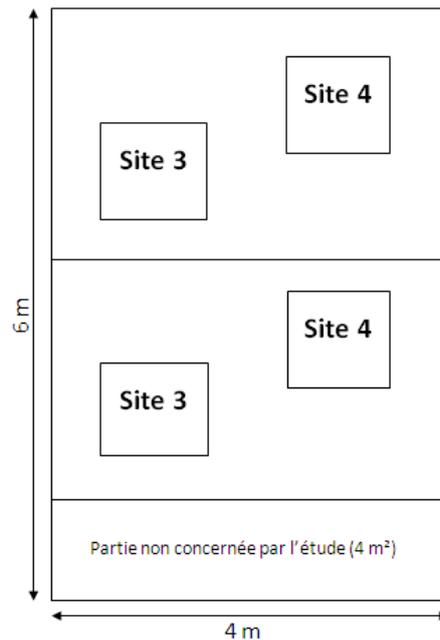


Figure 6. Sites de prélèvement des gousses de haricot et des biomasses et grains de riz au moment des récoltes au sein d'une parcelle. Exemple d'une parcelle subdivisée en deux sous-parcelles.

3.2.5.2. Méthodes de récolte du riz

La récolte du riz a été plus tardive que celle du haricot. Le principe d'échantillonnage des pieds à récolter a été le même que pour la récolte du haricot. Les pieds de riz récoltés ont été ceux se trouvant dans les mêmes carrés (Sites 3 et 4) utilisés lors de récolte du haricot (Figure 6), puisque les 16 pieds de riz contenus dans 2 m² ont été récoltés dans chaque traitement. Ainsi, lors de la récolte proprement dite, le riz a été fauché au ras du sol. La partie paniculaire a été directement placée dans un sachet en plastique qui a été fermé de manière à ce que l'on ne perde pas les grains. L'ensemble (panicules+tiges+grains) a été placé dans une enveloppe puis codé.

Lorsque les échantillons sont arrivés au laboratoire, les grains ont été séparés des pailles et placés dans une enveloppe préalablement pesée laquelle a été bien fermée. L'ensemble a été d'abord pesé (état humide) puis placé dans l'étuve à 60°C afin de les sécher. C'était après cet étuvage que les grains pleins ont été séparés des grains vides. Le poids des grains pleins constitue alors le rendement. Pour corriger les valeurs obtenues, une aliquote de grains pleins d'environ 15 g a été étuvée à 105°C. Ceci permettait d'éliminer le reste d'eau contenu dans les grains puis de calculer le rendement en grains à 13% d'humidité. En ce qui concerne les pailles, elles ont été pesées (état humide), séchées en serre puis pesées à nouveau.

3.2.6. Analyses au laboratoire

Dans le cadre de ce travail, seuls les échantillons de sols rhizosphériques de riz et de haricot ont fait l'objet d'analyses physico-chimiques et biologiques. Les résultats des analyses physico-chimiques et biologiques des échantillons de sol non rhizosphériques ne seront pas présentés dans ce document mais feront l'objet d'autres publications. Enfin, aucune analyse des matériels végétaux n'a été réalisée dans cette étude.

3.2.6.1. Détermination du carbone et de l'azote microbien du sol

La connaissance des valeurs du carbone et de l'azote microbien du sol permet d'évaluer l'importance de l'activité biologique sous le traitement en question. L'évaluation de la biomasse microbienne a été faite suivant la méthode de fumigation-extraction de Vance *et al.* (1987). La méthode consiste à fumer le sol frais avec du chloroforme et d'en extraire le carbone et l'azote soluble avec du K_2SO_4 à 0,5 M.

Pour l'extraction proprement dite de la biomasse microbienne C et N, les échantillons ont été fumigés avec du chloroforme dans un dessiccateur durant 5 jours à l'abri de la lumière. Cette étape vise à détruire les microorganismes du sol afin que le carbone et l'azote contenus soient libérés. Après la fumigation, la solution de K_2SO_4 à 0,5 M a servi de réactif d'extraction du C et N soluble total dans le sol avec un rapport sol:solution de 1:5 (c'est-à-dire 10 g de sol pour 50 ml de solution d'extraction). Le mélange solution-sol a été par la suite agité durant 1 heure et filtré à l'aide de filtre millipore (pores à 0,2 μm de diamètre). La même extraction (mais sans fumigation) a été réalisée avec les mêmes échantillons de sol afin d'obtenir les extraits non-fumigés. Tous les filtrats ont été conservés à 4°C jusqu'à leur arrivée à Montpellier pour le dosage du C et N soluble total avec le TOC/TN Analyzer. La biomasse microbienne C et N est donc la différence des valeurs obtenues entre l'extrait de sol fumigé et celui sans fumigation.

Les résultats donnés par le TOC/TN Analyzer, que ce soit pour les extraits fumigés ou non fumigés, sont le carbone total, le carbone organique total, le carbone inorganique et l'azote total soluble.

3.2.6.2. Détermination du phosphore microbien du sol et du phosphore disponible

La connaissance des valeurs du phosphore microbien permet de mieux cerner la dynamique de cet élément et surtout d'évaluer le phosphore contenu dans le compartiment microbien du sol. Le phosphore microbien a été extrait en suivant la méthode de fumigation-extraction de Kouno *et al.*

(1995), méthode basée sur le P résine. Ce mécanisme mime l'effet de la racine qui, en absorbant le P en solution, diminue sa concentration et entraîne la désorption du P de la phase solide du sol. La différence est que, en sus, le P microbien fait appel à un réactif qui détruira les cellules microbiennes afin de libérer le phosphore contenu dans ces cellules, ce réactif est l'hexanol.

Ainsi, trois sous échantillons de sol frais équivalents à 2 g de sol sec, dans lesquels on a mis des membranes de résines échangeuses d'anions, ont été agités avec 30 ml d'eau ultra pure durant 16 heures :

- (i) 1 ml d'hexanol a été ajouté dans le premier sous échantillon. L'hexanol sert à tuer les microbes, ce qui entraîne la libération des P contenus dans les cellules microbiennes
- (ii) 1 ml de solution de P à 20 ppm a été ajouté au second sous échantillon afin de corriger la sorption du sol et enfin,
- (iii) le dernier sous échantillon a été traité comme pour une analyse de P résine classique (donc aucun ajout).

Après les 16 heures d'agitation, le P adsorbé par les résines a été désorbé dans 30 ml de solution de NaCl/HCl à 0,1 M pendant 2 heures d'agitation. Le P contenu dans l'extrait de NaCl/HCl a été dosé par colorimétrie au vert de malachite.

Le P microbien a été obtenu par la différence entre les valeurs obtenues de l'extrait de sol fumigé avec de l'hexanol et celui non fumigé. La valeur obtenue a été corrigée en utilisant la valeur de l'extrait auquel on a ajouté 1 ml de solution de P à 20ppm, c'est la correction de la sorption du P. Par ailleurs, en faisant des analyses de P microbien, on obtient aussi du P résine.

3.2.6.3. Détermination du carbone organique du sol

La détermination du carbone organique (C.O.) du sol revêt une importance particulière. En effet, les anions RCOO^- issus de l'apport de matière organique contribuent à la disponibilité du P car ils entrent en concurrence avec le phosphore pour les sites d'adsorption (Dubus, 1997 ; De Brouwere *et al.*, 2003). Il se peut même que la matière organique accroisse la dissolution de P en formant des complexes avec Fe et Al sur lesquels P subit une précipitation (Radersma, 1996). Ainsi, le carbone organique du sol a été évalué d'après la méthode de Walkley et Black (1934) basée sur l'oxydation à chaud de la matière organique contenue dans le sol par un oxydant puissant en excès (dichromate de potassium : $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), qui est titré en retour par du Sel de Mohr $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$.

3.2.6.4. Détermination de l'azote minéral du sol (NH_4^+ et NO_3^-)

La connaissance des teneurs en azote minéral du sol permet d'évaluer le flux de l'élément azote dans le système sol-plante surtout dans un contexte de système de culture associant céréale et légumineuse. L'azote minéral (NH_4^+ et NO_3^-) a été extrait à partir de sol frais conservé à 4°C. L'échantillon a été agité pendant une heure avec une solution de KCl à 1M avec un rapport sol:solution de 1:10 (5g de sol dans 50 ml de solution KCl à 1M). L'extrait a été obtenu par filtration lente de la suspension. La détermination de l'ammonium et du nitrate utilise la réaction de Berthelot modifiée : l'ammonium est chloré en monochloramine ; celle-ci réagit avec le salicylate pour former le 5-aminosalicylate. Après oxydation et couplage oxydant, il se forme un complexe coloré vert. L'intensité de sa coloration, mesurée à 660 nm avec le colorimètre à flux continu (Skalar), est en relation avec la concentration initiale en ammonium.

3.2.6.5. pHeau et pHKCl du sol

La mesure du pH d'une suspension de sol dans l'eau rend compte de la concentration en ions H_3O^+ à l'état dissocié dans le liquide surnageant. (Baize, 2000).

Ainsi, une prise de 5 g de sol tamisé à 2 mm additionnée de 12,5 ml d'eau distillée du jour a été agitée pendant 30 minutes. La lecture du pHeau de la suspension de sol a été faite à l'aide d'un pH-mètre électronique préalablement calibré avec une solution tampon à pH=7 et une à pH=4.

Par ailleurs, le pHKCl a été évalué en additionnant du KCl à 1 M avec le même rapport sol:solution. Le pHKCl mesure l'acidité potentielle qui prend en compte les ions H_3O^+ libres dans la solution du sol et ceux déplacés par le KCl.

3.2.7. Analyses statistiques

Les résultats des analyses physico-chimiques et biologiques ont été collectés en vue de les traiter. Des tests d'égalité des variances ainsi que des tests de normalité ont été réalisés. Etant donné que certaines données n'ont pas répondu aux conditions d'homoscédasticité, des tests non-paramétriques de Kruskal-Wallis ont été effectués sur toutes les données avec un seuil de probabilité de 0,05 à l'aide du logiciel XLSTAT© 7.5.2. Le test de Kruskal-Wallis permet de mettre en évidence si les échantillons sont identiques ou non. Afin de comparer les traitements, il a été couplé avec la méthode de comparaison multiple de Dunn basée sur la comparaison des moyennes des rangs et non pas sur les valeurs numériques des mesures issues des échantillons.

Pour pouvoir mener des interprétations correctes des résultats d'analyse, les 14 traitements ont été d'abord traités et comparés selon la méthode statistique ci-dessus. Ceci permettrait de se donner des idées sur les effets de chaque traitement afin d'aboutir à une classification assez générale de tous les traitements. Ensuite, pour pouvoir comparer les deux modes de gestion du sol (labour conventionnel vs. sans labour) les traitements CT-TSP5-M20, CT-TSP20-M20 et CT-TSP20-GM20 ont été comparés aux traitements NT-TSP5-M20, NT-TSP20-M20 et NT-TSP20-GM20. Ceci permettrait de mettre en évidence d'éventuelles différences entre ces deux modes de gestion du sol. Par la suite, dans le cas des traitements sous labour conventionnel, les traitements TSP seul, TSP+fumier et TSP+résidus de stylosanthès ont été comparés entre eux afin de mettre en évidence des différences entre ces types d'apports de phosphore et, surtout, de comparer les deux types de matière organique apportée durant l'expérimentation.

Enfin, des méthodes de régression linéaire ainsi que des tests de corrélation de Pearson ont aussi été réalisés afin d'établir d'éventuelles corrélations entre les différents indicateurs et les quantités de P apportées.

4. Résultats et interprétations

Les résultats présentés dans cette partie sont le rendement en graine du haricot, le rendement en grain du riz, la biomasse microbienne carbone du sol, le carbone organique du sol, le phosphore microbien du sol, le phosphore disponible du sol (P résine), l'azote minéral du sol, le pHeau et le pHKCl du sol. Les résultats de la biomasse microbienne azote ne seront pas présentés dans ce mémoire puisque la pollution de l'un des réactifs utilisés lors de l'extraction a compromis la validité des résultats. Enfin, les résultats du nombre des nodules de haricot ne seront pas non plus présentés dans ce document.

Les résultats des différents paramètres étudiés pour l'ensemble des traitements sont alors présentés dans les Tableaux 4 et 5. Les résultats entre les différents traitements sont comparés d'après la méthode de comparaison multiple de Dunn couplée avec le test non paramétrique de Kruskal-Wallis à 5%. Les deux modes de gestion du sol (NT vs. CT) sont comparés avec la même méthode et l'effet du mode de gestion du sol est alors mis en évidence en comparant la moyenne des traitements en CT avec celle des traitements en NT. Les résultats sont présentés dans le Tableau 6 pour le haricot et dans le Tableau 7 pour le riz. Enfin, les trois modes d'apport de phosphore (TSP seul vs. TSP+fumier vs. TSP+résidus de stylosanthès) sont comparés de manière identique et les données présentées dans les Tableaux 8 et 9 respectivement pour le haricot et pour le riz.

4.1. Rendements du haricot et du riz

Pour le haricot, durant cette première année d'expérimentation, le traitement qui combine le triple superphosphate (TSP) à 20 kg P ha⁻¹ et le fumier à 20 kg P ha⁻¹ avec un labour conventionnel (CT-TSP20-M20) a obtenu le rendement le plus élevé avec 250 kg ha⁻¹. Le traitement CT-TSP50-GM20 a, par contre, obtenu le plus faible rendement avec seulement 61 kg ha⁻¹ (Tableau 4). Aucune corrélation significative entre le rendement du haricot et les doses d'apport de P n'a été trouvée. Le mode de gestion du sol n'a pas eu d'effet significatif sur le rendement du haricot (Tableau 6). Par contre, la forme d'apport de P a eu des effets significatifs sur le rendement du haricot puisque la moyenne des rendements du traitement TSP+fumier a été significativement supérieure à celles des traitements TSP seul et TSP+résidus de stylosanthès (p-value = 0,001) (Tableau 8).

En ce qui concerne le rendement en grain du riz, le traitement CT-TSP5-M20 a obtenu le rendement le plus élevé avec 1,69 t ha⁻¹ alors que le rendement le plus faible a été obtenu avec le traitement NT-TSP20-GM20 avec 0,34 t ha⁻¹ (Tableau 5). Les doses croissantes d'apport de P n'ont eu aucun effet sur le rendement en grain du riz. Aucun effet du mode de gestion du sol n'a été retrouvé au seuil 5% (Tableau 7). Cependant, la comparaison des moyennes des rendements des 3 formes d'apport de P a

montré des effets significatifs de ces formes d'apport. En effet, les moyennes des rendements des traitements TSP+fumier et TSP seul ont été significativement supérieures par rapport à celle du traitement TSP+résidus de stylosanthès (p -value < 0,0001) (Tableau 9).

4.2. Biomasse microbienne carbone et phosphore microbien des sols rhizosphériques du haricot et du riz

4.2.1. Biomasse microbienne carbone

Chez le haricot, l'activité microbienne a été particulièrement intense sous le traitement CT-TSP20-GM20 avec une biomasse microbienne carbone de 379 mg C kg⁻¹ tandis que c'était le traitement CT-TSP5-M20 qui a obtenu la plus faible valeur en biomasse microbienne carbone avec seulement 96 mg C kg⁻¹ (Tableau 4). Les doses d'apport de P n'ont eu aucun effet sur la biomasse microbienne carbone des sols rhizosphériques de haricot. De même, le mode de gestion du sol n'a pas eu d'effet significatif sur la biomasse microbienne de ces sols (Tableau 6). Par contre, la forme d'apport de P a eu des effets sur la biomasse microbienne. En effet, la moyenne des valeurs de biomasse microbienne du traitement TSP+résidus de stylosanthès a été significativement plus élevée par rapport à celle du traitement TSP+fumier. Toutefois, cet effet significatif ne correspond qu'à une p -value = 0,097 (Tableau 8).

Pour le riz, l'activité biologique la plus intense a été retrouvée sous le traitement CT-M20 avec 291 mg C kg⁻¹ alors que le traitement CT-TSP5 correspondait à l'activité biologique la plus faible (Tableau 5). Aucun effet des doses d'apport de P n'a été décelé. De même, le mode de gestion du sol n'a pas eu d'effet significatif sur l'activité biologique de ces sols (Tableau 7). Enfin, comme pour les modes de gestion du sol, la forme d'apport de P n'a pas eu d'effet significatif sur la biomasse microbienne des sols rhizosphériques de riz (p -value = 0,177) (Tableau 9).

4.2.2. Phosphore microbien

Pour le haricot, le phosphore contenu dans la biomasse microbienne du traitement CT-TSP50-GM20 a été le plus élevé parmi celui des traitements testés avec une valeur moyenne de 6,07 mg P kg⁻¹. Le traitement CT-TSP20 a, par contre, obtenu le P microbien le plus faible avec seulement 1,89 mg P kg⁻¹ (Tableau 4). En outre, aucun effet du mode de gestion du sol n'apparaît puisque la moyenne du P microbien des traitements en CT était statistiquement la même que celle des traitements NT (p -value = 0,119) (Tableau 6). Par contre, la forme d'apport de P a eu des effets sur le P microbien du sol. En effet, la moyenne du P microbien du traitement TSP+résidus de stylosanthès a été significativement

supérieure à celle du traitement TSP seul. Toutefois, cet effet significatif ne correspond qu'à une p-value = 0,077 (Tableau 8).

Pour le cas des sols rhizosphériques de riz, le phosphore contenu dans le corps microbien du traitement CT-TSP20 a été le plus élevé avec 7,02 mg P kg⁻¹ contre 1,91 mg P kg⁻¹ pour le traitement CT-Co lequel a enregistré le P microbien le plus faible parmi les traitements en présence (Tableau 5). Par ailleurs, la comparaison des moyennes du P microbien entre CT et NT ne montre aucun effet du mode de gestion du sol sur ce paramètre (Tableau 7). De même, aucun effet des formes d'apport de P (TSP seul vs. TSP+fumier vs. TSP+résidus de stylosanthès) n'a été décelé puisqu'aucune différence significative n'a été observée entre les moyennes du P microbien des 3 formes d'apport de P (p-value = 0,176) (Tableau 9).

Tableau 4. Rendement du haricot et résultats des analyses physico-chimiques et biologiques des sols rhizosphériques de haricot

	Rendement en graine (kg ha ⁻¹)	Biomasse microbienne carbone (mg C kg ⁻¹)	Phosphore microbien (mg P kg ⁻¹)	Carbone organique (%)	Phosphore disponible (mg P kg ⁻¹)	Nitrate (mg N-NO ₃ ⁻ kg ⁻¹)	Ammonium (mg N-NH ₄ ⁺ kg ⁻¹)	pHeau	pHKCl
CT-Co	74 de	184 bc	2,92 c	1,69 ab	12,4 abc	63,6 bc	2,7 bcd	5,31 d	5,45 abc
CT-TSP5	98 bcde	231 abc	2,98 c	1,5 b	5,3 d	54,4 bc	13,6 abcd	5,52 bcd	5,19 c
CT-TSP20	85 cde	121 bc	1,89 c	1,82 ab	9,3 abcd	53,7 bc	11,3 abcd	5,46 bcd	5,31 bc
CT-TSP50	141 abcd	169 bc	5,03 abc	1,83 ab	20,5 a	64,3 bc	17,3 ab	5,5 cd	5,33 abc
CT-M20	129 abcd	249 abc	2,6 c	1,89 a	5,8 cd	89,4 ab	0,9 d	5,53 bcd	5,39 abc
CT-TSP5-M20	186 ab	96 c	3,39 abc	1,88 a	7,4 bcd	90,8 ab	2,1 cd	5,65 abcd	5,32 bc
CT-TSP20-M20	250 a	173 bc	4,07 abc	1,9 a	14,5 ab	65,7 bc	10,8 abcd	5,58 bcd	5,48 abc
CT-TSP50-M20	154 abc	175 bc	2,88 c	1,77 ab	17,6 a	88,9 ab	3,1 cd	5,73 abc	5,62 a
CT-TSP5-GM20	114 bcde	196 bc	3,03 abc	1,84 ab	6 bcd	59,5 bc	8,8 abcd	5,64 abcd	5,48 abc
CT-TSP20-GM20	99 bcde	379 a	5,53 ab	1,84 ab	8,8 abcd	51,1 c	20 ab	5,59 abcd	5,44 abc
CT-TSP50-GM20	61 e	194 bc	6,07 a	1,94 a	11,7 abc	85,1 ab	18 abc	5,62 abcd	5,57 ab
NT-TSP5-M20	203 ab	228 abc	3,16 c	1,81 ab	6,7 bcd	59,1 bc	25,8 a	5,89 a	5,29 bc
NT-TSP20-M20	122 abcde	285 ab	3,48 abc	1,8 ab	9,4 abcd	101,4 ab	4,1 bcd	5,84 ab	5,7 a
NT-TSP20-GM20	185 ab	240 abc	3,16 bc	1,9 a	8,1 bcd	124,5 a	1,1 d	5,63 abcd	5,47 abc

Les moyennes suivies par la même lettre à l'intérieur d'une même colonne ne sont pas significativement différentes d'après la méthode de comparaison multiple de Dunn couplée avec le test non paramétrique de Kruskal-Wallis à 5%.

Tableau 5. Rendement du riz et résultats des analyses physico-chimiques et biologiques des sols rhizosphériques de riz

	Rendement en grain (t ha ⁻¹)	Biomasse microbienne carbone (mg C kg ⁻¹)	Phosphore microbien (mg P kg ⁻¹)	Carbone organique (%)	Phosphore disponible (mg P kg ⁻¹)	Nitrate (mg N-NO ₃ ⁻ kg ⁻¹)	Ammonium (mg N-NH ₄ ⁺ kg ⁻¹)	pHeau	pHKCl
CT-Co	0,95 ab	221ab	1,91 c	1,73 c	7,2 cd	63,9 bcde	4,8 cd	5,47 abc	5,39 bcd
CT-TSP5	1,21 a	98 c	2,62 abc	1,92 abc	4,9 d	53,2 de	5,9 bcd	5,16 c	5,36 bcd
CT-TSP20	1,19 a	103 c	7,02 a	1,79 bc	14,5 abc	49,9 e	12 abc	5,46 abc	5,31 bcd
CT-TSP50	1,19 a	184 abc	5,94 ab	1,91 abc	23,8 ab	58,2 cde	8,6 abcd	5,52 abc	5,44 bcd
CT-M20	1,53 a	291 a	2,22 bc	1,7 c	5,5 d	93,1 abc	15,1 abc	5,63 ab	5,29 bcd
CT-TSP5-M20	1,69 a	161 abc	2,93 abc	1,99 ab	9 bcd	95,6 ab	6,2 abcd	5,8 a	5,46 abcd
CT-TSP20-M20	1,58 a	236 ab	2,01 bc	1,77 abc	15,3 abc	106,9 ab	10,9 abcd	5,8 a	5,44 abcd
CT-TSP50-M20	1,63 a	166 abc	2,45 abc	1,92 abc	38,4 a	95,3 abc	5,4 bcd	5,54 abc	5,71 a
CT-TSP5-GM20	0,57 b	108 c	2,84 abc	1,82 abc	4 d	88,4 abcd	6 abcd	5,32 bc	5,12 d
CT-TSP20-GM20	0,56 b	149 bc	4,35 ab	1,77 abc	9 abcd	68,2 bcde	4,7 cd	5,64 abc	5,24 cd
CT-TSP50-GM20	0,47 b	179 abc	3,33 abc	1,75 c	16,1 abc	108,5 ab	18,2 ab	5,65 abc	5,48 abcd
NT-TSP5-M20	1,05 ab	180 abc	4,11 abc	1,95 abc	5,7 d	76,2 abcde	3,3 d	5,56 abc	5,56 abc
NT-TSP20-M20	0,99 ab	215 abc	3,36 abc	1,83 abc	6,3 cd	73,8 bcde	3,4 d	5,84 a	5,6 abc
NT-TSP20-GM20	0,34 b	282 ab	3,16 abc	2,03 a	10,6 abcd	121,1 a	27,4 a	5,64 abc	5,67 ab

Les moyennes suivies par la même lettre à l'intérieur d'une même colonne ne sont pas significativement différentes d'après la méthode de comparaison multiple de Dunn couplée avec le test non paramétrique de Kruskal-Wallis à 5%.

4.3. Teneurs en carbone organique et en phosphore et azote disponibles des sols rhizosphériques du haricot et du riz

4.3.1. Pourcentages de carbone organique

Pour le cas du haricot, le traitement CT-TSP50-GM20 a obtenu le pourcentage de carbone organique (C.O.) le plus élevé avec 1,94% tandis que c'était le traitement CT-TSP5 qui a obtenu le pourcentage de C.O. le plus faible avec seulement 1,5% (Tableau 4). Aucun effet des doses d'apport de P sur le pourcentage de C.O. n'a été observé. De même, le mode de gestion du sol (NT vs. CT) n'a eu aucun effet sur le pourcentage de C.O. du sol (Tableau 6). Enfin, les formes d'apport de P n'ont eu aucun effet significatif sur le pourcentage de C.O. du sol (Tableau 8).

Pour le cas du riz, le traitement NT-TSP20-GM20 a obtenu le pourcentage de C.O. le plus élevé avec une valeur de 2,03%. Par contre, le traitement CT-M20 correspondait au plus faible pourcentage de C.O. avec 1,7% (Tableau 5). Aucun effet des doses d'apport de P sur le pourcentage de C.O. n'a été retrouvé. De même, le mode de gestion du sol et les différentes formes d'apports de P n'ont pas eu d'effets significatifs sur le pourcentage de C.O. des sols rhizosphériques du riz (Tableaux 7 et 9).

4.3.2. Teneurs en phosphore disponible (P résine)

Pour le cas du haricot, en comparant tous les traitements en présence, le traitement CT-TSP50 a obtenu la teneur en P disponible la plus élevée avec 20,5 mg P kg⁻¹ tandis que le traitement CT-TSP5 correspondait à la teneur en P disponible la plus faible avec 5,3 mg P kg⁻¹ (Tableau 4). Les doses d'apports de P total et de P minéral ont eu des effets significatifs sur le P disponible avec respectivement un coefficient de détermination $R^2 = 0,336$ (p-value = 0,03) (Figure 7) et un $R^2 = 0,6$ (p-value = 0,001) (Figure 8). Par ailleurs, les deux modes de gestion du sol n'ont eu aucun effet sur la disponibilité du phosphore puisqu'aucune différence significative n'a été observée entre les moyennes obtenues (p-value = 0,242) (Tableau 6). De même, les différentes formes d'apport de P (TSP seul, TSP+fumier, TSP+résidus de stylosanthès) n'ont pas eu d'effets significatifs sur la disponibilité du phosphore (p-value = 0,485) (Tableau 8).

Pour le cas du riz, parmi les traitements en présence, le traitement CT-TSP50-M20 a permis d'obtenir le P disponible le plus élevé avec 38,4 mg P kg⁻¹ tandis que la teneur en P disponible la plus faible correspondait à celle du traitement CT-TSP5-GM20 avec seulement 4 mg P kg⁻¹ (Tableau 5). En outre, les doses d'apport de P total et de P minéral ont eu des effets significatifs sur les teneurs en P résine des sols rhizosphériques du riz avec respectivement un coefficient de détermination $R^2 = 0,52$ (p-value

= 0,004) (Figure 9) et $R^2 = 0,69$ (p-value = 0,00022) (Figure 10). Le mode de gestion du sol a eu des effets significatifs sur le P disponible puisque le P disponible sous labour conventionnel était significativement plus élevé par rapport à celui sous SCV (p-value = 0,028) (Tableau 7). Par ailleurs, les différentes formes d'apport de P n'ont pas eu d'effets significatifs sur la teneur en P disponible des sols rhizosphériques de riz (p-value = 0,242) (Tableau 9).

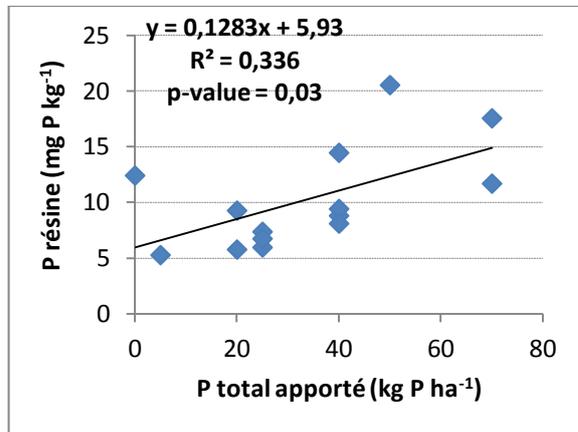


Figure 7. Corrélation entre le P résine et le P total apporté sous haricot

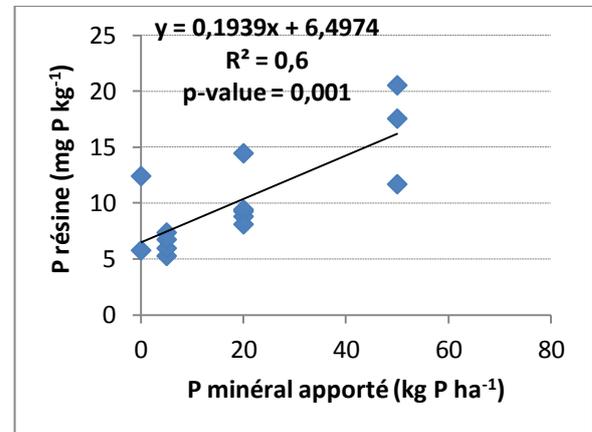


Figure 8. Corrélation entre le P résine et le P minéral apporté sous haricot

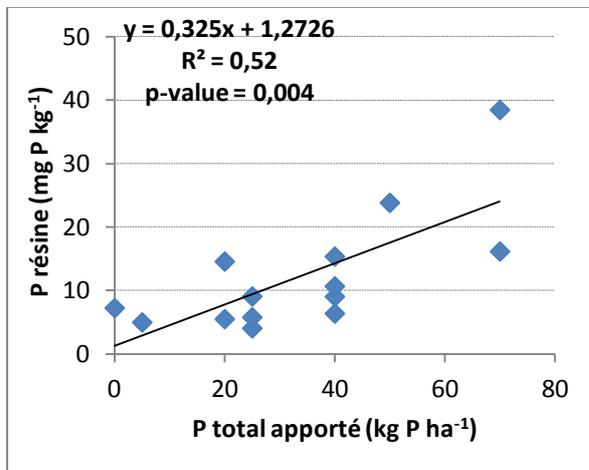


Figure 9. Corrélation entre le P résine et le P total apporté sous riz

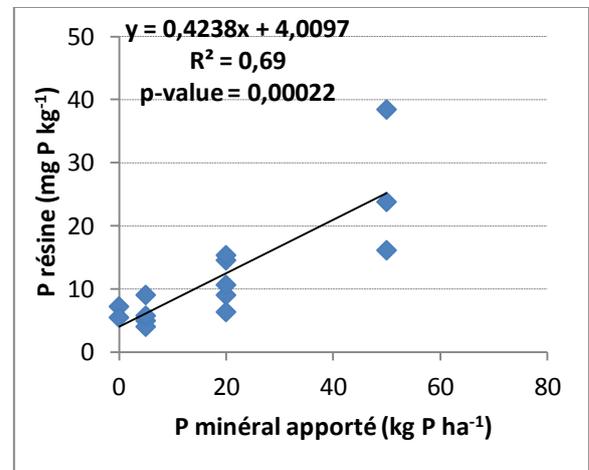


Figure 10. Corrélation entre le P résine et le P minéral apporté sous riz

4.3.3. Teneurs en azote minéral (nitrate et ammonium)

Pour le cas du nitrate des sols rhizosphériques du haricot, la comparaison de l'ensemble des traitements a montré que le traitement NT-TSP20-GM20 a obtenu la teneur la plus élevée en nitrate

avec 124,5 mg N-NO₃⁻ kg⁻¹ tandis que la teneur en nitrate la plus faible correspondait au traitement CT-TSP20-GM20 avec 51,1 mg N-NO₃⁻ kg⁻¹ (Tableau 4). Aucun effet des doses d'apport de P n'a été décelé sur les teneurs en NO₃⁻ des sols rhizosphériques de haricot. De même, le mode de gestion du sol n'a eu aucun effet significatif sur la teneur en azote nitrique des sols rhizosphériques de haricot (p-value = 0,191) (Tableau 6). Par contre, la forme d'apport de P a eu des effets sur la teneur en nitrate de ces sols. En effet, la moyenne des teneurs en nitrate du traitement TSP+fumier a été significativement supérieure à celle du traitement TSP seul (p-value = 0,047) (Tableau 8).

La teneur en ammonium (NH₄⁺) des traitements est très variable pour le cas des sols rhizosphériques du haricot. Toutefois, en comparant tous les traitements présents, le traitement NT-TSP5-M20 a obtenu la teneur la plus élevée en ammonium avec 25,8 mg N-NH₄⁺ kg⁻¹ tandis que le traitement CT-M20 correspondait à la teneur en ammonium la plus faible avec seulement 0,9 mg N-NH₄⁺ kg⁻¹ (Tableau 4). Aucun effet des doses d'apport de P n'a été observé. De même, le mode de gestion du sol (NT vs. CT) n'a pas eu d'effets significatifs sur la teneur en ammonium des sols rhizosphériques de haricot (p-value = 0,631) (Tableau 6). Par contre, la forme d'apport de P a eu des effets significatifs sur la teneur en ammonium des sols. En effet, les moyennes des teneurs en ammonium des traitements TSP seul et TSP+résidus de stylosanthès ont été significativement supérieures à celle du traitement TSP+fumier (p-value = 0,022) (Tableau 8).

Pour le cas du nitrate des sols rhizosphériques du riz, en comparant tous les traitements, le traitement NT-TSP20-GM20 a obtenu la teneur la plus élevée en nitrate avec 121,1 mg N-NO₃⁻ kg⁻¹ tandis que le traitement CT-TSP20 correspondait à la teneur la plus faible en nitrate avec seulement 49,9 mg N-NO₃⁻ kg⁻¹ (Tableau 5). Aucun effet des doses d'apport de P n'a été observé sur la teneur en nitrate de ces sols. De même, le mode de gestion du sol n'a eu aucun effet sur la teneur en nitrate des sols rhizosphériques du riz (Tableau 7). Par contre, la forme d'apport de P a eu des effets significatifs sur la teneur en nitrate de ces sols. En effet, les moyennes des teneurs en nitrate des traitements TSP+fumier et TSP+résidus de stylosanthès ont été significativement supérieures par rapport à celle du traitement TSP seul (p-value = 0,00032) (Tableau 9).

En ce qui concerne les teneurs en ammonium (NH₄⁺) des sols rhizosphériques de riz, la comparaison de l'ensemble des traitements a montré que le traitement NT-TSP20-GM20 a obtenu la teneur en ammonium la plus élevée avec 27,4 mg N-NH₄⁺ kg⁻¹ contre 3,3 mg N-NH₄⁺ kg⁻¹ pour le traitement NT-TSP5-M20 laquelle correspondait à la teneur la plus faible en ammonium (Tableau 5). Les doses d'apport de P n'ont eu aucun effet sur la teneur en ammonium des sols rhizosphériques de riz. De même, aucun effet du mode de gestion du sol n'a été observé puisque les moyennes enregistrées (NT vs. CT) ne présentaient pas de différence significative (Tableau 7). Enfin, la comparaison des traitements TSP seul, TSP+fumier et TSP+résidus de stylosanthès a montré aucun effet significatif de la forme d'apport de P sur la teneur en ammonium des sols rhizosphériques de riz (Tableau 9).

Tableau 6. Comparaison des paramètres étudiés en fonction du mode de gestion du sol (CT vs. NT). Cas du haricot

	Rendement en graine (kg ha ⁻¹)	Biomasse microbienne carbone (mg C kg ⁻¹)	Phosphore microbien (mg P kg ⁻¹)	Carbone organique (%)	Phosphore disponible (mg P kg ⁻¹)	Nitrate (mg N-NO ₃ ⁻ kg ⁻¹)	Ammonium (mg N-NH ₄ ⁺ kg ⁻¹)	pHeau	pHKCl
CT-TSP5-M20	186 abc	96 c	3,39 ab	1,88 a	7,4 b	90,8 ab	2,1 bc	5,65 a	5,32 b
CT-TSP20-M20	250 a	173 bc	4,07 ab	1,9 a	14,5a	65,7 abc	10,8 abc	5,58 a	5,48 ab
CT-TSP20-GM20	99 c	379 a	5,53 a	1,84 a	8,8 ab	51,1 c	20 ab	5,59 a	5,44 ab
NT-TSP5-M20	203 ab	228 abc	3,16 b	1,81 a	6,7 b	59,1 bc	25,8 a	5,89 a	5,29 b
NT-TSP20-M20	122 bc	285 ab	3,48 ab	1,8 a	9,4 ab	101,4 ab	4,1 abc	5,84 a	5,7 a
NT-TSP20-GM20	185 abc	240 abc	3,16 ab	1,9 a	8,1 b	124,5 a	1,1 c	5,63 a	5,47 ab
CT	185 ± 81 A	216 ± 140 A	4,33 ± 1,56 A	1,87 ± 0,19 A	10,2 ± 4,4 A	71,3 ± 25,8 A	11 ± 9 A	5,6 ± 0,3 A	5,42 ± 0,25 A
NT	169 ± 72 A	251 ± 96 A	3,24 ± 1,46 A	1,84 ± 0,16 A	8,2 ± 3,4 A	95 ± 41,5 A	10,3 ± 12,1 A	5,79 ± 0,19 A	5,49 ± 0,32 A
p-value	0,844	0,603	0,119	0,676	0,242	0,191	0,631	0,141	0,341

Les moyennes suivies par la même lettre à l'intérieur d'une même colonne ne sont pas significativement différentes d'après la méthode de comparaison multiple de Dunn couplée avec le test non paramétrique de Kruskal-Wallis à 5%. Les lettres en minuscule comparent les traitements élémentaires entre eux et les lettres en capitale comparent les moyennes des traitements en CT à celle des traitements en NT. *p-value* représente le risque encouru si on rejette l'hypothèse Ho (selon laquelle les échantillons ne sont pas significativement différents) alors qu'elle est vraie.

Tableau 7. Comparaison des paramètres étudiés en fonction du mode de gestion du sol (CT vs. NT). Cas du riz

	Rendement en grain (t ha ⁻¹)	Biomasse microbienne carbone (mg C kg ⁻¹)	Phosphore microbien (mg P kg ⁻¹)	Carbone organique (%)	Phosphore disponible (mg P kg ⁻¹)	Nitrate (mg N-NO ₃ ⁻ kg ⁻¹)	Ammonium (mg N-NH ₄ ⁺ kg ⁻¹)	pHeau	pHKCl
CT-TSP5-M20	1,69 a	161 a	2,93 a	1,99 a	9 ab	95,6 ab	6,2 abc	5,8 a	5,46 ab
CT-TSP20-M20	1,58 a	236 a	2,01 a	1,77 a	15,3a	106,9 ab	10,9 ab	5,8 a	5,44 ab
CT-TSP20-GM20	0,56 b	149 a	4,35 a	1,77 a	9 ab	68,2 b	4,7 bc	5,64 a	5,24 b
NT-TSP5-M20	1,05 ab	180 a	4,11 a	1,95 a	5,7 b	76,2 b	3,3 c	5,56 a	5,56 ab
NT-TSP20-M20	0,99 ab	215 a	3,36 a	1,83 a	6,3 b	73,8 b	3,4 bc	5,84 a	5,6 ab
NT-TSP20-GM20	0,34 b	282 a	3,16 a	2,03 a	10,6 ab	121,1 a	27,4 a	5,64 a	5,67 a
CT	1,28 ± 0,7 A	184 ± 78 A	3,08 ± 1,56 A	1,84 ± 0,24 A	11,1 ± 4,3 A	88,2 ± 25,7 A	6,9 ± 3,4 A	5,74 ± 0,28 A	5,38 ± 0,28 B
NT	0,87 ± 0,39 A	226 ± 104 A	3,68 ± 1,97 A	1,93 ± 0,15 A	7,7 ± 4,3 B	90,4 ± 29,2 A	10,2 ± 11,9 A	5,66 ± 0,22 A	5,61 ± 0,17 A
p-value	0,256	0,412	0,657	0,564	0,028	1	0,565	0,688	0,036

Les moyennes suivies par la même lettre à l'intérieur d'une même colonne ne sont pas significativement différentes d'après la méthode de comparaison multiple de Dunn couplée avec le test non paramétrique de Kruskal-Wallis à 5%. Les lettres en minuscule comparent les traitements élémentaires entre eux et les lettres en capitale comparent les moyennes des traitements en CT à celle des traitements en NT. *p-value* représente le risque encouru si on rejette l'hypothèse Ho (selon laquelle les échantillons ne sont pas significativement différents) alors qu'elle est vraie.

4.4. pHeau et pHKCl des sols rhizosphériques du haricot et du riz

Pour le cas du pHeau des sols rhizosphériques du haricot, les valeurs varient de 5,31 à 5,89. En effet, la comparaison de tous les traitements a montré que le témoin absolu (CT-Co) a obtenu le pHeau le plus acide avec 5,31 alors que le traitement NT-TSP5-M20 correspondait au pHeau le plus élevé avec 5,89 (Tableau 4). Les apports de P sous forme minérale n'ont pas eu d'effet significatif sur le pHeau du sol. De même, le mode de gestion du sol et les différentes formes d'apports de P (TSP seul, TSP+fumier, TSP+résidus de stylosanthès) n'ont pas eu d'effets significatifs sur le pHeau du sol (Tableaux 6 et 8).

Pour le pHKCl des sols rhizosphériques du haricot, en comparant tous les traitements, les valeurs du pHKCl variaient de 5,19 à 5,7 (Tableau 4). Les doses d'apport de P n'ont eu aucun effet sur le pHKCl des sols rhizosphériques de haricot. De même, le mode de gestion du sol n'a pas eu d'effets significatifs sur le pHKCl du sol (Tableau 6). Par contre, la forme d'apport de P a eu des effets significatifs sur le pHKCl de ces sols. En effet, les moyennes du pHKCl des traitements TSP+fumier et TSP+résidus de stylosanthès ont été significativement supérieures par rapport à celle du traitement TSP seul (Tableau 8).

Pour le cas du pHeau des sols rhizosphériques du riz, les valeurs variaient de 5,16 à 5,84, correspondant respectivement au pHeau des traitements CT-TSP5 et NT-TSP20-M20 (Tableau 5). En outre, le mode de gestion du sol n'a pas eu d'effets significatifs sur le pHeau des sols rhizosphériques de riz (Tableau 7). Par contre, la comparaison des moyennes du pHeau des traitements TSP seul et TSP+fumier montre que le pHeau du traitement TSP+fumier est significativement supérieur à celui du traitement TSP seul (Tableau 9). Toutefois, cet effet significatif ne correspond qu'à une p-value = 0,099 (Tableau 9).

Pour le pHKCl des sols rhizosphériques de riz, les résultats variaient de 5,12 à 5,71, correspondant respectivement au pHKCl des traitements CT-TSP5-GM20 et CT-TSP50-M20 (Tableau 5). Aucun effet des doses d'apport de P n'a été observé. Le mode de gestion du sol a eu des effets significatifs sur le pHKCl de ces sols puisque la moyenne du pHKCl du traitement SCV était significativement supérieure à celle du labour conventionnel (p-value = 0,036) (Tableau 7). En comparant les moyennes du pHKCl des 3 formes d'apport de P, celle du traitement TSP+fumier était significativement supérieure à celle du traitement TSP+résidus de stylosanthès. Toutefois, cet effet significatif ne correspond qu'à une p-value = 0,076 (Tableau 9).

Tableau 8. Comparaison des paramètres étudiés en fonction des formes d'apport de phosphore (TSP seul vs. TSP+fumier vs. TSP+ Résidus de stylosanthès). Cas du haricot sous labour conventionnel

	Rendement en graine (kg ha ⁻¹)	Biomasse microbienne carbone (mg C kg ⁻¹)	Phosphore microbien (mg P kg ⁻¹)	Carbone organique (%)	Phosphore disponible (mg P kg ⁻¹)	Nitrate (mg N-NO ₃ ⁻ kg ⁻¹)	Ammonium (mg N-NH ₄ ⁺ kg ⁻¹)	pHeau	pHKCl
CT-TSP5	98 bcd	231 ab	2,98 bc	1,5 b	5,3 c	54,4 b	13,6 ab	5,52 a	5,19 c
CT-TSP20	85 cd	121 bc	1,89 c	1,82 ab	9,3 abc	53,7 b	11,3 ab	5,46 a	5,31 bc
CT-TSP50	141 abc	169 bc	5,03 abc	1,83 ab	20,5 a	64,3 ab	17,3 a	5,5 a	5,33 abc
CT-TSP5-M20	186 ab	96 c	3,39 abc	1,88 a	7,4 c	90,8 a	2,1 b	5,65 a	5,32 bc
CT-TSP20-M20	250 a	173 bc	4,07 abc	1,9 a	14,5ab	65,7 ab	10,8 ab	5,58 a	5,48 abc
CT-TSP50-M20	154 abc	175 bc	2,88 abc	1,77 ab	17,6 ab	88,9 a	3,1 b	5,73 a	5,62 a
CT-TSP5-GM20	114 abcd	196 bc	3,03 ac	1,84 ab	6 c	59,5 ab	8,8 ab	5,64 a	5,48 abc
CT-TSP20-GM20	99 bcd	379 a	5,53 ab	1,84 ab	8,8 bc	51,1 b	20 a	5,59 a	5,44 abc
CT-TSP50-GM20	61 d	194 bc	6,07 a	1,94 a	11,7 abc	85,1 a	18 a	5,62 a	5,57 ab
TSP	108 ± 45 B	179 ± 74 AB	3,34 ± 2,4 B	1,74 ± 0,20 A	10,6 ± 7 A	57,7 ± 14,2 B	13,6 ± 3 A	5,49 ± 0,2 A	5,28 ± 0,25 B
TSP+M20	196 ± 68 A	148 ± 87 B	3,52 ± 1,55 AB	1,85 ± 0,16 A	12,2 ± 5,9 A	82,7 ± 24,4 A	5,3 ± 5,1 B	5,65 ± 0,2 A	5,47 ± 0,19 A
TSP+GM20	88 ± 40 B	256 ± 139 A	4,88 ± 1,51 A	1,86 ± 0,21 A	9,1 ± 4,1 A	67,2 ± 19,4 AB	15,6 ± 7,5 A	5,61 ± 0,31 A	5,5 ± 0,23 A
p-value	0,001	0,097	0,077	0,368	0,485	0,047	0,022	0,303	0,054

Les moyennes suivies par la même lettre à l'intérieur d'une même colonne ne sont pas significativement différentes d'après la méthode de comparaison multiple de Dunn couplée avec le test non paramétrique de Kruskal-Wallis à 5%. Les lettres en minuscule comparent les traitements élémentaires entre eux et les lettres en capitale comparent les moyennes des traitements TSPseul, TSP+fumier et TSP+résidus de stylosanthès entre elles. *p-value* représente le risque encouru si on rejette l'hypothèse Ho (selon laquelle les échantillons ne sont pas significativement différents) alors qu'elle est vraie.

Tableau 9. Comparaison des paramètres étudiés en fonction des formes d'apport de phosphore (TSP seul vs. TSP+fumier vs. TSP+ Résidus de stylosanthès). Cas du riz sous labour conventionnel

	Rendement en grain (t ha ⁻¹)	Biomasse microbienne carbone (mg C kg ⁻¹)	Phosphore microbien (mg P kg ⁻¹)	Carbone organique (%)	Phosphore disponible (mg P kg ⁻¹)	Nitrate (mg N-NO ₃ ⁻ kg ⁻¹)	Ammonium (mg N-NH ₄ ⁺ kg ⁻¹)	pHeau	pHKCl
CT-TSP5	1,21 ab	98 b	2,62 ab	1,92 ab	4,9 d	53,2 c	5,9 bc	5,16 c	5,36 b
CT-TSP20	1,19 ab	103 b	7,02 a	1,79 ab	14,5 abc	49,9 c	12 ab	5,46 abc	5,31 b
CT-TSP50	1,19 ab	184 ab	5,94a	1,91 ab	23,8 ab	58,2 bc	8,6 bc	5,52 abc	5,44 ab
CT-TSP5-M20	1,69 a	161 ab	2,93 ab	1,99 a	9 cd	95,6 a	6,2 bc	5,8 a	5,46 ab
CT-TSP20-M20	1,58 a	236 a	2,01b	1,77 ab	15,3abc	106,9 a	10,9 abc	5,8 a	5,44 ab
CT-TSP50-M20	1,63 a	166 ab	2,45 ab	1,92 ab	38,4 a	95,3 ab	5,4 bc	5,54 abc	5,71 a
CT-TSP5-GM20	0,57 b	108 b	2,84 ab	1,82 ab	4 d	88,4 ab	6 bc	5,32 bc	5,12 b
CT-TSP20-GM20	0,56 b	149 ab	4,35 ab	1,77 ab	9 bcd	68,2 abc	4,7 c	5,64 abc	5,24 b
CT-TSP50-GM20	0,47 b	179 ab	3,33 ab	1,75 b	16,1 abc	108,5 a	18,2 a	5,65 ab	5,48 ab
TSP	1,2 ± 0,3 A	128 ± 69 A	4,71 ± 3,41 A	1,87 ± 0,08 A	13,3 ± 8,7 A	53,8 ± 10 B	8,9 ± 4,8 A	5,38 ± 0,4 B	5,37 ± 0,29 AB
TSP+M20	1,63 ± 0,47 A	190 ± 77 A	2,52 ± 1,2 A	1,89 ± 0,21 A	17,4 ± 11,9 A	98,3 ± 21,3 A	7,5 ± 3 A	5,71 ± 0,27 A	5,54 ± 0,22 A
TSP+GM20	0,54 ± 0,24 B	146 ± 71 A	3,44 ± 1,56 A	1,78 ± 0,17 A	9,7 ± 5,5 A	88,4 ± 26 A	8,5 ± 6,1 A	5,54 ± 0,25 AB	5,28 ± 0,32 B
p-value	<0,0001	0,177	0,176	0,156	0,242	0,00032	0,964	0,099	0,076

Les moyennes suivies par la même lettre à l'intérieur d'une même colonne ne sont pas significativement différentes d'après la méthode de comparaison multiple de Dunn couplée avec le test non paramétrique de Kruskal-Wallis à 5%. Les lettres en minuscule comparent les traitements élémentaires entre eux et les lettres en capitale comparent les moyennes des traitements TSPseul, TSP+fumier et TSP+résidus de stylosanthès entre elles. *p-value* représente le risque encouru si on rejette l'hypothèse Ho (selon laquelle les échantillons ne sont pas significativement différents) alors qu'elle est vraie.

5. Discussion

5.1. Discussion sur les hypothèses

5.1.1. Hypothèse 1 : La disponibilité du phosphore augmente avec la dose d'apport de phosphore

L'une des hypothèses qui a été proposée dans ce travail a été le fait que la disponibilité du phosphore des sols rhizosphériques des deux cultures prélevés au stade floraison du haricot augmente avec les doses d'apport de P. En effet, dans un contexte de forte adsorption des ions orthophosphates sur les oxyhydroxides de Fe et d'Al des sols de « tanety » (Rabeharisoa, 2004), cet élément ne peut être que faiblement disponible pour les plantes. Il est donc nécessaire d'intervenir en apportant du phosphore sous forme directement assimilable et utilisable par les plantes. Les résultats des analyses physico-chimiques montrent une corrélation positive significative entre le P disponible des sols rhizosphériques de haricot et les quantités de P apportées aussi bien en termes de P total (Figure 7) que sous forme minérale (Figure 8). De même, le P disponible des sols rhizosphériques de riz ont aussi eu une corrélation positive significative avec les doses d'apport de P total (Figure 9) et de P minéral (Figure 10).

En outre, la disponibilité du P sous haricot répond mieux à la fertilisation phosphatée sous forme minérale par rapport à une fertilisation combinant du TSP avec de la matière organique. En effet, la pente de la droite de régression de l'apport exclusivement minéral (Figure 8) est plus élevée par rapport à celle de l'apport organo-minéral (P total) (Figure 7). Le coefficient de détermination est également plus élevé pour l'apport minéral que pour l'apport mixte, mettant en évidence une moindre variabilité de la réponse dans le premier cas.

Par ailleurs, en comparant la pente des droites de régression des Figures 9 et 10, comme pour le cas du haricot, la disponibilité du P sous riz répond mieux à la fertilisation phosphatée exclusivement minérale par rapport à une fertilisation combinant du TSP et de la matière organique.

Il a été donc démontré que la disponibilité du phosphore des sols rhizosphériques de haricot et de riz cultivés en intercalaire sur un sol ferrallitique a augmenté avec la dose d'apport de P aussi bien en terme de P total que de P minéral. Cette disponibilité du P répond mieux à la fertilisation exclusivement minérale par rapport à la fertilisation organo-minérale (P total). Ceci démontre l'importance des apports minéraux dans la mise à disponibilité du P et la libération probablement plus lente du P issu de la matière organique. Par ailleurs, ce résultat démontre aussi le fait que la méthode utilisant la résine échangeuse d'anions pour la détermination du phosphore disponible est une méthode qui traduit bien cette disponibilité puisqu'elle concorde avec les apports de P. Andriamananjara (2011)

et Henintsoa (2011) ont trouvé les mêmes résultats qui donnent une importance particulière à la méthode d'extraction à la résine échangeuse d'anions pour évaluer la disponibilité du P sur un sol ferrallitique de « tanety ».

Par ailleurs, les effets de la dose d'apport de P des trois formes d'apport (TSP seul, TSP+fumier et TSP+résidus de stylosanthès) sur la disponibilité du phosphore (P résine) ainsi que la comparaison de l'efficacité de ces trois formes d'apport vis-à-vis de la disponibilité du P ont été aussi évalués. Ainsi, pour le cas du haricot, si l'on considère les effets de la dose d'apport de P sur le P résine, c'était le traitement TSP seul qui a été le plus efficace puisque la droite de régression linéaire correspondant à ce traitement se trouvait au-dessus de celle des 2 autres traitements (Figure 11). Autrement dit, l'apport supplémentaire de phosphore sous forme de matière organique (fumier et résidus de stylosanthès) équivalant à 20 kg P ha⁻¹ n'était pas aussi efficace qu'un apport minéral sans ajout de matière organique, et cette inefficacité est plus accentuée avec les résidus de stylosanthès. Ceci pourrait être expliqué par le fait que le rapport C/P des apports organo-minéraux est élevé (119 pour le fumier et 451 pour les résidus de stylosanthès), ce qui aura pour conséquence une réorganisation du P minéral apporté avec la matière organique, occasionnant ainsi une faible disponibilité du P pour les 2 traitements organo-minéraux. Seule une surfertilisation sous forme minérale pourrait améliorer la disponibilité du phosphore dans ces cas là.

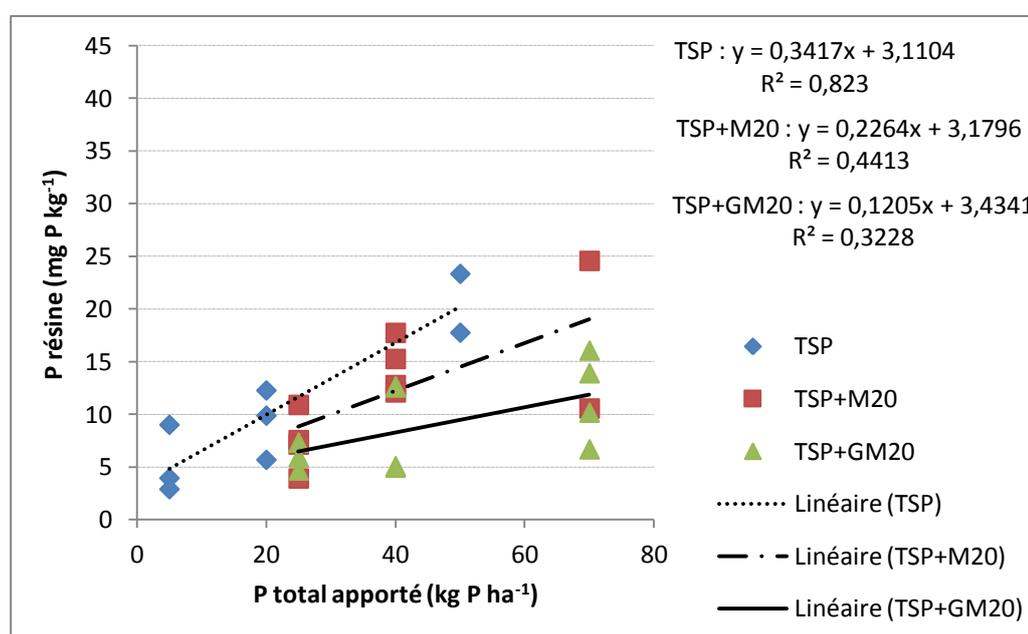


Figure 11. Effets des 3 formes d'apport du phosphore sur la disponibilité du P chez le haricot

En ce qui concerne le riz, le traitement TSP seul apporté à une dose inférieure à 50 kg P ha⁻¹ était le plus efficace en termes de P disponible puisque la droite de régression linéaire de ce traitement se trouvait au-dessus de celle des 2 autres traitements pour une dose d'apport de P inférieure à 50 kg P ha⁻¹ (Figure 12). L'inefficacité des traitements TSP+fumier et TSP+résidus de stylosanthès sur la

disponibilité du P par rapport au traitement TSP seul était aussi due à leur rapport C/P élevé qui favorise la réorganisation du P apporté. Cependant, à partir d'un apport de 50 kg P ha⁻¹, le traitement TSP+fumier devient le traitement le plus efficace. Ceci pourrait être expliqué par le fait qu'avec un apport de P minéral à dose élevée combiné avec un apport de matière organique facilement décomposable (fumier), le P retenu sur les sites d'adsorption pourrait être libéré grâce aux anions organiques qui entrent en compétition avec le P minéral sur ces sites (Dubus, 1997 ; De Brouwere *et al.*, 2003 ; Siddique et Robinson, 2003 ; Rabeharisoa, 2004 ; Fuentes *et al.*, 2006 ; Pavinato *et al.*, 2010) augmentant ainsi la disponibilité du phosphore.

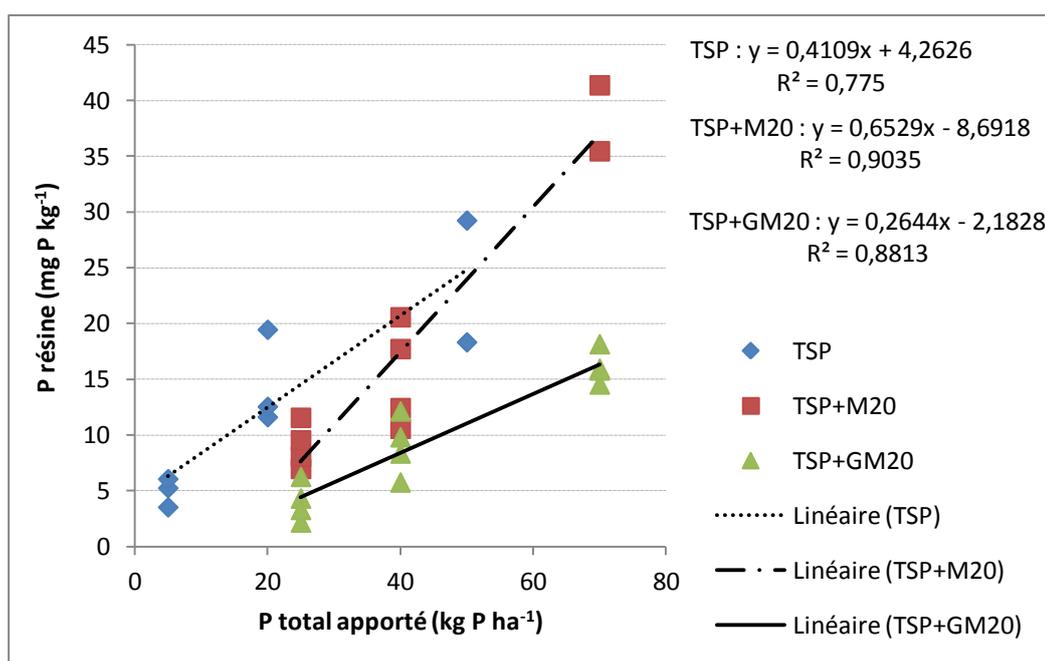


Figure 12. Effets des 3 formes d'apport du phosphore sur la disponibilité du P chez le riz

Ainsi, la première hypothèse qui stipulait que « la disponibilité du phosphore augmente avec la dose d'apport de P » a été validée. De plus, ces résultats ont permis de démontrer que cette disponibilité du P répond mieux à l'apport exclusivement minéral qu'à un apport organo-minéral et que la méthode utilisant la résine échangeuse d'anion traduit bien cette disponibilité du P. Cependant, en considérant séparément les 3 formes d'apport de P, le traitement TSP seul a été le plus efficace chez le haricot. Chez le riz, le même traitement (TSP seul) a été le plus efficace pour un apport inférieur à 50 kg P ha⁻¹ mais pour un apport supérieur à cette dose, le traitement TSP+fumier devient le plus efficace.

5.1.2. Hypothèse 2 : Le rendement du haricot et du riz augmente avec la dose d'apport de phosphore

La deuxième hypothèse qui a été avancée dans cette étude était que le rendement en graine du haricot et celui du riz augmenteraient avec la dose d'apport de phosphore. En effet, le phosphore est l'un des principaux nutriments dont les plantes ont besoin à travers tout leur cycle de développement. Cependant, les résultats des tests de corrélation entre les apports totaux et minéraux d'une part et le rendement du riz ou celui du haricot d'autre part ne présentaient pas de corrélation significative. De même, le P disponible n'était que très faiblement corrélé au rendement du haricot et du riz. Ceci montre que le phosphore n'est pas le seul élément limitant dans les sols ferrallitiques de « tanety » et, surtout que la disponibilité du phosphore évaluée au stade floraison du haricot ne permet pas d'expliquer le rendement des deux cultures même si cet élément participe à un certain nombre de réactions et processus biologiques notamment en jouant un rôle de source d'énergie (Stroia, 2007) ou encore en catalysant la synthèse des glucides à partir du CO₂ et de l'eau (Johnston et Steén, 2000).

Ainsi, la deuxième hypothèse qui stipulait que « le rendement du haricot et du riz augmenterait avec la dose d'apport de phosphore » n'a pas été validée puisque les doses d'apport croissant en P n'ont pas eu d'effets significatifs sur le rendement du haricot et du riz. Toutefois, ceci permet de déduire que le phosphore n'est pas le seul élément limitant dans le sol ferrallitique étudié.

5.1.3. Hypothèse 3 : Le TSP combiné avec du fumier comme apport de phosphore sous forme organique fournira la meilleure disponibilité en N et P ainsi que le meilleur rendement

La troisième hypothèse qui a été proposée dans ce travail était de voir si la combinaison du triple superphosphate avec du fumier comme matière organique source de phosphore contribuerait à l'amélioration de la disponibilité de l'azote et du phosphore ainsi qu'à l'amélioration du rendement pour les deux cultures riz et haricot.

Ainsi, pour le cas du haricot, la comparaison des moyennes des teneurs en nitrate (NO₃⁻) des 3 formes d'apport de P (traitements TSP seul, TSP+fumier et TSP+résidus de stylosanthès) a montré que la moyenne des teneurs en NO₃⁻ du traitement TSP+fumier était significativement plus élevée par rapport à celle du traitement TSP seul avec respectivement 82,7 mg N-NO₃⁻ kg⁻¹ et 57,7 mg N-NO₃⁻ kg⁻¹ (p-value = 0,047). Cependant, la moyenne des teneurs en nitrate du traitement TSP+fumier était statistiquement similaire à celle du traitement TSP+résidus de stylosanthès avec 67,2 mg N-NO₃⁻ kg⁻¹ pour ce dernier (p-value = 0,047). Tout ceci montre que le fumier apporte un surplus de N disponible sous forme nitrique par rapport à un traitement minéral et qu'il apporte plus d'azote disponible que les résidus de stylosanthès. D'autre part, le rapport C/N des résidus de stylosanthès est plus élevé que

celui du fumier (Tableau 3), ce qui entraîne une immobilisation plus importante de l'azote avec les résidus de stylosanthès par rapport au fumier.

La comparaison des moyennes des teneurs en ammonium des 3 formes d'apport de P a montré que celle du traitement TSP+fumier était significativement plus faible ($5,3 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$) par rapport à celle des 2 autres formes d'apport avec $13,6 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$ et $15,6 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$ respectivement pour le TSP seul et le TSP+ résidus de stylosanthès ($p\text{-value} = 0,022$). Ceci pourrait être dû au fait que l'azote apporté par le fumier est plus volatile donc se perd plus vite et plus facilement par volatilisation comparé à l'apport de N des résidus de stylosanthès. La lixiviation pourrait aussi être l'une des causes de cette faible teneur en ammonium du traitement TSP+fumier. Toutefois, aucune évaluation de la perte d'azote par volatilisation ni de la perte par lixiviation n'a été réalisée dans cette étude. Le traitement TSP+fumier a permis d'obtenir la teneur en nitrate significativement plus élevée par rapport au traitement TSP seul alors qu'il correspondait à la teneur la plus faible en ion ammonium, laissant supposer une meilleure nitrification dans ces conditions. Ceci pourrait être expliqué par le fait que le traitement TSP+fumier a obtenu des valeurs élevées en terme de $p\text{Heau}$ et $p\text{HKCl}$ par rapport au traitement exclusivement minéral. L'ajout de matière organique augmente le pH du sol puisque la matière organique est plus riche en cation qu'en anion et que les composés organiques issus de la décomposition de la matière complexent l'Al qui est la principale cause de l'acidification du sol (Bessho et Bell, 1992 ; Noble *et al.*, 1996 ; Noble et Randall, 1999). Cette alcalinisation sous le traitement TSP+fumier est accompagnée par l'intensification du processus de nitrification puisque la nitrification est favorisée à un pH peu acide. C'est pour cela que le traitement TSP+fumier correspondait à une teneur significativement plus élevée en nitrate et une teneur significativement plus faible en ion ammonium par rapport au traitement TSP seul.

En ce qui concerne la disponibilité du phosphore, aucune différence significative n'a été retrouvée entre les moyennes des teneurs en P disponible des 3 formes d'apport de P ($p\text{-value} = 0,485$). En effet, la moyenne des teneurs de P disponible du traitement TSP+fumier était de $12,2 \text{ mg P kg}^{-1}$ contre $10,6 \text{ mg P kg}^{-1}$ et $9,1 \text{ mg P kg}^{-1}$ respectivement pour les traitements TSP seul et TSP+résidus de stylosanthès. Ainsi, l'apport de matière organique source de P n'a pas eu les effets escomptés puisque les acides organiques issus de la décomposition de matière organique apportée devraient améliorer la disponibilité du P en rentrant en compétition avec les ions orthophosphates sur les sites d'adsorption (Dubus, 1997 ; De Brouwere *et al.*, 2003 ; Siddique et Robinson, 2003 ; Rabeharisoa, 2004 ; Fuentes *et al.*, 2006). Ce phénomène n'a pas pu être observé pour le haricot.

En outre, en ce qui concerne le rendement du haricot, la forme d'apport de P a eu des effets significatifs sur cet important paramètre. En effet, le traitement TSP+fumier a obtenu une moyenne de rendement significativement élevée (196 kg ha^{-1}) par rapport aux traitements TSP seul et TSP+résidus de stylosanthès qui ont obtenu respectivement 108 kg ha^{-1} et 88 kg ha^{-1} . D'après les résultats physico-chimiques, cette supériorité du rendement du traitement TSP+fumier était due surtout à la disponibilité en azote nitrique mais pas uniquement à la disponibilité du phosphore puisque cette forme d'apport avait obtenu une teneur élevée en nitrate par rapport aux deux autres même si les différences entre les

3 formes d'apport ne sont pas significatives. Ceci sous-entend que le phosphore n'est pas le seul élément limitant dans des sols ferrallitiques de « tanety » et/ou que le P disponible évalué au stade de floraison du haricot ne permet pas d'expliquer les rendements et qu'il a fallu évaluer le P disponible à un stade développement du haricot autre que la floraison. Toutefois, l'apport de fumier en complément du TSP a permis une amélioration nette du rendement par rapport à un apport TSP seul et un apport TSP+résidus de stylosanthès.

En ce qui concerne le riz, la comparaison des moyennes des teneurs en nitrate des 3 formes d'apport de P a permis de déduire que le traitement TSP+fumier avait obtenu une teneur en nitrate significativement élevée par rapport au traitement TSP seul avec $98,3 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$ pour le premier et $53,8 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$ pour le second ($p\text{-value} = 0,00032$). Par contre, les traitements TSP+fumier et TSP+résidus de stylosanthès ont obtenu des teneurs en nitrate statistiquement similaires avec $88,4 \text{ N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$ pour le dernier. Cet effet de l'apport complémentaire de fumier sur la disponibilité de l'azote nitrique rejoint toujours le fait que le fumier apporte de l'azote et que la teneur en azote du fumier apporté était plus élevée par rapport à celle des résidus de stylosanthès même si les effets sur le N disponible des traitements TSP+fumier et TSP+résidus de stylosanthès ne sont pas significativement différents. D'autre part, le rapport C/N des résidus de stylosanthès était plus élevé que celui du fumier, ce qui serait à l'origine de l'immobilisation de l'azote pour ces résidus de stylosanthès ayant pour conséquence une faible disponibilité des nutriments provenant de cette matière.

En ce qui concerne la teneur en ammonium des 3 formes d'apport de P, les résultats n'ont montré aucune différence significative entre les 3 formes d'apport de P ($p\text{-value} = 0,964$). Ainsi, sous riz, l'apport supplémentaire de matière organique source de phosphore ne permet pas d'améliorer le N disponible sous forme ammoniacale au stade floraison du haricot. Ainsi, comme pour le cas du haricot, le traitement TSP+fumier a permis d'obtenir la teneur en nitrate significativement plus élevée par rapport au traitement exclusivement minéral alors qu'il correspondait à la teneur la plus faible en ion ammonium. Les mêmes explications peuvent être avancées puisque le $p\text{Heau}$ et $p\text{HKCl}$ du traitement TSP+fumier étaient plus élevés que ceux du traitement TSP seul montrant ainsi l'effet alcalinisant de l'apport organique (Bessho et Bell, 1992 ; Noble *et al.*, 1996 ; Noble et Randall, 1999). Par conséquent, l'alcalinisation du sol intensifie la nitrification expliquant la teneur élevée en nitrate et la teneur faible en ammonium du traitement TSP+fumier par rapport au traitement exclusivement minéral.

La forme d'apport de P n'a pas eu d'effets significatifs (au seuil 5%) sur la disponibilité du phosphore des sols rhizosphériques de riz prélevés au stade floraison du haricot. En effet, la moyenne des teneurs en P disponible du traitement TSP+fumier était de $17,4 \text{ mg P kg}^{-1}$ et celle des traitements TSP seul et TSP+résidus de stylosanthès étaient respectivement de $13,3 \text{ mg P kg}^{-1}$ et $9,7 \text{ mg P kg}^{-1}$ ($p\text{-value} = 0,242$). Ainsi, au seuil 5%, aucune différence significative n'apparaît.

En ce qui concerne les effets de la forme d'apport de P sur le rendement en grain du riz, la comparaison des moyennes des rendements des 3 formes d'apport de P permet de conclure que le rendement des traitements TSP seul et TSP+fumier étaient significativement supérieurs à celui du

traitement TSP +résidus de stylosanthès avec respectivement 1,2 t ha⁻¹, 1,63 t ha⁻¹ et 0,54 t ha⁻¹ (p-value < 0,0001). Ainsi, le traitement TSP+fumier correspondait à un rendement significativement supérieur comparé au traitement TSP+résidus de stylosanthès. Comme pour le cas du haricot, ceci pourrait être attribué à la mauvaise qualité des résidus de stylosanthès apportés. En outre, l'activité biologique du traitement sous stylosanthès ne présentait pas de différence significative avec celle du traitement utilisant du fumier au seuil 5% avec respectivement une biomasse microbienne carbone de 146 mg C kg⁻¹ et 190 mg C kg⁻¹ et une p-value = 0,177. Ainsi, statistiquement, ces deux traitements avaient les mêmes activités biologiques mais étant donné que les résidus de stylosanthès étaient constitués principalement de tiges lignifiées par rapport au fumier qui est beaucoup plus facile à décomposer, ces résidus mettront beaucoup plus de temps à libérer les nutriments par rapport au fumier.

Ainsi, la troisième hypothèse proposée qui stipulait que « le TSP combiné avec du fumier comme apport de phosphore sous forme organique fournira la meilleure disponibilité en N et P ainsi que le meilleur rendement » n'a été que partiellement validée. En effet, le traitement TSP+fumier a permis d'obtenir des rendements significativement plus élevés aussi bien pour le haricot que pour le riz. D'autre part, les teneurs en azote disponible sous forme nitrique du traitement TSP+fumier étaient significativement plus élevées aussi bien chez le riz que chez le haricot alors que les teneurs en ion ammonium étaient faibles dans les deux cas. Ceci est dû à une diminution de l'acidité du sol favorisant la nitrification. Par ailleurs, le traitement TSP+fumier n'a pas permis d'améliorer le P disponible au stade floraison du haricot puisqu'aucune différence significative n'a été décelée entre le P disponible des traitements TSP+fumier, TSP+résidus de stylosanthès et TSP seul.

5.1.4. Hypothèse 4 : L'ajout de matière organique en complément du TSP apporté intensifie l'activité biologique du sol par rapport à des apports exclusivement minéraux

Cette quatrième hypothèse vise à vérifier si les apports de matière organique, quelle que soit leur forme, en sus des apports minéraux intensifieraient l'activité biologique dans les sols rhizosphériques de riz et de haricot par rapport à des traitements apportant uniquement du phosphore sous forme minérale. Ainsi, les résultats de la biomasse microbienne carbone ont montré qu'aucune différence significative n'a été observée entre la biomasse microbienne carbone des traitements TSP seul, TSP+fumier et TSP+résidus de stylosanthès aussi bien pour le haricot que pour le riz. De même, les teneurs en phosphore microbien du sol des 3 formes d'apport de P ont été statistiquement similaires aussi bien pour le haricot que pour le riz. En terme de carbone organique (C.O.), aucune différence significative n'a été décelée entre le C.O. des traitements TSP+matière organique et les traitements exclusivement minéraux aussi bien pour le haricot que pour le riz. Une augmentation des teneurs en

nitrate a été cependant observée dans le traitement TSP+fumier. Ces constats montrent que le fait d'ajouter de la matière organique en complément des apports minéraux n'a pas modifié l'activité biologique du sol, hormis la nitrification, pour cette première année d'expérimentation. Cette situation est assez étonnante car une intensification de l'activité biologique du sol est souvent observée suite à des apports organiques. Cette intensification de l'activité biologique du sol aurait, par la suite, comme conséquence l'hydrolyse enzymatique de la matière organique par les phosphatases (Machado et Furlani, 2004 ; Rengel, 2008 ; Turner, 2008) ce qui devrait améliorer la disponibilité du phosphore. Mais durant la première année d'expérimentation, ce phénomène n'a pas pu être observé. Par contre, ces constats permettent de déduire que même des traitements sans apports de matière organique auront les mêmes activités biologiques que ceux faisant intervenir des apports organiques exogènes ce qui est particulièrement intéressant. En outre, en terme de P microbien, ces résultats permettent aussi de montrer que les microorganismes du sol pourraient utiliser uniquement le P minéral apporté par les différents fertilisants puisque c'est la forme la plus accessible pour ces microbes.

Ainsi, la quatrième hypothèse qui stipulait que « l'ajout de matière organique en complément du TSP apporté intensifierait l'activité biologique du sol par rapport à des apports exclusivement minéraux » n'a pas été validée pour les deux cultures pour cette première année d'expérimentation.

5.1.5. Hypothèse 5 : Le mode de gestion du sol aurait des effets significatifs sur les paramètres physico-chimiques et biologiques du sol ainsi que sur le rendement des deux cultures

Cette cinquième hypothèse vise à mettre en évidence si le mode de gestion du sol, selon que le sol a été labouré ou non, a eu des effets significatifs sur les paramètres physico-chimiques et biologiques du sol et sur le rendement des deux cultures. Ainsi, les résultats ont montré que le mode de gestion du sol n'a eu aucun effet significatif sur le rendement et les paramètres physico-chimiques et biologiques chez le haricot tandis que chez le riz, le mode de gestion du sol a eu des effets significatifs uniquement sur la disponibilité du phosphore et le pHKCl. En effet, chez le riz, le P disponible du traitement sous labour a été significativement supérieur à celui du traitement sous SCV. Ceci démontre l'importance du labour dans la dynamique du phosphore puisque le labour favorise l'aération du sol, donc optimise la circulation de l'eau dans le sol et étant donnée que le P se diffuse dans la solution du sol, cette aération permet d'optimiser le transport des nutriments dont le P. Par ailleurs, chez le riz, le pHKCl du traitement SCV a été significativement supérieur à celui du traitement sous labour. Autrement dit, chez le riz, le SCV est une pratique qui n'acidifierait pas le sol mais, au contraire, améliore le pH du sol.

Ainsi, la cinquième hypothèse qui stipulait que « le mode de gestion du sol aurait des effets significatifs sur les paramètres physico-chimiques et biologiques du sol ainsi que sur le rendement des deux cultures » n'a été que partiellement validée.

5.2. Discussion sur les points forts et les limites de l'étude

5.2.1. Points forts de l'étude

L'un des points forts de cette étude était le fait d'avoir pris en compte les trois principaux éléments du sol : carbone, azote et phosphore. En effet, ces éléments sont interdépendants puisque la dynamique de l'un est directement ou indirectement influencée par l'autre même si les corrélations sont le plus souvent non significatives. D'autre part, la méthodologie adoptée dans cette étude a pris la peine de comparer deux modes de gestion du sol et différentes formes d'apport de phosphore afin d'en tirer des conclusions sur leur efficacité.

Par ailleurs, les traitements testés au niveau du dispositif expérimental représentent un large choix de type de fertilisation au niveau agronomique et ces traitements étaient conçus de manière à ce que l'on obtienne un large panel de type de fertilisant, de forme d'apport, de dose d'apport et de mode de gestion du sol que l'on pourrait rencontrer dans les systèmes de culture au niveau des exploitations agricoles. Ainsi, le fait de tester ces traitements et d'en trouver à la fois le plus efficace et le plus rentable constituerait une voie de plus pour résoudre les problèmes liés à la productivité des parcelles paysannes et à l'insécurité alimentaire.

5.2.2. Limites de l'étude

Cette étude est loin d'être parfaite. L'un des défauts de la méthodologie adoptée était le fait que les trois facteurs étudiés (c'est-à-dire mode de gestion du sol, doses d'apport de phosphore, apport de phosphore sous forme minérale ou organo-minérale avec fumier ou résidus de stylosanthès) n'étaient pas tous combinés puisque seuls 14 traitements, qui ne combinent qu'un certain nombre de modalités, ont été retenus. Ainsi, la non combinaison totale des trois facteurs ne permettait pas de faire ressortir les effets du mode de gestion du sol et du type d'apport organique (fumier ou résidus de stylosanthès) sur l'ensemble des traitements.

D'autre part, la méthodologie adoptée ne permettait pas de quantifier l'azote effectivement apporté par la fixation symbiotique de l'azote (FSN) ainsi que les effets des apports phosphatés sur cette FSN et la disponibilité de l'azote. Les effets de la disponibilité du phosphore sur la FSN n'ont pas pu aussi être évalués. En effet, de telles investigations nécessitent l'usage de traceurs isotopiques (^{15}N) pour pouvoir estimer et suivre le devenir de l'élément azote dans le sol en évaluant la proportion de l'azote provenant des fertilisants (N_{dff}) et celle provenant du sol (N_{dfs}) afin d'en déduire l'azote réellement

obtenu par la FSN (Ndfa) (Danso et Eskew, 1984). Ces méthodes coûtent chers et demandent des formations spécifiques pour pouvoir maîtriser les techniques isotopiques qui y correspondent.

Enfin, l'une des lacunes de la présente étude était que les résultats de certaines analyses étaient inutilisables (azote microbien) en raison de problèmes survenus lors des extractions au laboratoire. Ceci a eu des conséquences majeures puisque ces données étaient importantes pour pouvoir expliquer la dynamique de certains éléments.

6. Conclusion et perspectives

Cette étude a été menée dans un but principal d'améliorer la disponibilité du phosphore et de l'azote qui conduira certainement à l'amélioration de la productivité agricole. Plus précisément, ce travail visait à (i) identifier les éventuels effets des apports de P sur la disponibilité du P, (ii) évaluer les effets de ces apports de P sur le rendement des deux cultures associées, (iii) identifier le traitement qui permettrait d'améliorer la disponibilité du N et P ainsi que le meilleur rendement, (iv) évaluer les effets de l'apport de matière organique sur l'activité biologique du sol et (v) évaluer les effets du mode de gestion du sol sur le rendement des cultures entreprises et les caractéristiques physico-chimiques et biologiques du sol.

Les résultats de ce travail ont montré que la disponibilité du phosphore des sols rhizosphériques de riz et de haricot prélevés au stade floraison du haricot a augmenté avec la dose d'apport de P aussi bien en termes de P total apporté que de P minéral. Cette disponibilité du P répond mieux à l'apport exclusivement minéral qu'à un apport organo-minéral. Ainsi, les apports minéraux tiennent une importance particulière quant à la disponibilité du P dans le sol. D'autre part, ce travail a aussi permis de déduire que la méthode d'extraction à la résine échangeuse d'anions traduit bien la disponibilité du phosphore. Par ailleurs, en considérant indépendamment les 3 formes d'apport de P, le traitement exclusivement minéral a été le plus efficace chez le haricot. Chez le riz, le même traitement (TSP seul) a été le plus efficace pour un apport inférieur à 50 kg P ha⁻¹ mais pour un apport supérieur à cette dose, le traitement TSP+fumier devient intéressant.

D'autre part, ce travail a aussi permis de mettre en évidence que les doses d'apports de P n'ont pas eu d'effets significatifs sur le rendement du haricot et du riz ce qui laisse suggérer que le phosphore n'était pas le seul élément limitant dans le sol ferrallitique de « tanety » et que le P disponible évalué au stade floraison du haricot n'était pas un bon indicateur du rendement des deux cultures.

Par ailleurs, le traitement TSP+fumier a permis d'obtenir des rendements significativement plus élevés aussi bien pour le haricot que pour le riz. Pour ce traitement, les teneurs en nitrates ont été significativement plus élevées pour les deux plantes alors que les teneurs en ammonium ont été faibles. La principale raison est l'ajout de matière organique qui induit une diminution de l'acidité du sol qui, par conséquent, favorise la nitrification. Par contre, le traitement TSP+fumier n'a pas permis d'améliorer le P disponible au stade floraison du haricot puisque aucune différence significative n'a été décelée entre le P disponible des traitements TSP+fumier, TSP+résidus de stylosanthès et TSP seul.

Ce travail a aussi permis de mettre en évidence que l'ajout de matière organique en complément du TSP apporté n'a pas eu d'effets significatifs sur l'activité biologique du sol aussi bien chez le haricot que chez le riz pour cette première année d'expérimentation.

Enfin, ce travail a permis de montrer qu'aucun effet du mode de gestion du sol n'a été observé chez le haricot. Cependant, des effets significatifs du mode de gestion du sol ont été observés sur la disponibilité du P et le pHKCl chez le riz.

Ainsi, seule la première hypothèse a été validée. La deuxième et la quatrième hypothèse n'ont pas été validées alors que la troisième et la cinquième hypothèse n'ont été que partiellement validées.

Pour ce travail, nombreuses sont les perspectives qui pourront être avancées. L'une d'elles, et la plus importante, consistera à continuer l'expérimentation au-delà de la première année et voir le comportement des paramètres étudiés au cours du temps. La deuxième perspective qui pourrait être avancée est la mise en place d'un autre essai utilisant le même substrat que le présent dispositif et y appliquer un certain nombre de traitements qui, cette fois, incluraient des apports d'azote en plus des apports de P. Ceci permettrait, en effet, d'estimer les effets des apports de N et de P sur la dynamique de ces deux principaux nutriments toujours dans le cadre d'un système de culture associant céréale et légumineuse. Une des perspectives qui pourrait aussi être avancée est l'utilisation de fumier ou d'autres résidus de plante légumineuse à une dose plus élevée (exemple : 50 kg P ha⁻¹) pour voir les effets d'une telle dose d'apport de matière organique sur les paramètres étudiés. Enfin, une autre perspective est la mise en place d'un essai qui pourrait éclaircir la dynamique de la fixation symbiotique de l'azote dans le cas où les cultures entreprises font appel à différents types de fertilisant minéral et/ou organique. De cette manière, l'outil isotopique utilisé renseignera sur les quantités d'azote réellement fixées par la légumineuse.

Références bibliographiques

Abuzinadah R.A., Read D.J., 1986. The role of proteins in the nitrogen nutrition of ectomycorrhizal plants. Utilisation of peptides and proteins by ectomycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 103: 481-493.

Anderson T.M., Domsch K.H., 1993. The metabolic quotient for CO₂ (q CO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH on microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 25 : 393-395.

Andriamananjara A., 2011. Système de culture à rotation voandzou–riz pluvial sur les Hautes Terres de Madagascar. Rôle du voandzou (*Vigna subterranea*) sur la biodisponibilité du phosphore dans les ferralsols. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques. École Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo. 185 p.

Andrianarisoa K.S., 2009. Minéralisation de l'azote et nitrification dans les écosystèmes forestiers : effet du type de sol et de l'essence forestière. Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré Nancy I. Spécialité : Géosciences. 253 p.

Angers D.A., Bissonnette N., Légère A., Samson N., 1993. Microbial and biochemical changes induced by rotation and tillage in a soil under barley production. *Canadian Journal Soil Science*, 73 : 39-50.

Anon., 2005. Principaux éléments fertilisants. UNIFA Edition 2005. 6 p.

Aubert G., 1965. Classification des sols. Tableaux des classes, sous-classes, groupes et sous-groupes utilisés par la section de pédologie de l'ORSTOM - Cahier ORSTOM. *Série Pédologique*, 3 : 269-288.

Aulakh M.S., Adhya T.K., 2005. Impact of agricultural activities on emission of greenhouse gases – Indian perspective. In 'International Conference on Soil, Water and Environmental Quality – Issues and Strategies. pp. 319-335 (Indian Society of Soil Science: New Delhi).

Aulakh M.S., Khurana M.P.S., Singh D., 2009. Water pollution related to agricultural, industrial and urban activities, and its effects on food chain: Case studies from Punjab. *Journal of New Seeds*, 10: 112-137.

Baize D., 2000. Guide des analyses en pédologie. 2^{ème} Edition revue et augmentée. Institut National de Recherches Agronomiques. 257 p.

Balemi T., 2009. Effect of phosphorus nutrition on growth of potato genotypes with contrasting phosphorus efficiency. African Crop Science Society. *African Crop Science Journal*, 17(4): 199-212.

Balesdent J., 1996. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols de France. *Etude et Gestion des sols*, 3(4) : 245-260.

Bessho T., Bell L.C., 1992. Soil solid and solution phase changes and mungbean response during amelioration of aluminium toxicity with organic matter. *Plant and Soil*, 140: 183-196.

- Bonde T.A., Lindberg T., 1988. Nitrogen mineralization kinetics in soil during long-term aerobic laboratory incubations. A case study. *Journal of Environmental Quality*, 17 : 414 - 417.
- Boudot J.P., Becquer T., Merlet D., Pouiller J., 1994. Aluminium toxicity in declining forests: a general overview with a seasonal assessment in a silver fir forest in the Vosges mountains (France). *Annales des Sciences Forestières*, 51 : 27-51.
- Bourgeat F., 1970. Contribution à l'étude des sols sur socle ancien de Madagascar. Types de différenciation et interprétation chronologique au cours du quaternaire - Thèse Strasbourg, 17 Mars 1970, ORSTOM, 310 p.
- Bourgeat F., Aubert G., 1971. Les sols ferrallitiques à Madagascar. Science de la Terre. ORSTOM, Centre de Tananarive. 31 p.
- Boyer J., 1982. Les sols ferrallitiques. Facteurs de fertilité et utilisation des sols. Tome X. Paris, ORSTOM, N° 52. 384 p.
- Bünemann E.K., Bossio D.A., Smithson P.C., Frossard E., Oberson A., 2004. Microbial community composition and substrate use in a highly weathered soil as affected by crop rotation and P fertilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 36: 889–901.
- Buol S.W., Eswaran H., 2002. Oxisols. *Advances in Agronomy*, 68 : 152-195.
- Cambardella C., 1998. Experimental verification of simulated soil organic matter pools. *Soil processes and the carbon cycle*: 519-526
- Campbell C.A., 1978. Soil organic carbon, nitrogen and fertility. Dans: Schnitzer M., Khan S.U. (eds.) *Soil organic matter*: 173 - 271.
- Chantigny M.H., Rochette P., Angers D.A., Masse D., Cote D., 2004. Ammonia volatilization and selected soil characteristics following application of anaerobically digested Pig Slurry. *Journal of Soil Science*, 63 : 306 - 312.
- Chaussod R., 1996. La qualité biologique des sols : évaluation et implications. Forum « Le sol, un patrimoine menacé ? » In : *Etude et gestion des sols*, 3(4) : 261-278.
- Chaussod R., Houot S., 1993. La Biomasse Microbienne des sols : perspectives d'utilisation de cette mesure pour l'estimation de la fourniture d'azote par les sols. In : *Matières organiques et agricultures* ; Decroux J. et Ignazi J.C., Eds. pp.17-26.
- Chaussod R., Zuvia M., Breuil M-C., Hetier J-M., 1992. Biomasse microbienne et statut organique des sols tropicaux : exemple d'un sol vénézuélien des Llanos sous différents systèmes de culture. Cahier ORSTOM, *Série Pédologie*, 27(1) : 59-67.
- CheaiB A., 2006. Effets de la limitation croisée en phosphore et en lumière sur la croissance et la morphogénèse aérienne et racinaire de jeunes plants de pin maritime. Thèse de Doctorat. Spécialité : Biogéochimie de l'Environnement. Université Bordeaux 1. 177 p + Annexes.

- Clement C.R., Habte M., 1994. Effect of soil solution phosphorous on seedling growth of the pejibaye palm in an oxisol. Hawaii Institute of Tropical Agriculture and Human Resources Journal. Series 3878. In: *Journal of Plant Nutrition*, 17(4): 639-655.
- Dambrine E., Le Goaster S., Ranger J., 1991. Croissance et nutrition minérale d'un peuplement d'épicéa sur sol pauvre. II Prélèvement racinaire et translocation d'éléments minéraux au cours de la croissance. *Acta Oecologia*, 112: 791-808.
- Danso S.K.A., Eskew D.L., 1984. Comment renforcer la fixation biologique de l'azote. *Bulletin AIEA*, 26(2) : 29-33.
- De Brouwere K., Thijs A., Hens M., Merckx R., 2003. Forms and availability of soil phosphorus in temperate forests in Southern Chile and Flanders. *Gayana Botánica*, 60 (1): 17-23.
- Delenne M.F., Pelletier F., 1981. Carte du potentiel des unités Physiques, au 1:1 000 000. ORSTOM. Bondy, France.
- Doran J.W., 1980. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil science society of America Journal*, 44: 765-771.
- Dubus I., 1997. La rétention du phosphore dans les sols : principe d'étude, modélisation, mécanismes et compartiments du sol impliqués. ORSTOM, Centre Nouméa, Documents Scientifiques et Techniques, III3, 76 p.
- Dzido J-L., 2001. Fiche variétale CIRAD 394/FOFIFA 154.
- Eghball B., Power J.F., Gilley J.E., Doran J.W., 1997. Nutrient, carbon, and mass loss of beef cattle feedlot manure during composting. *Journal of Environmental Quality*, 26 : 189 -193.
- Espinosa L., Norman R., Slaton N., Daniels M., 2005. The nitrogen and phosphorus cycles in soils. University of Arkansas. Division of Agriculture. Cooperative Extension Service. 4 p.
- FAO, 2002. La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres. Rapport sur les ressources en sols du monde. 59 p.
- Feller C., 1979. Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols : application aux sols tropicaux à texture grossière, très pauvres en humus. Cahiers ORSTOM, *Série Pédologie*, 17: 339-346.
- Fuentes B., Bolan N., Naidu R., Mora M., 2006. Phosphorus in organic waste-soil systems. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 6(2): 64-83.
- Gagnon J., 2009. Impact des différentes formes d'azote (Urée, NH_4^+ , NO_3^-) sur la croissance des plants et sur le lessivage des engrais, Session de formation sur la nutrition minérale des plants forestiers, Ministère des Forêts, Direction de la recherche. Rapport interne N° 349. 20 p.
- Germon J.C., Couton Y., 1999. La dénitrification dans les sols : régulation de son fonctionnement et applications à la dépollution. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 38 : 67-74.

Germon J.C, Hénault C., Garrido F., Reau R., 1999. Mécanismes de production, régulation et possibilités de limitation des émissions de N₂O à l'échelle agronomique. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 85 (6) : 148-162.

Giasson P., Jaouich A., 2008. Les Propriétés Chimiques du Sol. 46 p

Godbold D.L., 1991. Aluminium decreases root growth and calcium and magnesium uptake in *Picea abies* seedlings. In: Wright, e.a. (Ed.), Plant soil interactions at low pH. Kluwer Acad Publ, pp. 747-753.

Gregorich E.G., Drury C.F., Ellert B.H., Liang B.C., 1996. Fertilization effects on physically protected light fraction organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 60: 472-476.

Grundmann G.L., Rolston D.E., 1987. A water function approximation to degree of anaerobiosis associated with denitrification. *Soil Science*, 144 : 437-441.

Hammond J.P., White P.J., 2008. Diagnosing phosphorus deficiency in crop plants. In: The ecophysiology of plant-phosphorus interactions. *Plant Ecophysiology*, 7: 225-246.

Hargrove W. L., 1988. Evaluation of ammonia volatilization in the field. *Journal of Production Agriculture*. 1 : 104-111.

Haynes R.J., Mokolobate M.S., 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*, 59(1) : 47-63.

Henintsoa M., 2011. Disponibilité du phosphore et productivité agricole sous système de culture à rotation biennale voandzou–riz pluvial et système de culture pluviale continue de riz. Cas d'un sol ferrallitique de «tanety» sis à Laniera. Mémoire d'Ingénieur. Spécialisation Agriculture. École Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo. 73 p.

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.

Hubert P., 1978. Recueil de fiches techniques d'agriculture spéciale à l'usage des lycées agricoles à Madagascar. Antananarivo, BDPA, 1978.

INSTAT 2012. Disponible en ligne sur: http://www.instat.mg/index.php?option=com_content&view=article&id=33&Itemid=56 . Date de consultation: 11 Mars 2013

Jenkinson D.S., Ladd J.N., 1981. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. *Soil Biochemistry*, 5: 415-417.

Johnston A.E., Steén I., 2000. Understanding phosphorus and its use in Agriculture. European Fertilizer Manufacturers Association. 38 p.

Kouno K., Tuchita Y., Ando T., 1995. Measurement of soil microbial biomass phosphorus by an anion exchange member method. *Soil Biology and Biochemistry*, 27: 1353-1357.

- Lerot B., 2006. Les éléments minéraux. 34 p.
- Logah V., Safo E.Y., Quansah C., Danso I., 2010. Soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus dynamics under different amendements and cropping systems in the semi-deciduous forest zone of Ghana. *West African Journal of Applied Ecology*. 17:121-133.
- Machado C.T.T., Furlani A.M.C., 2004. Root phosphatase activity, plant growth and phosphorus accumulation of maize genotypes. *Scientia Agricola*, 61(2): 216-223.
- MAEP, GSDM, SDMad, 2007. Mise en place de collection généalogique et de collections testées. Rapport final, Catalogue des variétés. Projet d'appui à la diffusion des techniques agro-écologiques à Madagascar. 111 p.
- Marschner P., Crowley D., Rengel Z., 2010. Interactions between rhizosphere microorganisms and plants governing iron and phosphorus availability. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1-6 August 2010, Brisbane, Australia. pp 52-55.
- Moore J.M., Klose S., Tabatabai M.A., 2000. Soil microbial biomass carbon and nitrogen as affected by cropping systems. *Biology and Fertility of Soils*, 31 : 200-210.
- Morel C., 2002. Caractérisation de la phytodisponibilité du phosphore du sol par la modélisation du transfert des ions phosphates entre le sol et la solution. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches. Institut National Polytechnique de Lorraine. 91 p.
- Morot-Gaudry J-F., 1997. Assimilation de l'azote chez les plantes : aspects physiologiques, biochimiques et moléculaires. INRA-Paris. 421 p.
- Mousain D., Matumoto-Pintro P., Quiquampoix H., 1997. Le rôle des mycorhizes dans la nutrition phosphatée des arbres forestiers. *Revue Forestière Française* 49, N° Spécial: 67-81.
- Nannipieri P., Grego S., Ceccanti B., 1990. Ecological significance of biological activity in soil. *Soil Biochemistry*, 6 : 293-355.
- Noble A.D., Zenneck I., Randall P.J., 1996. Leaf litter ash alkalinity and neutralisation of soil acidity. *Plant and Soil*, 179: 293-302.
- Noble A.D., Randall P.J., 1999. Alkalinity effects of different tree litters incubated in an acid soil of N.S.W., Australia. *Agroforestry Systems*, 46: 147-160.
- Oberson A., Joner E.J., 2005. Microbial turnover of phosphorus in soil. In: Turner B.L., Frossard E., Baldwin D.S., (Eds) Organic phosphorus in the environment. CABI, Wallingford, pp 133-164.
- Oberson A., Bünemann E.K., Friesen D.K., Rao I.M., Smithson P.C., Turner B.L., Frossard E., 2006. Improving phosphorus fertility in tropical soils through biological interventions, p. 531-546, In N. Uphoff, et al., eds. Biological approaches to sustainable soil systems. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Olander L.P., Vitousek P.M., 2004. Biological and geochemical sinks for phosphorus in soil from a wet tropical forest. *Ecosystems*, 7: 404-419.

- Palma R.M., Saubidet M.I., Rimolo M., Utsumi J., 1998. Nitrogen losses by volatilization in a corn crop with two tillage systems. *Soil Science and Plant Analysis*, 29. 19 - 20 : 2865-2879.
- Pankhurst C.E., 1994. Biological indicators of soil health and sustainable productivity. In: Soil resilience and sustainable land use, D.J. Greenland et I. Szabolcs (Eds)., CAB International (UK). pp.331-351.
- Pavinato P.S., Dao T.H., Rosolem C.A., 2010. Tillage and phosphorus management effects on enzyme-labile bioactive phosphorus availability in Cerrado Oxisols. *Geoderma*, 156: 207-215.
- Pereda Campos M.V., 2008. Contribution à l'étude des transporteurs de phosphate de la famille PHT1 chez le Peuplier (*Populus trichocarpa* Torr. & Gray) et le champignon ectomycorhizien *Laccaria bicolor* (Maire) P. D. Orton. Thèse de Doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy I. Spécialité : Biologie Végétale et Forestière. 140 p.
- Perrot K.W., Sarathchandra S.U., Dow B.W., 1992. Seasonal and fertilizer effects on the organic cycle and microbial biomass in a hill country soil under pasture. *Australian Journal of Soil Research*, 30 : 383-394.
- Powlson D.S., 1994. The soil microbial biomass: before, beyond and back. In: Beyond the biomass. Compositional and functional analysis of soil microbial communities. K. Ritz, J. Dighton et K.E. Giller, Eds., John Wiley et Sons (UK). pp. 3-20.
- Powlson D.S., Brookes P.C., Christensen B.T., 1987. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry*, 19: 159-164.
- Rabeharisoa L., 2004. Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar. Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences Naturelles. Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Département de Biologie et Ecologie Végétales. 199 p.
- Rabeharisoa L., 2007. Libérons le phosphore. Communication à l'AcNALS, 18/10/2007. Madagascar.
- Radersma S., 1996. Influence des arbres agroforestiers sur le sol et la strate herbacée du Sud de Sahel. Mémoire de Maîtrise, Département d'Agronomie de l'Université Agronomique de Wageningen en collaboration avec l'Institut de la Biologie Agronomique et de la Fertilité du Sol, Pays-Bas.
- Randrianarisoa J-C., 2003. Utilisation et accessibilité des engrais chimiques. In : Agriculture, pauvreté rurale et politiques économiques à Madagascar. Editeurs : Minten B., Randrianarisoa J-C., Randrianarison L : 4-7.
- Rao I.M., Barrios E., Amézquita E., Friesen D.K., Thomas R., Oberson A., Singh B.R., 2004. Soil Phosphorus Dynamics, Acquisition and Cycling in Crop-Pasture-Fallow Systems in Low Fertility Tropical Soils: a Review from Latin America. ACIAR proceedings. N°114.
- Rasoamaharo L.A., 2008. Effet du guano et du triple superphosphate sur la culture de maïs. Cas d'un ferrallosol de Lazaina - Antananarivo. Mémoire d'Ingénieur. Spécialisation Agriculture. École Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo. 54 p.

- Razafimahatratra H.M., 2011. Sols malgaches et spectroscopie dans le moyen infrarouge : classification, caractérisation et sensibilité au climat. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, Spécialisation Agriculture. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques. 214 p.
- Razafimbelo T., 2005. Stockage et protection du carbone dans un sol ferrallitique sous système en semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres Malgaches. Thèse de Doctorat en science du sol. École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. 123 p+Références bibliographiques+Annexes.
- Rengel Z., 2008. Bioavailability of Phosphorus and Micronutrients in the Soil-Plant-Microbe Continuum. Keynote papers. Fifth International Symposium ISMOM 2008-November 24th - 28th, 2008, Pucón, Chile. 8 p.
- Richardson A.E., Hocking P.J., Simpson R.J., George T.S., 2009. Plant mechanisms to optimise access to soil phosphorus. CSIRO Publishing. *Crop and Pasture Science*, 60: 124-143.
- Robert M., 1996. Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Dunod/Masson, Paris. 240 p.
- Rochette P., 2008. Gestion des engrais minéraux et organiques : volatilisation de l'ammoniac. Colloque en Agroenvironnement. CRAAQ. 7 p.
- Rodriguez H., Fraga R., Gonzalez T., Bashan Y., 2006. Genetics of phosphate solubilization and its potential applications for improving plant growth-promoting bacteria. *Plant and Soil*, 287: 15-21.
- Saffigna P.G., Polwson D.S., Brookes P.C., Thomas G.A., 1989. Influence of sorghum residue and tillage on soil organic matter and soil microbial biomass in an australian Vertisol. *Soil Biology and Biochemistry*, 21: 759-765.
- Sánchez Chávez E., Muñoz E., Anchondo Á., Ruiz J.M., Romero L., 2009. Nitrogen impact on nutritional status of Phosphorus and its main bioindicator: response in the roots and leaves of green bean plants. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 15(2): 177-182.
- Sanchez P.A., Shepherd K.D., Soule M.J., Place F.M., Buresh R.J., Izac A.M.N., Mkwunye A.U., Kwesiga F.R., Ndiritu C.G., Woomer P.L., 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 Special Publication. pp.1-46.
- Schachtman D.P., Reid R.J., Ayling S.M., 1998. Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. *Plant Physiology*, 116 : 447-453.
- Scheiner J.D., 2005. Spéciation du Carbone, de l'Azote et du Phosphore de différentes boues de stations d'épuration au cours de leurs incubations contrôlées dans deux types de sol. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse. 218 p.
- Schwartz C., Muller J-C., Decroux J., 2005. Guide de la fertilisation raisonnée : grandes cultures et prairies. Editions France Agricole. 412 p.

- Segalen P., 1969. Contribution à la connaissance de la couleur des sols à hydroxydes de la zone intertropicale : sols jaunes et sols rouges - Cahier ORSTOM, *Série Pédologique*, 7(2) : 225-237.
- Siddique M.T., Robinson J.S., 2003. Phosphorus sorption and availability in soils amended with animal manures and sewage sludge. *Journal of Environmental Quality*, 32: 1114-1121.
- Skeffington R.A., Wilson E.J., 1988. Excess nitrogen deposition: Issues for consideration. *Environmental Pollution*, 54 : 159-184.
- Smith F.W., Mudge S.R., Rae A.L., Glassop D., 2003. Phosphate transport in plants. *Plant and Soil*, 248: 71-83.
- Smith J.L., 1993. Cycling of nitrogen through microbial activity. In: Soil biology: effect on soil quality, J.L. Hatfield et B.A. Stewart, Eds., *Advances in Soil Science*: 91-120.
- Söderlund R., Svensson B.H., 1976. The global nitrogen cycle. *Ecological Bulletins*, 22 : 23-73.
- Stroia C., 2007. Etude de fonctionnement de l'écosystème prairial en conditions de nutrition N et P sub limitantes. Application au diagnostic de nutrition. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse, Université de Sciences Agricoles et Médecine Vétérinaire de Banat Timișoara. Spécialité : Fonctionnement des Ecosystèmes et Agrosystèmes. 256 p.
- Temple S.J., Vance C.P., Gantt J.S., 1998. Glutamate synthase and nitrogen assimilation. *Trend in plant science*. Review 3(2): 51-56.
- Turner B.L., 2008. Resource partitioning for soil phosphorus: a hypothesis. *Journal of Ecology*, 96: 698-702.
- Valé M., 2006. Quantification et prédiction de la minéralisation nette de l'azote du sol *in situ*, sous divers pédoclimats et systèmes de culture français, Thèse de Doctorat N° 2367, INRA-France. 208 p.
- Vance E.D., Brookes P.C., Jenkinson D.S., 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19: 703-707.
- Vericel G., Minette S., 2010. Légumineuses : comment les utiliser comme cultures intermédiaires ? Mieux gérer l'interculture pour un bénéfice agronomique et environnemental. Dossier Technique Poitou-Charentes. Chambre d'Agriculture de Poitou-Charentes. 20 p.
- Walkley A., Black I.A., 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29-37.

Annexes

Annexe1. Quelques photos lors de la préparation des parcelles du dispositif expérimental de Lazaina.



Photo 1 : Transport des résidus de stylosanthès depuis le laboratoire jusqu'au dispositif



Photo 2 : Apport des résidus de stylosanthès sur une parcelle



Photo 3 : Epannage des résidus de stylosanthès sur la parcelle concernée



Photo 4 : Enfouissement des résidus de stylosanthès (cas d'un labour conventionnel)

Annexe 2. Quelques photos lors de la mise en place de l'essai



Photo 5 : Semis d'une parcelle sous couvert de résidus de stylosanthès (1)



Photo 6 : Semis d'une parcelle sous couvert de résidus de stylosanthès (2)



Photo 7 : Ouverture de trou pour le semis sous couvert de résidus de stylosanthès



Photo 8 : Semis d'une parcelle sous couvert de résidus de stylosanthès (3)

Annexe 3. Quelques photos des parcelles du dispositif un mois après le semis



Photo 9 : Riz et haricot un mois après le semis (1)



Photo 10 : Riz et haricot un mois après le semis (2)



Photo 11 : Riz et haricot un mois après le semis (3)



Photo 12 : Riz et haricot un mois après le semis (4)

Annexe 4. Quelques photos lors du prélèvement des sols rhizosphériques au stade floraison du haricot



Photo 13 : Préparation des étiquettes pour les échantillons de sols



Photo 14 : Racine de riz



Photo 15 : Récupération des sols rhizosphériques de riz (1)



Photo 16 : Récupération des sols rhizosphériques de riz (2)

Annexe 5. Quelques photos sur les analyses biologiques réalisées au laboratoire



Photo 17 : Dessiccateur contenant des échantillons de sol à fumer pour la détermination de la biomasse microbienne



Photo 18 : Avant filtration des mélanges sol-solution de K_2SO_4 pour la biomasse microbienne



Photo 19 : A droite, seringue stérilisée avec filtre millipore



Photo 20 : Filtration du mélange sol-solution K_2SO_4

