



**ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES**

**DEPARTEMENT: AGRICULTURE**

**Mémoire de fin d'études en vue d'obtenir le Diplôme d'Ingénieur Agronome**

**« DYNAMIQUE ET DISPONIBILITE DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE SOUS ASSOCIATION RIZ-HARICOT SOUMISE A DIFFERENTES DOSES CROISSANTES DE FERTILISATION MINERALE AZOTEE ET PHOSPHATEE ».**

**Essai en pot sous serre sur sol ferrallitique de tanety de Lazaina**

Par

**ANDRIANAMBININA Fano Vatosoa**

Promotion AMBIOKA : 2009-2013

Soutenu publiquement le 18 Décembre 2013 devant les membres du jury :

ANDRIAMANIRAKA J. Harilala  
Docteur en Sciences Agronomiques

Président

RAZAFIMAHATRATRA Hery Manantsoa  
Docteur en Sciences Agronomiques

Examineur

BECQUER Thierry  
Directeur de recherche IRD

Encadreur

RAMANANKAJA Landiarimisa  
Ph.D in Agricultural

Tuteur





**ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES**

**DEPARTEMENT: AGRICULTURE**

**Mémoire de fin d'études en vue d'obtenir le Diplôme d'Ingénieur Agronome**

**« DYNAMIQUE ET DISPONIBILITE DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE SOUS ASSOCIATION RIZ-HARICOT SOUMISE A DIFFERENTES DOSES CROISSANTES DE FERTILISATION MINERALE AZOTEE ET PHOSPHATEE ».**

**Essai en pot sous serre sur sol ferrallitique de tanety de Lazaina**

Par

**ANDRIANAMBININA Fano Vatosoa**

Promotion AMBIOKA : 2009-2013

Soutenu publiquement le 18 Décembre 2013 devant les membres du jury :

ANDRIAMANIRAKA J. Harilala  
Docteur en Sciences Agronomiques

Président

RAZAFIMAHATRATRA Hery Manantsoa  
Docteur en Sciences Agronomiques

Examineur

BECQUER Thierry  
Directeur de recherche IRD

Encadreur

RAMANANKAJA Landiarimisa  
Ph.D in Agricultural

Tuteur



Institut de recherche  
pour le développement



## REMERCIEMENTS

Il est primordial de souligner que les difficultés rencontrées lors de l'accomplissement de ce travail n'ont pu être surmontées que grâce à l'appui, le soutien et les conseils de nombreuses personnes que nous tenons à remercier.

Pour cela, nous rendons grâce au Seigneur Dieu pour nous avoir permis de mener à son terme ce travail.

Nous adressons aussi nos remerciements :

- ✓ Aux membres du Jury de ce mémoire :
  - Monsieur Harilala ANDRIAMANIRAKA, Docteur en Sciences Agronomiques, Enseignant-Chercheur à l'École Supérieure des Sciences Agronomiques et Chef du Département Agriculture, qui nous fait le grand honneur de présider le jury de ce mémoire. Veuillez trouver ici nos plus profonds respects.
  - Monsieur Hery RAZAFIMATRATRA, Docteur en Sciences Agronomiques, Enseignant-Chercheur à l'École Supérieure des Sciences Agronomiques qui a accepté d'examiner ce modeste mémoire. Veuillez retrouver ici nos profondes reconnaissances.
  - Monsieur Thierry BECQUER, Docteur HDR, Directeur de Recherche à l'UMR Eco&Sols de l'IRD, qui a dirigé ce mémoire. Un grand merci pour vos précieux conseils, directives et surtout pour les soutiens financiers tout au long du déroulement du stage jusqu'à la réalisation de ce mémoire.
  - Madame Landiarimisa RAMANANKAJA, Ph. D, Enseignant-Chercheur à l'École Supérieure des Sciences Agronomiques, qui malgré ses lourdes responsabilités et nombreuses occupations, a eu la patience de nous encadrer tout en nous prodiguant toujours de bons conseils pour notre travail. Veuillez retrouver ici le témoignage de notre profonde gratitude.
- ✓ A l'ESSA qui, par ses enseignants, nous a fourni la formation adéquate
- ✓ Au Laboratoire des Radioisotopes (LRI) qui, par son Directeur Madame Lilia RABEHARISOA, Professeur à l'ESSA, nous a accueillis durant le stage.
- ✓ A l'équipe du LRI sans qui ce travail n'aurait pas vu le jour. Je tiens spécialement à remercier :
  - Monsieur Manitranirina HENINTSOA et Madame Marie-Paule RAZAFIMANANTSOA qui nous ont aidés lors de la mise en place de l'expérimentation et lors des travaux de laboratoire.
  - Tous les Chercheurs du LRI et de l'UMR Eco&Sols de l'IRD
  - Tous les techniciens du LRI
  - Tous les thésards et stagiaires en DEA et en Ingénierat au LRI.
- ✓ Tous mes amis de la Promotion AMBIOKA
- ✓ Tous ceux qui me connaissent
- ✓ Et enfin, mes tendres pensées à ma femme Tahirinirina pour avoir été toujours là pour moi. Sans oublier mes parents et toute ma famille pour leurs encouragements tout au long de ce stage. Merci à vous tous.

## RÉSUMÉ

La saturation des bas-fonds et la croissance démographique ont conduit les agriculteurs à cultiver sur les « tanety ». Cependant, les sols ferrallitiques des tanety sont caractérisés par leur acidité et leur faible disponibilité en phosphore (P) qui vont certainement limiter la production agricole. Ainsi une expérimentation en serre a été menée dans le but de déterminer le système de culture intéressante d'une part et la dose des fertilisants azotés et phosphatés (N et P) efficace d'autre part pour obtenir le plus de biomasse mais et la meilleure disponibilité de N et P du sol. Du riz et du haricot ont été cultivés en association et en monoculture avec l'apport de N et de P dont les doses ont été de 0, 20 et 60 kg ha<sup>-1</sup>. Les résultats ont montré que chez le riz, l'association a diminué la biomasse, le N et P prélevés par la plante. Par contre chez le haricot, un effet positif sur la biomasse, le N et P prélevés par la plante ainsi que sur la teneur en nitrate et ammonium du sol ont été constatés. Ensuite, l'association a augmenté la teneur en P résine dans la rhizosphère des deux plantes. Enfin, la dose croissante de N a eu un effet d'augmentation du N prélevé par les plantes et la teneur en ammonium des sols rhizosphériques. La fertilisation azotée a induit aussi à une augmentation d'assimilation de P chez les plantes ainsi que l'augmentation du P résine de la rhizosphère du haricot. L'apport de P a favorisé l'augmentation du prélèvement de l'azote chez les deux plantes ainsi que la teneur en ammonium de la rhizosphère du haricot. Par ailleurs, le prélèvement en P par les plantes ainsi que le P résine dans les rhizosphères de deux plantes ont augmenté avec la dose croissante de P.

**Mots clés :** azote, phosphore, disponibilité, association de culture, ferrallitiques

## ABSTRACT

The saturation of the hollows and the demographic growth led the farmers to cultivate on the "tanety". However, ferrallitic soils of the tanety are characterized by their acidity and their low availability in phosphorus (P), which certainly will limit the agricultural production. Thus an experimentation in greenhouse was carried out with the aim of determining the interesting farming system on the one hand and the amount of fertilizers nitrogenized and phosphated (N and P) effective on the other hand to obtain the most biomass but also for the best availability of N and P of soil. Rice and common bean were cultivated in association and monoculture on the device with the contribution of N and P with the amounts of 0, 20 and 60 kg ha<sup>-1</sup>. The results showed that at rice, association decreased the biomass, the N and P taken by the plant. On the other hand at bean, a positive effect on the biomass, the N and P taken by the plant like on the content nitrate and ammonium of the ground were noted. Then, association increased the P resin content in the rhizospheric soil of the two plants. Lastly, the increasing amount of N had a significant effect on the N taken by the plants and on the content ammonium of the rhizospheric soil. The nitrogenized fertilization also induced with an increase in assimilation of P at the plants as well as the increase in the P resin of the rhizospheric of bean. The contribution of P supported the increase in the taking away of nitrogen at the two plants as well as the content ammonium of the rhizospheric of bean. In addition, the taking away in P by the plants as well as the P resin in the rhizospheric soil of two plants increased with the increasing amount of P.

**Key words:** nitrogenize, phosphorus, availability, association of culture, ferrallitic

# TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES .....	i
LISTE DES TABLEAUX .....	i
LISTE DES PHOTOS .....	i
LISTE DES ANNEXES .....	ii
LISTE DES ACRONYMES .....	iii
LISTE DES UNITÉS .....	iv
I- INTRODUCTION .....	1
I-1- Contexte général .....	1
I-2- Contexte de l'étude et problématique .....	1
I-3- Objectifs de l'étude et hypothèses .....	2
II- ETATS DES CONNAISSANCES .....	4
II-1- Etats des connaissances sur l'azote .....	4
II-1-1- Importance de l'azote pour la plante .....	4
II-1-2- Azote dans le sol .....	4
II-1-2-1- Formes d'azote dans le sol .....	4
II-1-2-2- Dynamique de l'azote .....	5
II-2- Etats des connaissances sur le phosphore .....	9
II-2-1- Importance du phosphore pour la plante .....	9
II-2-2- Phosphore dans le sol .....	9
II-2-3- Disponibilité du phosphore .....	10
II-2-4- Dynamique du phosphore .....	11
II-3- Statuts des sols ferrallitiques de tanety des Hautes Terres malgache .....	13
II-4- Rôles des légumineuses sur la disponibilité des éléments dans le sol .....	14
III- MATERIEL ET METHODES .....	15
III-1- Substrat utilisée .....	15
III-2- Matériels végétaux .....	15
III-3- Dispositif expérimental .....	16
III-4- Conduite de l'expérimentation .....	17
III-4-1- Préparation du substrat .....	17
III-4-2- Semis .....	17
III-4-3- Suivi après la mise en place .....	17
III-4-4- Prélèvement de sol rhizosphérique et de biomasse végétale .....	18
III-5- Méthodes analytiques .....	18

III-5-1- Analyses au laboratoire .....	18
III-5-2- Calcul de N et P prélevés par la plante .....	19
III-5-3- Analyses statistiques.....	19
IV-    RESULTATS .....	20
IV-1- Tableaux récapitulatif des moyennes et p-value des différents paramètres.....	20
IV-2- Biomasse totale sèche.....	23
IV-3- Azote prélevé par la plante .....	24
IV-4- P prélevé par la plante .....	25
IV-5- Disponibilité du phosphore (P résine) dans les sols rhizosphériques .....	26
IV-6- P microbien dans les sols rhizosphériques .....	27
IV-7- Disponibilité de l'azote dans les sols rhizosphériques .....	29
IV-7-1- Disponibilité en nitrate dans les sols rhizosphériques du riz et du haricot.....	29
IV-7-2- Disponibilité en ammonium dans les sols rhizosphériques du riz et du haricot .....	30
IV-8- $pH_{eau}$ des sols rhizosphériques.....	31
IV-9- $pH_{KCl}$ des sols rhizosphériques .....	31
IV-10- Etude des corrélations entre les apports de fertilisants (N et P) et les paramètres physico-chimiques étudiées. ....	32
V-    Discussion .....	33
V-1- Discussions et vérification des hypothèses .....	33
V-1- 1- Effet de l'association céréale-légumineuse sur la biomasse du riz et du haricot .....	33
V-1-2- Effet de l'association céréale-légumineuse sur la disponibilité de N et P.....	34
V-1-3- Effet de l'apport des fertilisants N et P sur la disponibilité de N et P dans les sols rhizosphériques du riz et du haricot.....	37
V-2- Points forts et limites de l'étude.....	39
V-2-1- Points forts de l'étude .....	39
V-2-1- Limites de l'étude .....	39
VI-    Conclusion et perspectives .....	41
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	43

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Cycle de l'azote adapté .....	8
<b>Figure 2</b> : Représentation schématique des trois formes importantes de P dans le sol et intervenant dans la nutrition des plante .....	10
<b>Figure 3</b> : Dynamique du phosphore dans le système sol-plante.. .....	13
<b>Figure 4</b> : Biomasse totale sèche par traitements et par systèmes .....	23
<b>Figure 5</b> : Azote prélevé par les plantes par traitements et par système.....	24
<b>Figure 6</b> : P prélevé par les plantes par traitement et par système .....	26
<b>Figure 7</b> : P résine dans les sols rhizosphériques par traitements et par système.....	27
<b>Figure 8</b> : P microbien des sols rhizosphériques par traitements et par systèmes .....	28
<b>Figure 9</b> : Teneur en nitrate des sols rhizosphériques par traitements et par système.....	29
<b>Figure 10</b> : Teneur en ammonium des sols rhizosphériques par traitement et par système ....	30
<b>Figure 11</b> : pH <sub>eau</sub> des sols rhizosphériques par traitement et par système .....	31

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1</b> : Caractéristiques physico-chimiques du sol prélevé à Lazaina .....	15
<b>Tableau 2</b> : Les doses d'apport de N et de P étudiées durant l'essai .....	16
<b>Tableau 3</b> : Biomasse du riz et résultats des analyses physico-chimiques des sols rhizosphériques du riz .....	21
<b>Tableau 4</b> : Biomasse du haricot et résultats des analyses physico-chimiques des sols rhizosphériques du haricot .....	22

## LISTE DES PHOTOS

<b>Photo 1</b> : Riz en monoculture .....	VIII
<b>Photo 2</b> : Arrosage des pots .....	VIII
<b>Photo 3</b> : Association riz-haricot .....	VIII
<b>Photo 4</b> : Haricot en monoculture .....	VIII

## LISTE DES ANNEXES

<b>Annexe 1</b> : Doses d'apport de N et P.....	I
<b>Annexe 2</b> : Doses d'apport des macronutriments .....	I
<b>Annexe 3</b> : Doses d'apport des micronutriments.....	I
<b>Annexe 4</b> : Méthode de calcul de la capacité au champ .....	II
<b>Annexe 5</b> : Mesure de la capacité au champ.....	II
<b>Annexe 6</b> : Biomasse du riz et résultats des analyses physico-chimiques des sols rhizosphériques du riz .....	III
<b>Annexe 7</b> : Biomasse du haricot et résultats des analyses physico-chimiques des sols rhizosphériques du haricot .....	IV
<b>Annexe 8</b> : p-value sur la corrélation entre les apports de P, N et les paramètres étudiés pour le riz.....	V
<b>Annexe 9</b> : p-value sur la corrélation entre les apports de P, N et les paramètres étudiés pour le haricot.....	V
<b>Annexe 10</b> : Matrice de corrélation de Pearson entre les apports de P, N et les paramètres étudiés pour le riz .....	VI
<b>Annexe 11</b> : Matrice de corrélation de Pearson entre les apports de P, N et les paramètres étudiés pour le haricot .....	VI
<b>Annexe 12</b> : Comparaison entre monoculture et l'association de culture. Cas du riz.....	VII
<b>Annexe 13</b> : Comparaison entre la monoculture et l'association de culture. Cas du haricot .	VII
<b>Annexe 14</b> : Photos prélevés lors de l'expérimentation .....	VIII
<b>Annexe 15</b> : Détermination de la teneur en azote minéral du sol .....	IX
<b>Annexe 16</b> : Détermination du phosphore microbien et du phosphore disponible du sol.....	IX
<b>Annexe 17</b> : Détermination du pH du sol .....	IX
<b>Annexe 18</b> : Détermination du C et N total du sol à l'état initial .....	X
<b>Annexe 19</b> : Détermination du P total du sol à l'état initial .....	X
<b>Annexe 20</b> : Détermination de la teneur en N et P total des biomasses végétales.....	X

## LISTE DES ACRONYMES

**ADN:** Acide Désoxyribonucléique

**Al:** Aluminum

**ARN:** Acide Ribonucléique

**ATP:** Adenosine Triphosphate

**ASSOC:** association de culture

**B:** Bore

**Ca:** Calcium

**Cb-Cb:** Common bean-Common bean

**CC:** Capacité au champ

**Cu:** Cuivre

**CUN:** Coefficient d'utilisation de l'azote apporté

**CUP:** Coefficient d'utilisation de phosphore apporté

**FAO:** Food and Agriculture Organization

**Fe:** Fer

**INRA:** Institut National de Recherche Agronomique

**IRD :** Institut de Recherche pour le Développement

**K:** Potassium

**KCl:** Chlorure de Potassium

**Mg:** Magnésium

**Mn:** Manganèse

**Mo:** Molybdène

**MONO:** monoculture

**p-value :** seuil de probabilité où l'on se trompe si on refuse une hypothèse nulle  $H_0$

**MONO R:** Expression pour indiquer la monoculture du riz

**R :** Coefficient de corrélation

**RCb :** Rice-Common bean

**RR :** Rice-Rice

**UMR :** Unité Mixte de Recherche

**XLSTAT :** Logiciel de statistique et d'analyse de données pour Microsoft Excel

## LISTE DES UNITÉS

**mg P kg-1:** milligramme de Phosphore par kilogramme de sol

**%:** pourcentage

**°C:** Degré Celsius

**cm:** centimètre

**g:** gramme

**kg ha-1:** kilogramme par hectare

**kg:** kilogramme

**km:** kilomètre

**l:** litre

**m:** mètre

**M:** molaire

**mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> kg-1:** milligramme de N dans NH<sub>4</sub><sup>+</sup> par kilogramme de sol

**mg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> kg-1 :** milligramme de N dans NO<sub>3</sub><sup>-</sup> par kilogramme de sol

**mg:** milligramme

**ml:** Millilitre

**mm:** Millimètre

**nm:** nanomètre

**ppm:** partie par million

## **I- INTRODUCTION**

### **I-1- Contexte général**

A Madagascar, le riz est l'aliment de base de la population (Barbosa Filho *et al.*, 2002 ; Rasoamampionona *et al.*, 2008) et la riziculture constitue incontestablement une activité dominante des cultures vivrières chez les paysans malgaches (MAEP, 2004). Cependant, la population malgache ne cesse d'augmenter car avec un taux de croissance démographique de 2,8 %, elle est estimée à 20,6 millions habitants en 2011 (INSTAT, 2012). Avec cette pression démographique, la production rizicole risque de ne pas satisfaire les demandes et les besoins de la population.

Sur les Hautes Terres malgaches, l'agriculture est basée principalement sur la riziculture irriguée dans des bas-fonds aménagés. Mais en raison de la saturation de ces bas-fonds, les collines ou « tanety » des Hautes Terres représentent actuellement les seuls terroirs potentiels pour augmenter la production agricole (Rabeharisoa, 2004) puisqu'ils constituent une ressource importante de terres à cultiver et à mettre en valeur dans la grande île.

Le sol des « tanety », majoritairement du type Ferralsol (Andriamananjara, 2011), dont la matrice argileuse est dominée par la kaolinite, présente des teneurs élevées en oxyhydroxydes de fer et d'aluminium (Segalen, 1995 ; Sanchez *et al.*, 1997). Ces types de sol sont caractérisés par une forte teneur en phosphore total (300 à 1200 mg P kg<sup>-1</sup>) dont la majorité est fortement fixée sur ces constituants (Rabeharisoa, 2004), limitant ainsi la disponibilité du phosphore (P) vis-à-vis des plantes. Cette déficience en P disponible pour les plantes est un facteur limitant de la production agricole surtout dans un système de culture à faible intrant. De même, en cas d'une forte utilisation d'intrant, ces propriétés chimiques du sol convertissent le phosphore des fertilisants en une forme moins disponible pour les plantes puisque le P sera adsorbé au niveau de ces constituants (Drevon *et al.*, 2008).

### **I-2- Contexte de l'étude et problématique**

La connaissance de la dynamique et de la disponibilité du phosphore dans le sol représente alors un grand intérêt agronomique dans un objectif d'amélioration de la production agricole (Andriamaniraka, 2009) et de meilleures valorisations des sols de « tanety ». Dans ce cadre,

une expérimentation agronomique a été installée à Lazaina et a pour but d'approfondir et d'évaluer la dynamique et la disponibilité du phosphore sur un sol ferrallitique des Hautes Terres malgaches. Le riz (*Oryza sativa*) et le haricot (*Phaseolus vulgaris*) y ont été cultivés en culture intercalaire (association). Les deux espèces ont été soumises à des apports annuel de phosphore minéral sous forme de triple superphosphate à différentes doses (0, 5, 20 et 50 kg de P ha<sup>-1</sup>) et de phosphore organique sous formes de fumier ou de résidus de stylosanthès équivalent à 20 kg P ha<sup>-1</sup>.

Les observations faites au cours de la première année de cette expérimentation ont permis de conclure que : (i) la réponse du riz à la fertilisation minérale phosphatée a été presque inexistante ; (ii) l'apport de fumier a induit une augmentation du rendement en riz ; (iii) l'apport de résidus de stylosanthès a induit une baisse de croissance inattendue du riz. Les hypothèses explicatives par rapport à ces observations sont que (i) l'apport unique de fertilisants phosphatés conduit très rapidement à des conditions limitant pour l'azote (N), bien que le P soit supposé ne plus être le facteur limitant, (ii) l'apport de fumier permet une fourniture de N et P plus importante à la plante avec une augmentation de croissance et (iii) la décomposition des résidus de stylosanthès, résidus végétaux apportés à la parcelle et non produits sur place, était probablement beaucoup plus lente (résidus assez ligneux), ce qui a induit une baisse de rendement. Ces observations nécessitent alors des tests supplémentaires en introduisant le paramètre azote (N), afin de pouvoir les interpréter correctement.

Une expérimentation en serre a été alors mise en place au sein du Laboratoire des Radioisotopes. L'expérimentation consistait à tester l'efficacité de la légumineuse (haricot) et d'une céréale (riz) en monoculture ou en association. La question principale à laquelle nous allons répondre est la suivante : **« L'association de culture d'une céréale avec une légumineuse soumises à différentes doses d'apport de N et P contribue-elle à l'amélioration de la biomasse et des propriétés physico-chimique des Ferralsols de Madagascar ? »**

### **I-3- Objectifs de l'étude et hypothèses**

L'objectif principal de cette étude est de tester les effets du système de culture et des apports de N et P sur la biomasse des deux plantes ainsi que la disponibilité des ressources trophiques N et P aussi bien sous monoculture de riz ou de haricot que sous association riz-haricot.

Les objectifs spécifiques seront de :

- ✓ Comparer la biomasse totale des plantes, la teneur en N et P de la plante, la disponibilité du N et du P dans les sols rhizosphériques dans ces diverses conditions.
- ✓ Identifier un rapport N : P permettant une biomasse élevée ainsi qu'une disponibilité accrue des nutriments.

Afin d'atteindre ces objectifs et de répondre à la problématique, trois hypothèses de travail seront proposées :

- ✓ **Hypothèse 1** : L'association de la céréale avec la légumineuse permet d'obtenir le plus de biomasse par rapport à la monoculture.
- ✓ **Hypothèse 2** : L'association de la céréale avec la légumineuse permettrait une meilleure disponibilité en azote et phosphore par rapport à la monoculture.
- ✓ **Hypothèse 3** : Les disponibilités des ressources trophiques (N et P) augmenteraient avec l'augmentation des doses d'apport de N et de P.

Ainsi, ce travail débutera par un état des connaissances sur l'azote et le phosphore dans le système sol-plante, sur les statuts des sols ferrallitiques et les rôles des légumineuses sur la disponibilité des éléments, suivi par la partie matériel et méthodes. 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.

## **II- ETATS DES CONNAISSANCES**

### **II-1- Etats des connaissances sur l'azote**

#### **II-1-1- Importance de l'azote pour la plante**

Etant un élément constitutif des protéines, des acides aminés, de la chlorophylle, des acides nucléiques et d'une large gamme d'autres composés, l'azote est l'un des éléments essentiels pour la croissance des plantes (Harper, 1994) et représente 3 à 4 % de leurs matières sèches (Merigout, 2006).

En quantité excédentaire, il limite l'absorption d'autres éléments comme le potassium et le magnésium (Le Gall, 2004) mais le manque d'azote, en entravant la synthèse des protéines, des enzymes nécessaires à la formation, à la croissance et au fonctionnement des cellules, va aboutir à une réduction de la croissance des plantes (Rogolini, 2006).

#### **II-1-2- Azote dans le sol**

##### **II-1-2-1- Formes d'azote dans le sol**

La matière organique constitue la principale réserve d'azote du sol (Scheiner, 2005). C'est un élément essentiel pour la croissance et le fonctionnement de tous les organismes dans le sol. Les sols contiennent cependant peu d'azote, en moyenne 0,1 à 0,6 % dans les 15 premiers cm. Dans le sol, on peut rencontrer l'azote sous deux formes :

- **l'azote minéral**, soluble, principalement sous forme nitrique ( $\text{NO}_3^-$ ) et éventuellement sous forme ammoniacale ( $\text{NH}_4^+$ ). Ces deux formes constituent l'essentiel de la fraction inorganique qui représente généralement moins de 5 % de l'azote du sol. La plupart des végétaux ne peuvent assimiler l'azote que sous forme soluble minérale (Scheiner, 2005).
- **l'azote organique**, constitué par les racines, la faune, la microflore bactérienne et fongique, la litière et les composés humiques, qui constituent souvent plus de 95 % de l'azote total du sol. Cette fraction n'est rendu disponible pour la plante que par la minéralisation liée à l'activité des microorganismes (Scheiner, 2005).

## II-1-2-2- Dynamique de l'azote

### a- Cycle globale de l'azote

Le cycle de l'azote intègre les diverses formes d'azote du sol et de l'atmosphère, et toutes les transformations entre ces différentes formes. Le passage du N<sub>2</sub> (gazeux) aux formes combinées se fait au moyen de la fixation biologique, et le passage des formes organiques à inorganiques se fait au travers de la minéralisation (Scheiner, 2005).

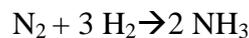
#### ❖ Processus de gain d'azote autre que la fertilisation

##### ▪ Fixation biologique de l'azote

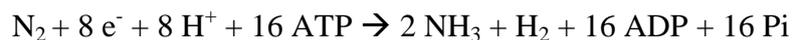
La fixation biologique de l'azote assure la transformation de l'azote gazeux atmosphérique en ammoniac. Seuls quelques microorganismes diazotrophes sont capables d'assurer ce processus, parmi lesquels on distingue :

- les bactéries libres vivant dans le sol (*Klebsiella* et *Azotobacter*), les Cyanobactéries ;
- les rhizobactéries, bactéries symbiotiques vivant en association avec les légumineuses dans des structures racinaires ou caulinaires organisées appelées nodosités.

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



La fixation biologique de l'azote est catalysée par un complexe enzymatique : la *Nitrogénase/Hydrogénase*. La réaction globale devient :



Dans le cas de la symbiose *Rhizobium*-légumineuse, l'activité symbiotique se met en place dans les nodosités, où sont hébergées les bactéries fixatrices. Dans les nodosités se forment une protéine spécifique appelée *leghémoglobine*. La fonction de la *leghémoglobine* est de maintenir la pression de l'oxygène à un niveau assez bas dans l'environnement de la nitrogénase. Le complexe enzymatique *Nitrogénase/Hydrogénase* est en effet très sensible à l'oxygène (Scheiner, 2005).

La fixation par les micro-organismes non symbiotiques, qui est le mécanisme essentiel d'enrichissement en azote dans la plupart des écosystèmes, est réduite : pour les sols des Etats-Unis, elle est de l'ordre de 7 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> (Stevenson, 1982). Dans des parcelles, agricoles où les légumineuses dominent, la fixation symbiotique peut être très importante et atteindre plusieurs centaines de kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>.

- *Apport d'azote inorganique atmosphérique*

L'azote atmosphérique peut également contenir certaines formes d'azote autres que du  $N_2$ . On trouve par exemple de l'oxyde d'azote (NO) et du dioxyde d'azote ( $NO_2$ ) issu de la combustion du pétrole, de la biomasse végétale ou des décharges électriques. On peut trouver également du nitrate ( $NO_3^-$ ) et de l'ammonium ( $NH_4^+$ ) dans les précipitations atmosphériques. Cet azote peut retourner au sol sous diverses formes. Dans certaines zones polluées (Europe, Etats-Unis), les apports par les précipitations peuvent être importants (Scheiner, 2005). Dans les régions tropicales peu polluées, ces apports sont très faibles.

- ❖ Processus de perte de l'azote

- *Dénitrification*

La dénitrification est un processus réductif résultant de l'action des bactéries anaérobies et se traduisant par la transformation des nitrates ( $NO_3^-$ ) en nitrites ( $NO_2^-$ ), puis en monoxyde d'azote (NO), après en oxyde nitreux ( $N_2O$ ) et finalement en azote gazeux ( $N_2$ ) perdus pour le sol. Les conditions qui favorisent la dénitrification sont le sol à un pH neutre à légèrement basique, une température autour de  $25^\circ C$ , des conditions anaérobies, la présence de substrats azotés et de substrats carbonés.

- *Volatilisation*

La volatilisation est la perte d'azote, à partir du sol ou d'une matière fertilisante, par dégagement direct dans l'atmosphère d'ammoniac ( $NH_3$ ). Cette voie de perte est favorisée dans les sols alcalins, les sols de faible capacité d'échange cationique ou les sols secs (Hargrove, 1988). Les pertes les plus importantes sont liées à l'application d'urée et de lisiers riches en  $NH_4^+$ . Dans un système de production, la sous-estimation des pertes par volatilisation a pour conséquence la sous-estimation de la fertilisation. D'autre part, la surestimation entraîne une sur-application et, par conséquent, le risque d'augmenter les pertes par lixiviation (Eghball *et al.*, 1997).

- *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  $NO_3^-$  est très vulnérable à la lixiviation (Schwartz *et al.*, 2005). En effet, les  $NO_3^-$ , issus de la minéralisation ou de la fertilisation, s'accumulent dans les horizons de surface, et peuvent être entraînés en profondeur. Dans les sols agricoles, ce risque de perte est dépendant

de la présence de nitrates dans le profil et d'un volume d'eau capable de le transporter (Rimski-Korsakov *et al.*, 2000). Le  $\text{NH}_4^+$  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 nutriments (Henintsoa, 2013).

### *b- Cycle interne de l'azote du sol*

Dans le cycle global de l'azote, on peut différencier une partie propre au sol. La caractéristique principale de ce cycle interne est qu'il peut se résumer en deux processus biologiques opposés : la minéralisation et l'immobilisation. La minéralisation comprend tous les processus au moyen desquels l'azote organique se transforme en azote minéral, comme résultat de l'activité de la microflore hétérotrophe du sol. En revanche, l'immobilisation est la conversion de l'azote inorganique en formes organiques constitutives des microorganismes (Scheiner, 2005).

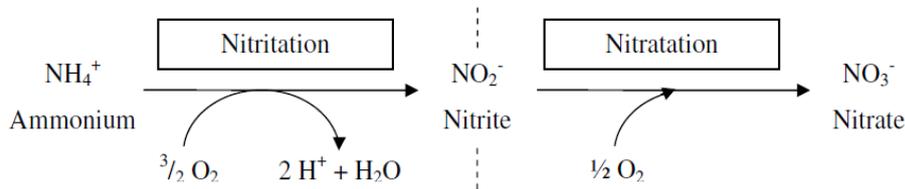
La minéralisation est un processus qui se déroule en deux étapes. Dans un premier temps, différents microorganismes hydrolysent les protéines et les acides aminés de la matière organique en produisant de l'ammonium : c'est l'ammonification. Cet ammonium est ensuite oxydé en nitrite et immédiatement en nitrate par des microorganismes spécifiques : c'est la nitrification (Scheiner, 2005).

#### ❖ Ammonification

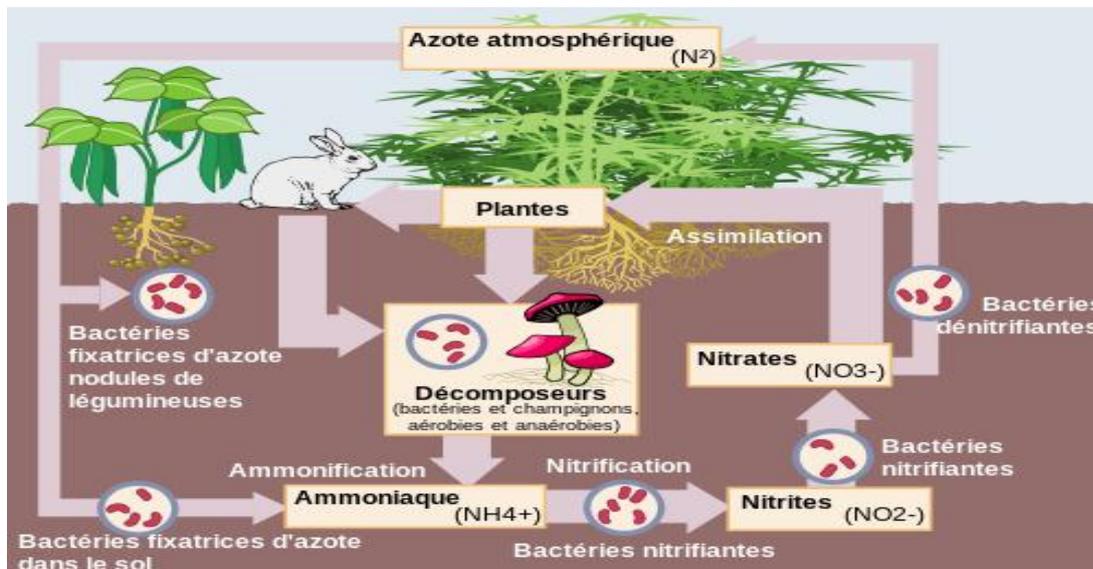
Comme évoqué précédemment, c'est le processus par lequel les bactéries, les champignons et les actinomycètes peuvent libérer l'azote de leurs composants azotés. Plus précisément, c'est le processus par lequel l'azote sous forme organique devient de l'azote ammoniacal ( $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ ). Par son manque de spécificité, ce processus peut avoir lieu dans une large gamme de température, d'humidité et de pH du sol (Henintsoa, 2013).

❖ *Nitrification*

La nitrification est le processus d'oxydation biologique de l'azote réalisé par des microorganismes 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.



La nitrification est produite par des microorganismes hétérotrophes ou autotrophes. Les conditions optimales pour la nitrification sont plus restrictives que pour l'ammonification. Les sols neutres ou légèrement basiques favorisent la nitrification. La teneur en oxygène affecte la nitrification car il s'agit d'un processus aérobie. L'humidité constitue un autre facteur déterminant, l'optimum se situant autour de 60 % de la capacité au champ.



**Figure 1** : Cycle de l'azote adapté selon Scheiner (2005)

## **II-2- Etats des connaissances sur le phosphore**

### **II-2-1- Importance du phosphore pour la plante**

Le phosphore (P) est présent chez tous les organismes vivants. Chez les végétaux, il constitue un composant majeur et un élément minéral essentiel. Il joue un rôle important dans le métabolisme énergétique, la synthèse et le métabolisme des glucides, participe à la composition du noyau cellulaire et se concentre dans les organes reproducteurs du végétal (Scheiner, 2005). Il entre dans la composition des acides nucléiques et dans la composition de l'ADN, ainsi que dans celle de l'ARN qui permet la transcription de l'information génétique en protéines. Il est impliqué dans les transferts d'énergie à l'intérieur des cellules par l'intermédiaire de molécules telles que l'ATP. Il entre dans la composition des phospholipides qui contrôlent la stabilité et les propriétés des membranes cellulaires (Marschner, 1995).

Il joue également un rôle primordial dans la nutrition des plantes. Une présence insuffisante de P dans le milieu où le végétal puise son alimentation minérale se traduit le plus souvent par des retards de croissance, un moindre développement, et bien sûr une faible production (Fardeau, 1992). D'après Frossard *et al.* (2004), le prélèvement de P est faible pendant les stades précoces de développement de la culture, la plante utilisant alors les réserves phosphatées présentes dans la graine sous forme de myo-inositolhexakisphosphate ou phytate. Par contre, le rythme de prélèvement journalier de P devient très élevé pendant la période de croissance rapide des cultures.

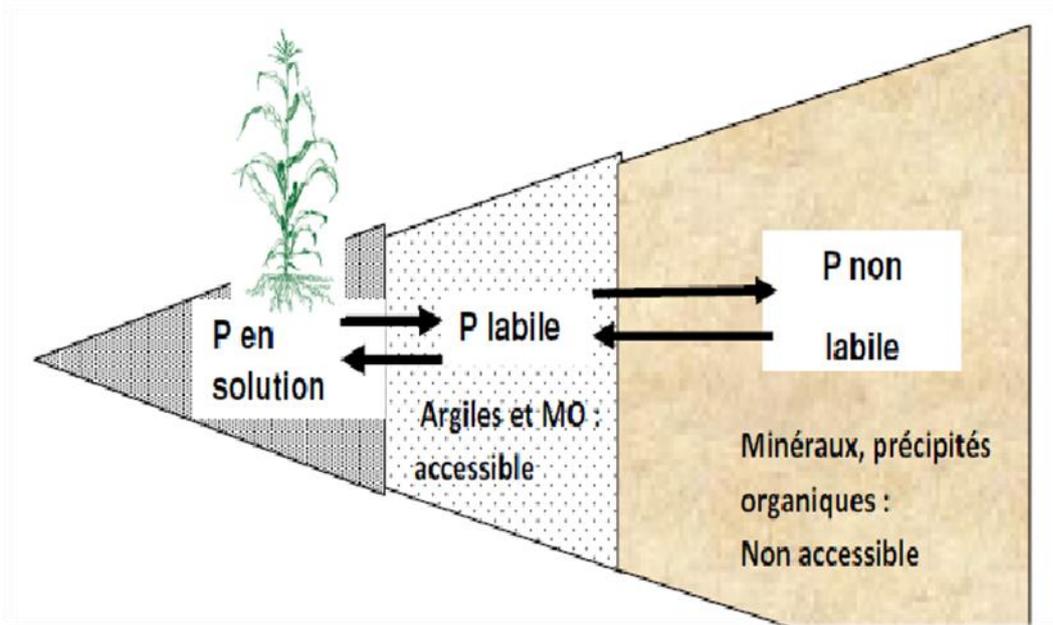
### **II-2-2- Phosphore dans le sol**

Dans le sol, le phosphore se présente sous les formes suivantes:

- Phosphate dissous dans la solution du sol sous forme d'anions orthophosphates primaires ou secondaires ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ). Ces formes sont étroitement liées au pH et peuvent être absorbées directement par les racines de la plante (Schachtman *et al.*, 1998 ; Hinsinger, 2001).
- Le P sous forme de "pool" labile dans la phase solide du sol: c'est le phosphore susceptible de passer en solution et d'être absorbé par les racines. Il correspond essentiellement aux phosphates adsorbés à la surface des argiles, des oxyhydroxydes de fer et d'aluminium. Cette fraction s'équilibre assez rapidement avec la solution du sol (Cheaïb, 2006, Henintsoa, 2011)

- Le P dans la fraction non-labile de la phase solide du sol : c'est le phosphore insoluble. Cette forme de P n'est disponible qu'après plusieurs années (Sanchez *et al.*, 1997 ; Cheaïb, 2006, Henintsoa, 2011).

Le maintien d'un niveau adéquat de phosphore dans la solution du sol dépend de la quantité de phosphore labile qui remplace le phosphore de la solution du sol prélevé par la plante (Fanjaniaina, 2009).



**Figure 2** : Représentation schématique des trois formes importantes de P dans le sol et intervenant dans la nutrition des plantes (adapté selon Mengel and Kirkby, 1987) cité par Fanjaniaina (2009)

### II-2-3- Disponibilité du phosphore

La disponibilité d'un élément minéral est déterminée par l'aptitude de l'organisme vivant considéré à absorber cet élément mais aussi par son aptitude à modifier sa mobilité physique et chimique (Andriamaniraka, 2009). Elle ne dépend pas seulement de leur concentration dans le sol mais aussi de leur accessibilité par les racines des cultures (Bertrand et Gigou, 2000). La plupart des sols, y compris les sols ferrallitiques, contiennent une quantité importante de P total (Rabeharisoa, 2004 ; Richardson *et al.*, 2009a) mais seule une partie du phosphore total du sol, dite « assimilable », peut être absorbée par les plantes (Joanne, 2008). Cette fraction du phosphore disponible est généralement inférieure à 1% (Richardson *et al.*, 2009a).

D'après Morel *et al.* (2006), la disponibilité du phosphore dépend potentiellement d'un grand nombre de réactions physico-chimiques et biologiques capables de libérer des ions phosphates dans la solution à partir des compartiments minéral, organique et microbien du sol. Cette disponibilité du phosphore est maximale dans l'intervalle de pH 5,5 à 7,5 ; elle est réduite en pH sous 5,5 en raison des fortes réactions des phosphates avec le fer et l'aluminium et au-dessus de pH 7.5 en raison de ses réactions avec le calcium (Anon, 2006).

Dans les sols, il faut en plus tenir compte de la matière organique (Boyer, 1982). Elle constitue une source importante de phosphore (P organique) et participe au stockage réversible des éléments nutritifs par minéralisation/immobilisation par les microorganismes (Bertrand et Gigou, 2000). De plus, certains acides organiques (acide oxalique, oxalo-acétique, malique, citrique ...) produits dans le sol par l'action des microorganismes, l'exsudation des plantes et la décomposition de la matière organique sont capables de dissoudre les complexes Fer-Phosphore ou Aluminium-Phosphore en formant à leur tour des complexes stables avec ces molécules, à la surface des particules de l'argile (Swenson *et al.*, 1949, cité par Rabetokotany, 2008).

#### **II-2-4- Dynamique du phosphore**

Seulement 5% du P transporté vers la racine est due au «mass flow»<sup>1</sup> et 2 % est directement intercepté par les racines. La plus grande partie (93 %) du P du sol est transportée par diffusion<sup>2</sup>; c'est ce mécanisme qui domine dans la disponibilité du P du sol. Ce processus est extrêmement lent et c'est pour cette raison que la quantité de P en solution est faible (Smith *et al.*, 2003).

La mise à disposition des ions phosphates aux plantes est régie par la désorption et la solubilisation de P inorganique ainsi que par la minéralisation du P organique (Richardson *et al.*, 2009). En effet, les principaux mécanismes influant la disponibilité du P, qui règnent dans les différents compartiments phosphatés du sol sont : (i) la dissolution et précipitation de P avec le carbonate de Ca (pH > 7,5) et les formes amorphes de Fe et d'Al (pH < 4,5); (ii) l'adsorption et désorption de P sur les surfaces des sols et des argiles (Rao *et al.*, 2004) ; (iii) la minéralisation et immobilisation du P organique par les microorganismes du sol, (iv) la

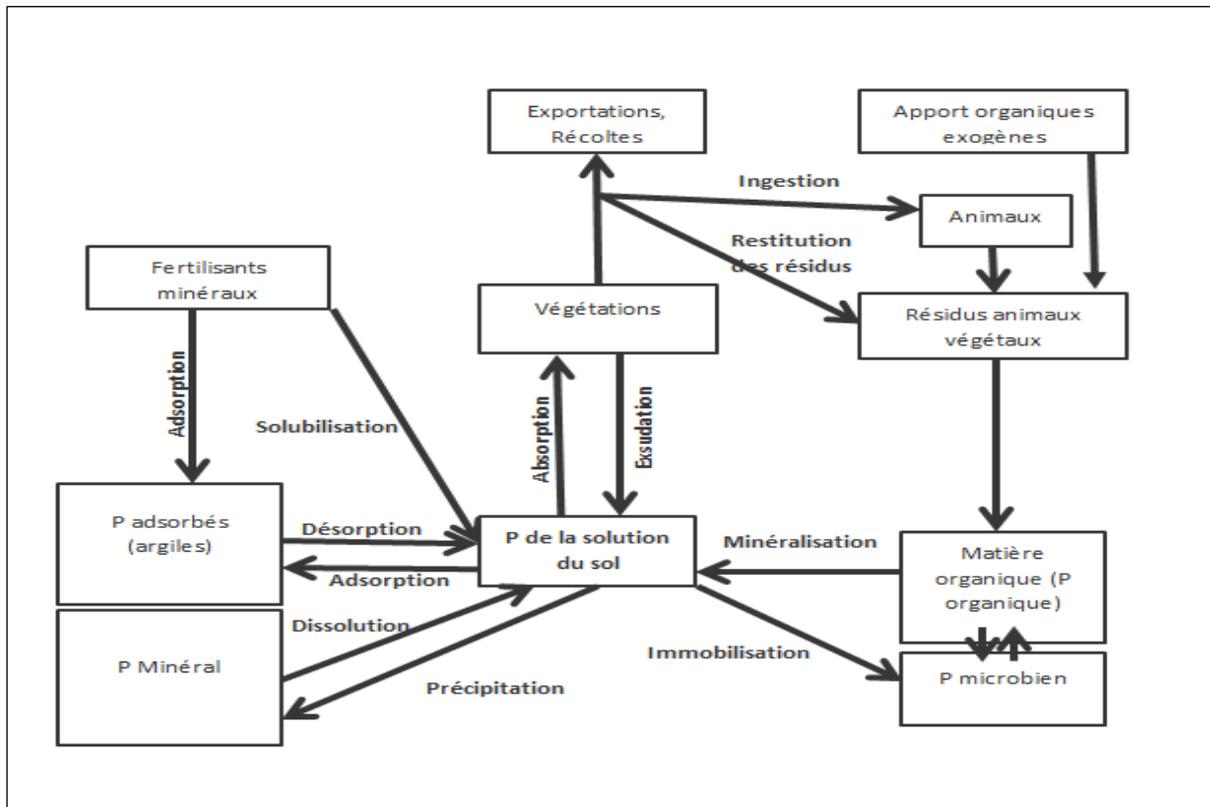
<sup>1</sup>**Mass flow** : Entraînement en masse par l'eau

<sup>2</sup>**Diffusion** : Mouvement d'un élément dans la solution du sol en présence de gradient de concentration (Morel, 2007).

complexation et chélation des constituants du sol (oxyhydroxydes de Al et Fe) par les exsudats racinaires.

Chez les plantes, le prélèvement racinaire de plus d'équivalent de cations que d'équivalent d'anions entraîne une excrétion de protons ( $H^+$ ) qui servira à maintenir l'équilibre de charge interne, ce qui aboutit à l'acidification de la rhizosphère (Rengel, 2008 ; Sánchez Chávez *et al.*, 2009). Cette acidification peut modifier la solubilité du P inorganique et/ou influencer la cinétique d'adsorption et de désorption du P et, par conséquent, agir sur la disponibilité en cet élément (Richardson *et al.*, 2009b). Un pH acide (inférieur à 5,5) occasionne une augmentation de la teneur en Al échangeable du sol limitant la disponibilité du P par la co-précipitation de ces deux éléments (Edou-Minko *et al.*, 2003). Par ailleurs, l'Al échangeable est susceptible de provoquer une toxicité aluminique pour la plante (Rabeharisoa, 2004).

Le P organique contenu dans la matière organique ne peut être disponible pour les plantes qu'après décomposition et minéralisation par les microorganismes (Smith *et al.*, 2003 ; Stroia, 2007). Ainsi, il faut que les résidus végétaux apportés aient un C : P inférieur à 200 (Mourreaux, 1973) et une teneur de 0,2 à 0,3 % en P pour la bonne décomposition (Haynes et Mokolobate, 2001). Comme le cas de l'azote, le taux de libération de P durant la minéralisation est conditionnée 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). En outre, plusieurs études ont montré une corrélation positive entre le taux de minéralisation du P organique et l'activité de la phosphatase. En effet, cette enzyme, qui se trouve dans les vacuoles et les plastes, est libérée par les racines *via* les exsudats racinaires, et participe à part entière dans la minéralisation du P de la matière organique (Machado et Furlani, 2004). L'hydrolyse du P organique par les phosphatases est donc potentiellement importante pour la libération des ions orthophosphates utilisables par les plantes (Richardson *et al.*, 2009b ; Marschner *et al.*, 2010). Le processus inverse, c'est-à-dire l'immobilisation, se réfère à la fixation plus ou moins énergique du P inorganique par les microbes qui en ont besoin pour leur propre développement. En effet, les microbes peuvent entrer en compétition avec les plantes surtout si la décomposition des matières organiques fournit beaucoup de carbone mais peu de phosphore et d'azote comme le cas de la paille de blé (Espinoza *et al.*, 2005). La minéralisation et l'immobilisation se produisent simultanément dans le sol. La minéralisation serait le processus dominant si la teneur en P de la matière organique est suffisamment élevée pour satisfaire les exigences de la population microbienne (Espinoza *et al.*, 2005).



**Figure 3** : Dynamique du phosphore dans le système sol-plante. (Schéma adapté d'après celui d'Espinoza et al. (2005) ; Stroia (2007) ; Richardson et al. (2009), cité par Henintsoa, 2011).

### II-3- Statuts des sols ferrallitiques de tanety des Hautes Terres malgache

Les sols de « tanety » sont des sols ferrallitiques (majoritairement classés comme des Oxisols dans la classification Américaine et des Ferralsols dans la classification FAO) qui se sont développés soit sur socle cristallin, soit sur substrats fluvio-lacustres, soit sur basalte (Rabeharisoa, 2004). Ces 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 Fe et d'Al (Rabeharisoa, 2004). En effet, ces constituants du sol ont la capacité de fixer les ions orthophosphates par adsorption voire par précipitation (Dabin, 1988 ; Reddy *et al.*, 1998 ; Schachtman *et al.*, 1998 ). Par conséquent, le P disponible se trouve en faible quantité, entre 0,005 et 0,05 mg P l<sup>-1</sup> (Rabeharisoa, 2007), alors que le P total varie de 20 à 3000 mg P kg<sup>-1</sup> (Rabeharisoa, 2004). D'autre part, ces sols sont caractérisés par une forte acidité avec des pH variant entre 4 et 5 ainsi qu'une teneur élevée en aluminium échangeable (0,7 à 1,2 cmol kg<sup>-1</sup>) ce qui réduit d'autant plus la disponibilité en 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 ; 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 pour conséquence une faible productivité des sols ferrallitiques (Rabeharisoa, 2007).

#### **II-4- Rôles des légumineuses sur la disponibilité des éléments dans le sol**

Après la photosynthèse, la fixation symbiotique est probablement le plus important processus biologique de dimension planétaire (Unkovich *et al.*, 2008). En effet, la culture des légumineuses permet de sauvegarder, voir améliorer le niveau d'azote des sols. La faible teneur en azote dans les sols pourrait être améliorée à moindre coût par l'exploitation de la capacité des légumineuses à fixer l'azote atmosphérique. Globalement, la fixation symbiotique entre les *Rhizobiaceae* et les légumineuses serait de l'ordre de 20 à 22 millions de tonnes d'azote par an (Herridge *et al.*, 2008). Les apports excédentaires d'azote minéral réduisent la fixation symbiotique (Zahran, 1999) et les nitrates ont un effet inhibiteur plus important sur la fixation symbiotique d'azote comparativement à l'ammonium (Cheema et Ahmad, 2000).

L'intégration des légumineuses, ayant une aptitude à fixer l'azote atmosphérique *via* la fixation symbiotique, ont présenté un intérêt particulier dans la recherche de système de culture durable pour les sols déficients en P selon Iyamuremye et Dick (1996) et Pypers *et al.* (2005). Les légumineuses sont connues pour leur aptitude à changer chimiquement l'état de la rhizosphère et à mobiliser l'ion phosphate de la fraction la plus labile du sol (Pypers *et al.*, 2005). L'exsudation des acides organiques (la citrate et la malate) par les racines des légumineuses permet d'augmenter la disponibilité du phosphore dans les sols (Roland *et al.*, 1997). En effet, la complexation des acides organiques (charge négative) avec l'hydroxyde ou l'oxyde de fer ou d'aluminium (charge positive) à la surface des particules d'argile réduit l'immobilisation du P de la solution du sol et permet en même temps de libérer le phosphate fixé sur ces sites (Sanchez *et al.*, 1997 ; Pypers *et al.*, 2005). Des essais d'amélioration des légumineuses, par des cultivars à forte efficacité d'utilisation du phosphore pour la fixation symbiotique de l'azote, réalisés dans quelques pays méditerranéens et tropicaux, ont montré une augmentation significative du phosphore assimilable du sol dans la rhizosphère (Li *et al.*, 2008). Peu d'études ont cependant concerné des sols tels que les Ferralsols présentant des teneurs en P total élevées et une acidité élevée.

### III- MATERIEL ET METHODES

Pour pouvoir vérifier les hypothèses émises et répondre à la problématique posée dans ce travail, une expérimentation a été mise en place sous serre, dans un environnement semi-contrôlé, au sein du Laboratoire des Radioisotopes durant huit (8) semaines. C'est un essai en pot utilisant le riz et le haricot, cultivés en association ou en monoculture, avec différentes doses d'apports de N et P. Cette expérimentation en serre faisait alors suite aux constats qui ont été faits sur l'essai au champ réalisé à Lazaina.

#### III-1- Substrat utilisée

Etant donné que cette expérimentation est dans le cadre de l'essai de Lazaina, le sol utilisé a été collecté sur les parcelles témoins du dispositif expérimental sur « tanety » de Lazaina sur une profondeur de 0-20 cm. Le sol étudié est du type ferrallitique selon la classification de la Commission de Pédologie et de la Cartographie des Sols (CPCS). Ces parcelles témoins ont été cultivées depuis l'année 2006 mais n'ont jamais reçu de fertilisation phosphatée. Les caractéristiques physico-chimiques du sol prélevé sur les parcelles témoin du dispositif de Lazaina et utilisé pour l'essai en serre sont données par le tableau ci-dessous.

**Tableau 1** : Caractéristiques physico-chimiques du sol prélevé à Lazaina

Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	C total (g kg <sup>-1</sup> )	N total (g kg <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N kg <sup>-1</sup> )	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N kg <sup>-1</sup> )	P total (mg P kg <sup>-1</sup> )	P résines (mg P kg <sup>-1</sup> )	pH eau	pH KCl
24	7	59	17,4	0,9	7,79	4,37	230	1,3	5,1	4,5

Lazaina est une zone périurbaine se trouvant à environ 12 km au Nord Est d'Antananarivo. Il se situe à une altitude de 1274 m et est soumis à un climat tropical d'altitude.

#### III-2- Matériels végétaux

La variété de riz utilisée durant l'essai était la variété FOFIFA 172. C'est une variété à cycle précoce de 150 jours (FOFIFA, 2006). Pour le haricot, la variété choisie était la variété Lingot blanc ou « Ranjonomby », qui a un cycle cultural de 78 jours (FOFIFA, 1993). La culture du haricot est l'une des principales cultures vivrières de l'île et se situe à la cinquième place en termes de quantité, après le riz, le manioc, la pomme de terre et le maïs (MAEP, 2004). La FOFIFA 172 et le Ranjonomby s'adaptent bien dans les régions de haute altitude de Madagascar (Rabenantoandro, 2009).

### III-3- Dispositif expérimental

Les facteurs étudiés dans cet essai sont le système de culture (association et monoculture) et les différentes doses d'apport de N et de P sur le riz pluvial et le haricot. En ce qui concerne les apports de N et P, différents doses ont été considérés. Ces doses sont résumées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 2** : Les doses d'apport de N et de P étudiées durant l'essai

Dénomination	Dose de N (Kg N ha <sup>-1</sup> )	Dose de P (Kg P ha <sup>-1</sup> )
T0	0	0
P20	0	20
N20	20	0
N20P20	20	20
N20P60	20	60
N60P20	60	20
N60P60	60	60

Ces différentes doses d'apport de N et de P ont été combinées aux systèmes de culture suivants :

- Monoculture de riz
- Monoculture de haricot
- Association Riz-haricot.

En combinant les deux paramètres, 21 traitements ont été ainsi étudiés. Chaque traitement était représenté par un pot plastique et a été répété 5 fois. Ce qui a fait un total de 105 pots pour tout l'essai. La distribution des pots a été totalement randomisée dans la serre.

Durant l'essai, le phosphore et l'azote ont été apportés sous forme de solutions nutritives. Le phosphore a été apporté sous forme de dihydrogénophosphate de potassium (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) et l'azote apporté sous forme de nitrate d'ammonium (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>).

Outre les apports cités ci-dessus, d'autres éléments ont été aussi apportés aux 105 pots toujours sous forme de solution nutritive. Ce sont les macronutriments (Mg, Ca et K) et micronutriments (B, Mn, Zn, Cu et Mo) utiles au développement des plantes. Quant au potassium, il a été apporté sous forme de sulfate de potassium (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

### **III-4- Conduite de l'expérimentation**

Diverses opérations ont été effectuées au cours de l'expérimentation. Ces tâches ont été divisées en quatre (4) étapes : la préparation du substrat, le semis, le suivi et le prélèvement.

#### **III-4-1- Préparation du substrat**

La première tâche à faire était de préparer le substrat. Le sol prélevé sur les parcelles témoin du dispositif expérimental de Lazaina a été tamisé à 4 mm avant d'être homogénéisé. Ce sol tamisé et homogénéisé a été mis dans des pots plastiques à raison de 2 kg par pot. Ensuite, des mesures ont été faites pour déterminer la capacité de rétention en eau et pour l'appréciation de l'humidité du sol. Puis, le sol mis en pot a été humecté à 70 % de sa capacité de rétention (521,5 ml d'eau distillée par pot) puis incubé pendant une semaine à une température moyenne de 28°C afin de stimuler l'activité microbiologique du sol. Enfin, après l'incubation, cinq pots ont été sélectionnés de manière aléatoire et ont fait l'objet de prélèvement afin de déterminer le phosphore microbien ainsi que la valeur de l'azote disponible à l'état initial.

#### **III-4-2- Semis**

Après l'humectation et l'incubation du sol en pot, le semis a été fait en poquet à raison de trois (3) grains de riz ou de haricot par pot pour les pots en monoculture et à raison de deux (2) grains de riz et deux (2) graines de haricot par pot pour l'association. Auparavant, les semences ont été traitées au fongicide systémique Ridomil (4% de Metalaxyl-M et 64% de Mancozèbe) à la dose de 1 g kg<sup>-1</sup> et à l'insecticide systémique Gaucho (principe active : imidaclopride) à la dose de 1 g kg<sup>-1</sup> pour éviter les éventuels attaques de maladie.

#### **III-4-3- Suivi après la mise en place**

Le démariage des plants a été effectué six (6) jours après le semis. Seuls deux (2) pieds par pot ont été gardés tout au long de l'expérimentation. Les pots ont été arrosés quotidiennement (chaque matin) pendant toute l'expérimentation en ramenant l'humidité de chaque pot à 70% de sa capacité de rétention par pesée. En même temps, le binage a été effectué quand le sol se tassait trop. La température été aussi enregistrée à la même heure. Les nutriments ont été fractionnés en quatre, apportés chaque semaine. Le premier apport a été fait une semaine après le semis. Au cours de l'expérimentation, des signes de maladie cryptogamique et des

attaques des insectes ont été constatés. Nous avons alors recouru à des pulvérisages de pesticides (fongicide Ridomil à raison de 2 g l<sup>-1</sup> et insecticide Gaucho à la dose de 0.1 g l<sup>-1</sup> sur les plantes).

#### **III-4-4- Prélèvement de sol rhizosphérique et de biomasse végétale**

Au stade floraison du haricot, dans notre cas 47 jours après le semis, les sols rhizosphériques de tous les pots ainsi que les biomasses végétales (parties aérienne et racinaire) ont été collectés pour diverses analyses des sols et des plantes. Une partie du sol collecté a été conservée au frais pour les analyses de P microbien et de N minéral tandis qu'une partie a été séchée à l'air libre puis tamisée à 2 mm et broyée à 0,2 mm pour les autres analyses. Les biomasses végétales ont été lavées puis étuvées à 60°C pendant 72 heures. Enfin les parties de la biomasse ont été pesées séparément et les biomasses aériennes ont été réservées pour les analyses. Les mesures de la biomasse de chaque espèce en monoculture sont divisées en deux pour avoir la moyenne par pot et pour être comparable à celui de l'association de culture.

### **III-5- Méthodes analytiques**

#### **III-5-1- Analyses au laboratoire**

Les analyses réalisées au laboratoire consistaient à déterminer:

- l'azote minéral des sols rhizosphériques prélevés par la méthode de la réaction de Berthelot modifiée mesurée à 660 nm avec la coloration à flux continu au Skalar ainsi que l'azote total du sol à l'état initial par chromatographie en phase gazeuse ;
- le phosphore de la biomasse microbienne et le phosphore disponible des sols rhizosphériques prélevés par la méthode de fumigation-extraction d'après Kouno *et al.* (1995) et McLaughlin *et al.* (1996) couplé avec la méthode d'extraction avec la résine échangeuse d'anion ainsi que le phosphore total du sol à l'état initial par attaque de l'acide perchlorique concentré (HClO<sub>4</sub>) suivi d'un dosage colorimétrique par la « méthode au bleu » ;
- la teneur en carbone total du sol à l'état initial par chromatographie en phase gazeuse ;
- le pH<sub>eau</sub> et le pH<sub>KCl</sub> des sols rhizosphériques ;
- la teneur en azote total de la biomasse aérienne sèche des plantes par minéralisation avec le mélange sulfo-salicylique concentré à chaud suivi de dosage colorimétrie automatique utilisant la réaction de Berthelot ;

- la teneur en phosphore total des biomasses aériennes du riz et du haricot récoltées par calcination et dosage colorimétrique en utilisant un mélange de molybdate et de métavanadate d'ammonium.

### **III-5-2- Calcul de N et P prélevés par la plante**

La quantité de N ou P prélevée par la plante (notons par  $Q_N$  ou  $Q_P$ ) est obtenue par la formule suivante :

- $Q_N = T_N \times BSA$
- $Q_P = T_P \times BSA$

$Q_N$  : Quantité de N prélevée par la plante dans un kilogramme de sol ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

$Q_P$  : Quantité de P prélevée par la plante dans un kilogramme de sol ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

$T_N$  : Teneur en N dans un kilogramme de la biomasse aérienne de plante ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

$T_P$  : Teneur en P dans un kilogramme de la biomasse aérienne de la plante ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

$BSA$  : Biomasse sèche aérienne de la plante obtenue dans un kilogramme de sol ( $\text{kg kg}^{-1} \text{ sol}$ )

### **III-5-3- Analyses statistiques**

Les résultats des analyses physico-chimiques 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 au seuil de probabilité de 0,05 à l'aide du logiciel XLSTAT 2008. Le test de Kruskal-Wallis permet de mettre en évidence si les facteurs expérimentaux ont eu des effets sur les paramètres étudiés 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. 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 paramètres et les quantités de P et N apportées

## **IV- RESULTATS**

### **IV-1- Tableaux récapitulatif des moyennes et p-value des différents paramètres**

Les tableaux ci-dessous (Tableau 3 et 4) synthétisent les résultats des analyses statistiques mesurant l'effet des trois facteurs de variation (système de culture ; niveau d'apport de P ; niveau d'apport de N) sur les différents paramètres étudiés. Ces paramètres étudiés sont : la biomasse totale, l'azote totale et phosphore totale prélevée par la plante, les valeurs des paramètres physico-chimiques des sols rhizosphériques tels que la teneur en P résine et P microbien, la teneur en nitrate, la teneur en ammonium et le pH<sub>eau</sub>.

Dans ces tableaux, les facteurs étudiés sont traités indépendamment, c'est-à-dire que les interactions ne sont pas considérées. Par ailleurs les résultats des moyennes et écartypes pour chacun des paramètres sur les 21 traitements sont présentés dans l'Annexe 3.

**Tableau 3** : Biomasse du riz et résultats des analyses physico-chimiques des sols rhizosphériques du riz

	<b>Biomasse sèche totale (g pot<sup>-1</sup>)</b>	<b>N prélevé (mg N kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P prélevé (mg P kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P Résine (mg P kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P Microbien (mg P kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg N kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg N kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>pH<sub>eau</sub></b>	<b>pH<sub>KCl</sub></b>
<i>MG</i>	0,52±0,23	3,70±2,64	0,56±0,27	2,25±0,93	2,11±0,54	3,11±2,62	4,01±1,00	5,04±0,10	4,59±0,05
<i>MONO</i>	0,68±0,19A	5,56±2,55A	0,69±0,23A	1,72±0,58 B	2,05±0,43A	3,02±2,04A	4,19±1,34A	5,04±0,08A	4,58±0,04A
<i>ASSOC</i>	0,36±0,16B	1,83±0,67B	0,42±0,24B	2,78±0,9 A	2,16±0,64A	3,20±3,12A	4,14±1,06A	5,05±0,11A	4,59±0,04A
<i>p value</i>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	0,388	0,742	0,060	0,869	0,579
<i>0P</i>	0,33±0,19c	2,08±2,16b	0,36±0,20c	1,77±0,54 b	1,88±0,60b	2,52±0,82a	4,05±0,25a	5,04±0,07a	4,58±0,04a
<i>20P</i>	0,52±0,19b	3,99±2,35a	0,51±0,22b	1,98±0,53 b	2,04±0,35b	3,01±2,07a	3,73±0,87a	5,07±0,12a	4,59±0,04a
<i>60P</i>	0,70±0,19a	4,87±2,79a	0,83±0,16a	3,14±1,09 a	2,43±0,59a	3,84±4,09a	4,38±1,47a	5,02±0,07a	4,59±0,05a
<i>p value</i>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0,006</b>	0,310	0,266	0,355	0,622
<i>0N</i>	0,34±0,17b'	1,85±1,65b'	0,35±0,14c'	1,85±0,46b'	1,79±0,43c'	2,54±0,86a'	3,38±0,71b'	5,04±0,11b'	4,58±0,04a'
<i>20N</i>	0,55±0,25a'	4,14±2,56a'	0,58±0,29b'	2,19±0,60a'b'	2,08±0,43b'	3,48±3,39a'	3,93±0,66b'	5,01±0,07b'	4,59±0,05a'
<i>60N</i>	0,65±0,15a'	4,87±2,67a'	0,73±0,21a'	2,74±1,39a'	2,48±2,48a'	3,13±2,46a'	4,76±1,22a'	5,09±0,10a'	4,59±0,05a
<i>p value</i>	<b>0,0002</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	0,074	<b>0,001</b>	0,516	<b>0,000</b>	<b>0,008</b>	0,499

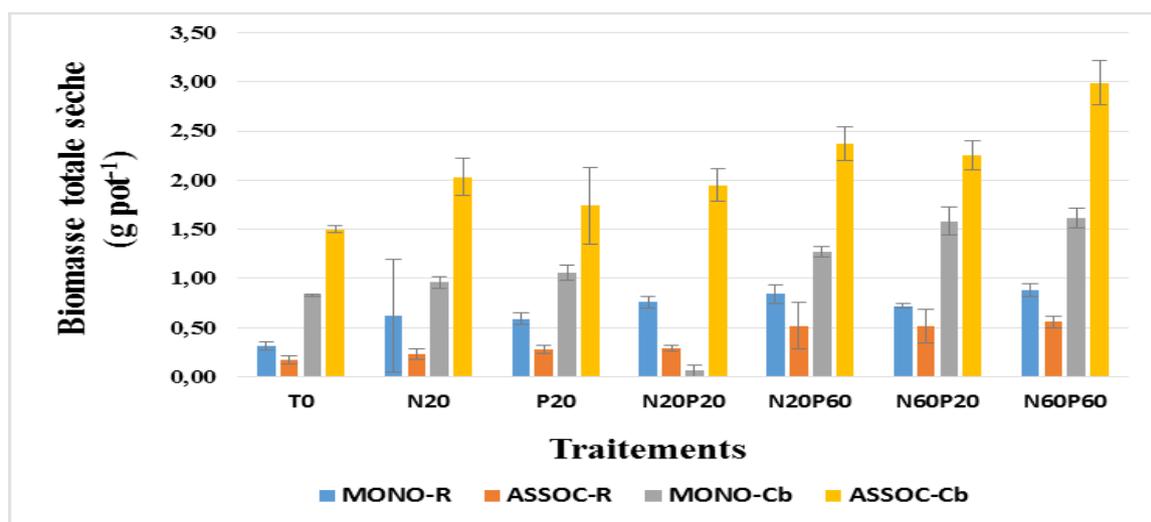
Les moyennes suivies par la même lettre à l'intérieur d'une même colonne ne sont pas significativement différentes d'après la méthode de comparaison multiple de Dunn couplée avec le test non paramétrique de Kruskal-Wallis à 5%. Les lettres en capitale comparent les moyennes des traitements en monoculture (MONO) à celle des traitements en association de culture (ASSOC) et les lettres minuscules comparent les moyennes des traitements 0N, 20N et 60N ou 0P, 20P et 60P entre elles avec les systèmes de culture confondus. MG représente la moyenne générale pour chaque paramètre étudié tous traitements confondus. *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. Les valeurs en gras sont les *p-values* inférieurs au seuil de signification 5 %.

**Tableau 4 :** Biomasse du haricot et résultats des analyses physico-chimiques des sols rhizosphériques du haricot

	<b>Biomasse totale sèche (g pot<sup>-1</sup>)</b>	<b>N prélevé (mg N kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P prélevé (mg P kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P Résine (mg P kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P Microbien (mg P kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg N kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg N kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>pH<sub>eau</sub></b>	<b>pH<sub>KCl</sub></b>
<i>MG</i>	1,66±0,62	12,69±5,09	2,13±1,00	2,45±0,83	1,93±0,53	2,42±2,34	3,62±1,06	5,04±0,09	4,58±0,05
<i>MONO</i>	1,19±0,29B	9,08±2,90B	1,41±0,46B	2,11±0,59B	1,89±0,38A	1,66±0,94B	3,09±0,76B	5,03±0,05A	4,57±0,05A
<i>ASSOC</i>	2,12±0,49A	16,29±4,18A	2,86±0,88A	2,78±0,91A	2,16±0,64A	3,20±3,12A	4,14±1,06A	5,05±0,11A	4,59±0,05A
<i>p value</i>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0,001</b>	0,810	<b>0,001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	0,624	0,247
<i>0P</i>	1,33±0,49b	10,13±4,51b'	1,58±0,63b	1,91±0,42b	1,65±0,34b	1,80±0,28a	3,36±0,67b	5,01±0,05a	4,57±0,04a
<i>20P</i>	1,60±0,48b	12,82±5,25a'b'	1,92±0,64b	2,17±0,38b	1,79±0,32b	1,83±0,37a	3,31±0,75b	5,06±0,11a	4,59±0,04a
<i>60P</i>	2,06±0,69a	15,05±4,35a'	3,00±1,21a	3,39±0,85a	2,42±0,60a	3,96±4,03a	4,34±1,41a	5,02±0,08a	4,59±0,06a
<i>p value</i>	<b>0,001</b>	<b>0,007</b>	<b>0,0003</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	0,469	<b>0,032</b>	0,274	0,255
<i>0N</i>	1,28±0,41c'	9,58±3,05b	1,62±0,65b'	2,04±0,39b'	1,69±0,41a'	1,86±0,29a'	3,34±0,43b'	5,05±0,11a'	4,57±0,04a'
<i>20N</i>	1,60±0,55b'	11,94±4,39b	2,12±1,00a'b'	2,41±0,48b'	1,97±0,39a'	3,20±3,43a'	3,76±0,51a'	5,02±0,07a'	4,59±0,05a'
<i>60N</i>	2,11±0,61a'	16,90±5,06a	2,67±1,08a'	2,91±1,26a'	2,10±0,72a'	1,83±0,48a'	3,69±1,83a'	5,06±0,10a'	4,58±0,05a'
<i>p value</i>	<b>0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0,004</b>	<b>0,020</b>	0,090	0,823	<b>0,005</b>	0,371	0,469

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 capitale comparent les moyennes des traitements en monoculture (MONO) à celle des traitements en association de culture (ASSOC) et les lettres minuscules comparent les moyennes des traitements 0N, 20N et 60N ou 0P, 20P et 60P entre elles avec les systèmes de culture confondus. MG représente la moyenne générale pour chaque paramètre étudié tous traitements confondus. *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. Les valeurs en gras sont les *p-values* inférieurs au seuil de signification 5 %.

#### IV-2- Biomasse totale sèche



#### Légende :

**MONO-R** : Riz en monoculture

**ASSOC-R** : Riz en association de culture

**MONO-Cb** : Haricot en monoculture

**ASSOC-Cb** : Haricot en association de culture

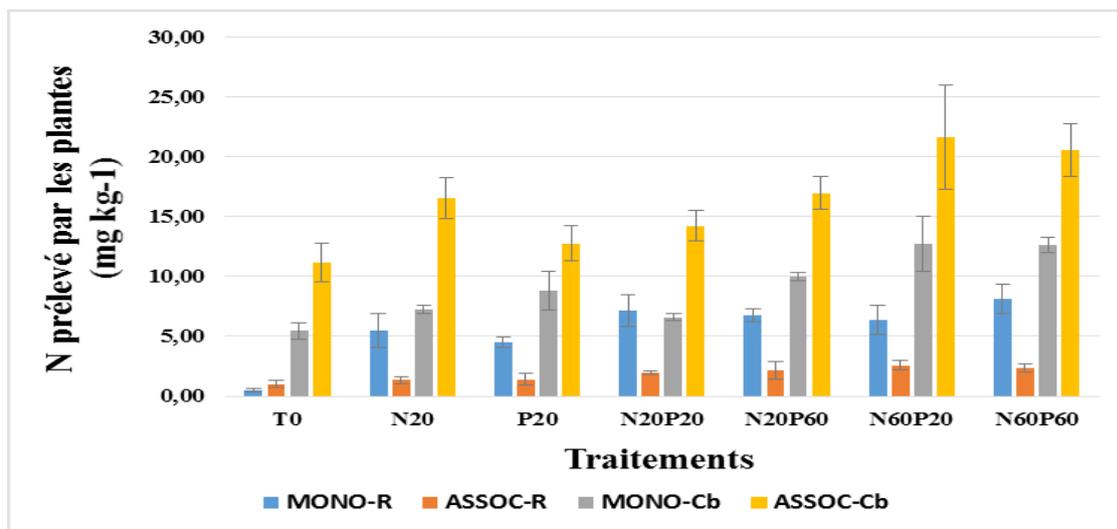
**Figure 4** : Biomasse totale sèche par traitements et par systèmes

Pour le riz, le minimum de biomasse est observé pour le traitement témoin en association (ASSOC-T0) avec  $0,17 \pm 0,04$  g pot<sup>-1</sup> tandis que le traitement N60P60 en système monoculture (MONO-N60P60) a obtenu la biomasse la plus élevée avec  $0,88 \pm 0,06$  g pot<sup>-1</sup> (Figure 4). Le système de culture a eu un effet significatif sur la biomasse. En effet, la biomasse du riz en monoculture était significativement plus élevée par rapport à celle en association ( $p$ -value < 0,0001). En ce qui concerne les apports de fertilisant, la biomasse du riz a augmenté significativement avec les doses d'apport croissant de N ( $p$ -value = 0,0002) et de P ( $p$ -value < 0,0001). Toutefois, aucune différence significative n'apparaît entre la biomasse du riz aux doses 20 kg N ha<sup>-1</sup> et celle de 60 Kg N ha<sup>-1</sup> (Cf. Tableau 3).

Pour le haricot, le traitement N60P60 en association (ASSOC-N60P60) a donné la biomasse la plus élevée avec  $2,99 \pm 0,22$  g pot<sup>-1</sup> tandis que la biomasse minimale a été constatée avec le traitement témoin en monoculture (MONO-T0) avec  $0,83 \pm 0,01$  g pot<sup>-1</sup> (Figure 4). Le système de culture a eu un effet significatif sur la biomasse du haricot. La biomasse en

association a été largement supérieure à celle en monoculture ( $p\text{-value} < 0,0001$ ). A propos des apports de fertilisant, la biomasse a augmenté avec l'apport de P et est significativement élevée à la dose 60 kg ha<sup>-1</sup> ( $p\text{-value} = 0,001$ ). Pour les apports de N, la biomasse a augmenté significativement avec les doses croissantes d'apport ( $p\text{-value} < 0,0001$ ) (Cf. Tableau 4).

### IV-3- Azote prélevé par la plante



#### Légende :

**MONO-R** : Riz en monoculture

**ASSOC-R** : Riz en association de culture

**MONO-Cb** : Haricot en monoculture

**ASSOC-Cb** : Haricot en association de culture

#### Figure 5 : Azote prélevé par les plantes par traitements et par système

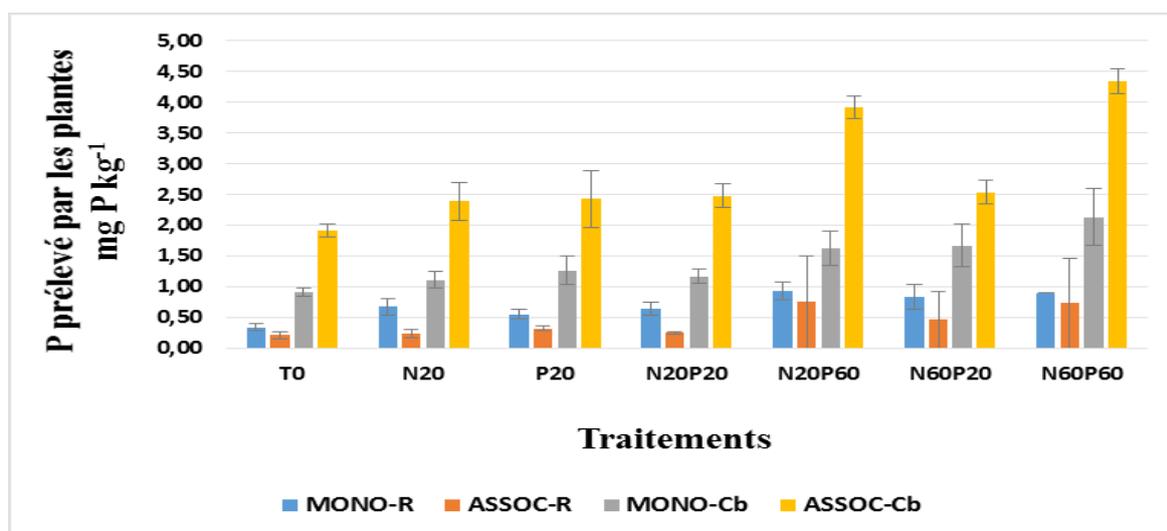
Pour le riz, l'azote prélevé a varié de  $0,45 \pm 0,15$  à  $8,13 \pm 1,23$  mg N kg<sup>-1</sup> pour les traitements respectivement témoin en monoculture (MONO-T0) et N60P60 en monoculture (MONO-N60P60) (Figure 5). Le système de culture a eu un effet significatif sur le prélèvement d'azote ( $p\text{-value} = 0,0001$ ). En effet, il a été constaté que le prélèvement d'azote en monoculture a été significativement élevé par rapport à l'association. Le prélèvement d'azote a augmenté avec la dose croissante de P et a eu un prélèvement significativement élevé à la dose 60 kg ha<sup>-1</sup> mais qui n'a pas présenté une différence significative avec la dose 20 kg ha<sup>-1</sup>. Il en est de même pour l'apport de N, la dose 60 kg ha<sup>-1</sup> a donné un prélèvement maximum mais n'accuse pas une différence significative avec la dose 20 kg ha<sup>-1</sup> (Cf. Tableau 3).

Pour le haricot, l'azote prélevé a varié de  $5,48 \pm 0,69$  à  $21,68 \pm 4,34$  mg N kg<sup>-1</sup> pour les traitements respectivement témoin en monoculture (MONO-T0) et N60P20 en association (ASSOC-N60P20) (Figure 5). Le système de culture a eu un effet significatif sur le prélèvement d'azote ( $p\text{-value} < 0,0001$ ). En effet, il a été constaté que le prélèvement d'azote en association est significativement élevé par rapport à l'association. Le prélèvement d'azote a augmenté avec la dose croissante de P et a présenté un prélèvement significativement élevé à la dose 60 kg ha<sup>-1</sup> et un prélèvement intermédiaire à la dose 20 kg ha<sup>-1</sup>. Un effet significatif de l'apport de N a été constaté avec un prélèvement significativement élevé à la dose 60 kg ha<sup>-1</sup> (Cf. Tableau 4)

#### **IV-4- P prélevé par la plante**

Pour le riz, le P prélevé a oscillé autour de  $0,21 \pm 0,06$  à  $0,93 \pm 0,15$  mg P kg<sup>-1</sup>, qui ont été trouvés au traitement témoin en association (ASSOC-T0) et N20P60 en monoculture (MONO-N20P60) (Figure 6). Le système de culture a eu une influence significative sur ce prélèvement de P par la plante ( $p\text{-value} < 0,0001$ ). Le système monoculture a eu un prélèvement de P significativement élevé par rapport à l'association. Ce prélèvement de P a augmenté significativement avec la dose croissante de P et N (Cf. Tableau 3).

Pour le haricot, le P prélevé a varié entre  $0,91 \pm 0,07$  à  $4,35 \pm 0,20$  mg P kg<sup>-1</sup> pour les traitements témoin en monoculture (MONO-T0) et N60P60 en association de culture (ASSOC-N60P60) (Figure 6). Le système a révélé une influence significative sur ce prélèvement de P ( $p\text{-value} < 0,0001$ ) avec un prélèvement significativement élevé en association de culture. L'apport de P a eu aussi un effet significatif sur le prélèvement de P par le haricot surtout à la dose 60 kg ha<sup>-1</sup>. De même, l'apport de N a eu une influence sur ce paramètre avec un prélèvement significativement élevé la dose 60 kg ha<sup>-1</sup> et une valeur intermédiaire à la dose 20 kg ha<sup>-1</sup> (Cf. Tableau 4).



**Légende :**

**MONO-R :** Riz en monoculture

**ASSOC-R :** Riz en association de culture

**MONO-Cb :** Haricot en monoculture

**ASSOC-Cb :** Haricot en association de culture

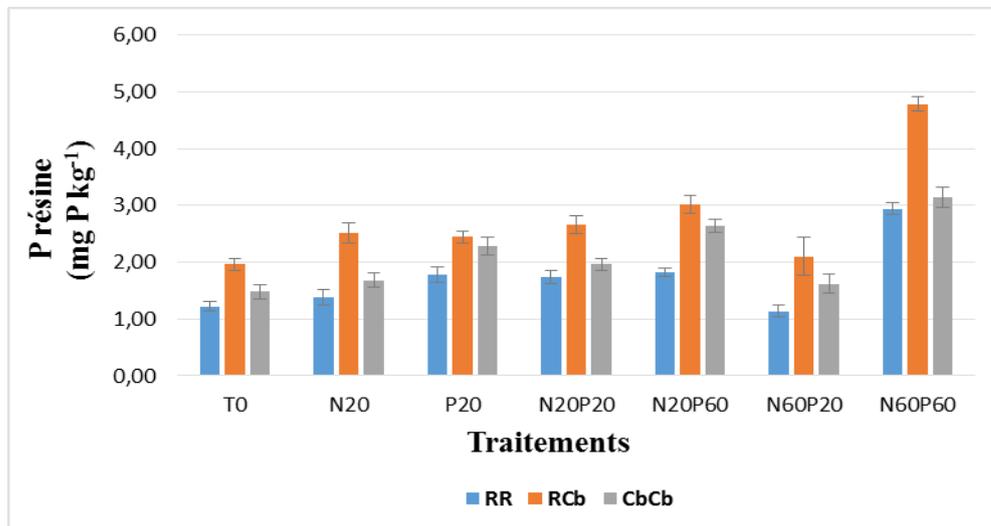
**Figure 6 :** P prélevé par les plantes par traitement et par système

**IV-5- Disponibilité du phosphore (P résine) dans les sols rhizosphériques**

Dans la rhizosphère du riz, le traitement N60P60 en association (RCb-N60P60) présentait la disponibilité de P la plus élevée avec  $4,78 \pm 0,13 \text{ mg P kg}^{-1}$ . Par contre, la plus faible disponibilité a été constatée pour le traitement N60P20 en monoculture de riz (RR-N60P20) avec une valeur de  $1,14 \pm 0,11 \text{ mg P kg}^{-1}$  (Figure 7). Le système de culture a eu une influence significative sur la disponibilité du phosphore avec une disponibilité plus importante en association par rapport à la monoculture. La disponibilité du phosphore augmentait avec l'apport croissant de P et a été significativement plus élevée avec la dose  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de P ( $p\text{-value} < 0,0001$ ). Par ailleurs, il n'y a pas eu d'effet significatif d'apport de N sur la disponibilité de P même s'il y a eu une tendance d'augmentation (Cf. Tableau 3).

Pour le haricot, le maximum du P disponible est observé au traitement N60P60 en association (RCb-N60P60) avec un teneur de  $4,78 \pm 0,13 \text{ mg P kg}^{-1}$ . C'est le traitement témoin en monoculture (CbCb-T0) qui présentait la plus faible teneur de P disponible avec  $1,48 \pm 0,13 \text{ mg P kg}^{-1}$  (Figure 7). Le système de culture a eu une influence significative sur la disponibilité du phosphore ( $p\text{-value} = 0,001$ ), avec une augmentation significative de la

disponibilité en association par rapport à la monoculture. La disponibilité en phosphore augmente avec la dose de P avec une teneur significativement plus élevée à la dose 60 kg ha<sup>-1</sup> de P. L'apport de N a eu aussi une influence significative sur la disponibilité du P avec une teneur plus élevée à la dose de 60 kg ha<sup>-1</sup> (Cf. Tableau 4).



**Légende :**

**RR :** Sols rhizosphériques de la monoculture du riz

**CbCb :** Sols rhizosphériques de la monoculture du haricot

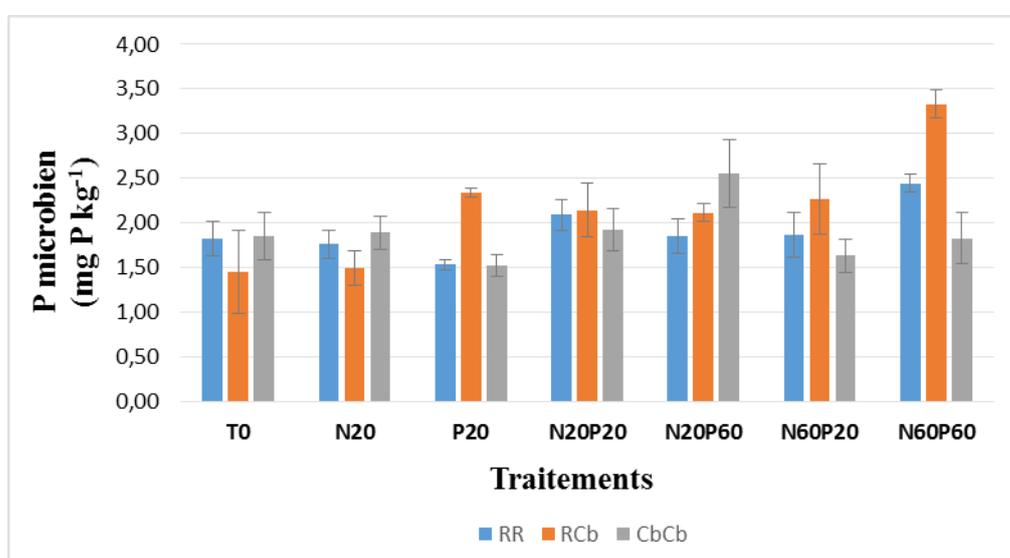
**RCb :** Sols rhizosphériques de l'association Riz-haricot

**Figure 7 :** P résine dans les sols rhizosphériques par traitements et par système

**IV-6- P microbien dans les sols rhizosphériques**

Pour le riz, le traitement N60P60 en association de culture (RCb-N60P60) a eu l'activité microbienne la plus intense avec une biomasse microbienne en phosphore de 3,33 ± 0,16 mg P kg<sup>-1</sup>. La moindre activité microbienne a été observée pour le traitement témoin en association (RCb-T0) avec une biomasse microbienne en phosphore de 1,45 ± 0,47 mg P kg<sup>-1</sup> (Figure 8). Le système de culture n'a aucune influence sur les activités microbiennes. Par ailleurs, le phosphore dans la biomasse microbienne augmente avec l'apport croissant de P dont la teneur significativement plus élevée à la dose de 60 kg ha<sup>-1</sup> de P. Il en est de même pour N avec une biomasse microbienne P significativement plus élevée à la dose 60 kg ha<sup>-1</sup> de N (Cf. Tableau 3).

Pour le haricot, le traitement N60P60 en association (RCb-N60P60) a eu la biomasse microbienne de P la plus élevée avec  $3,33 \pm 0,16 \text{ mg P kg}^{-1}$ . Par contre, la plus faible en P microbien est constatée au traitement témoin en association (RCb-T0) avec  $1,37 \pm 0,39 \text{ mg P kg}^{-1}$  (Figure 8). Le système de culture n'a pas eu une influence sur la teneur en P microbien des sols rhizosphériques du haricot. De même, l'apport de N n'a pas d'effet significatif aussi sur la teneur en P de la biomasse microbienne, même si elle a augmenté légèrement avec la dose. Par contre, la teneur en P dans la biomasse microbienne a augmenté significativement avec la dose croissante de P et la teneur la plus élevée étant observée à la dose de  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  (Cf. Tableau 4).



**Légende :**

**RR :** Sols rhizosphériques de la monoculture du riz

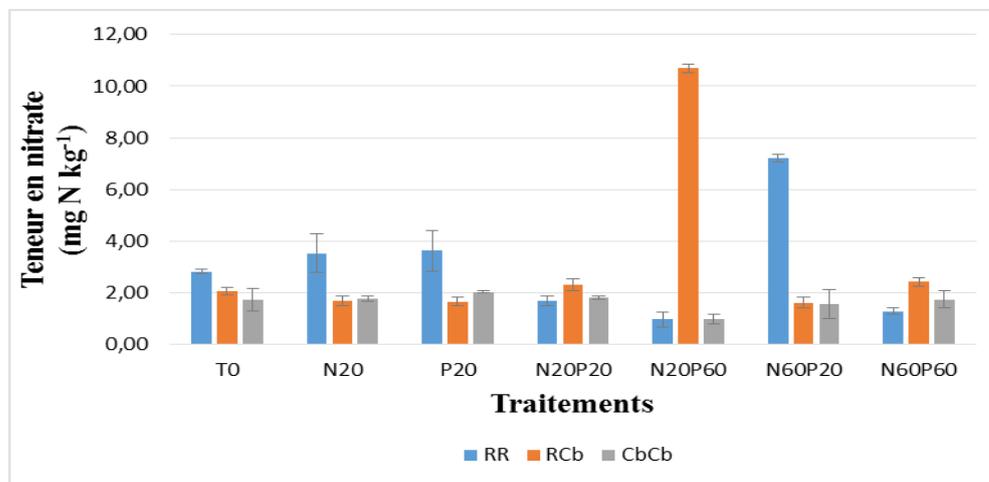
**CbCb :** Sols rhizosphériques de la monoculture du haricot

**RCb :** Sols rhizosphériques de l'association Riz-haricot

**Figure 8 :** P microbien des sols rhizosphériques par traitements et par systèmes

## IV-7- Disponibilité de l'azote dans les sols rhizosphériques

### IV-7-1- Disponibilité en nitrate dans les sols rhizosphériques du riz et du haricot



#### Légende :

**RR** : Sols rhizosphériques de la monoculture du riz

**CbCb** : Sols rhizosphériques de la monoculture du haricot

**RCb** : Sols rhizosphériques de l'association Riz-haricot

#### Figure 9 : Teneur en nitrate des sols rhizosphériques par traitements et par système

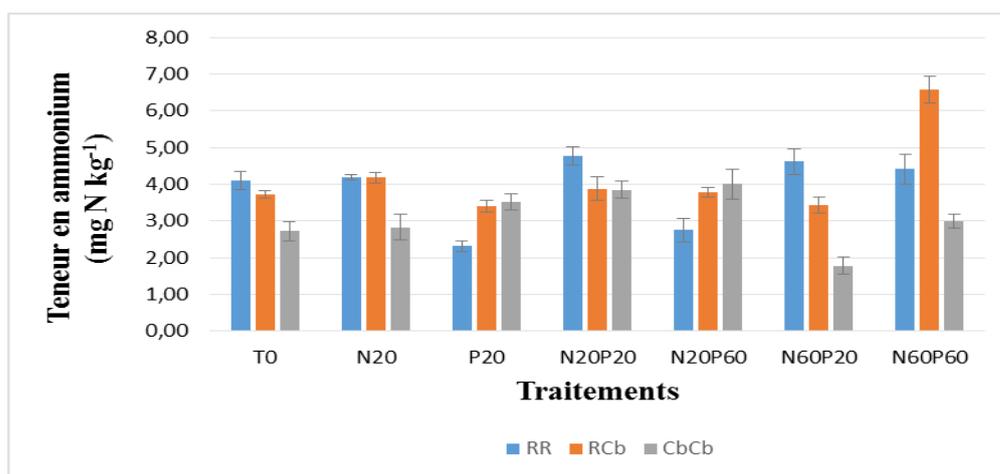
Pour le riz, le traitement N20P60 en association (RCb-N20P60) a obtenu la teneur en nitrate la plus élevée avec  $10,69 \pm 0,15 \text{ mg N kg}^{-1}$ . La plus faible teneur en nitrate est constatée au traitement N20P60 en monoculture (RR-N20P60) avec  $0,97 \pm 0,29 \text{ mg N kg}^{-1}$  (Figure 9). Le système de culture et les apports de fertilisant N et P n'ont aucun effet significatif sur la teneur en nitrate des sols rhizosphériques du riz (Cf. Tableau 3).

Pour le haricot, le traitement N20P60 en association (RCb-N20P60) a donné une teneur en nitrate élevée avec  $10,69 \pm 0,15 \text{ mg N kg}^{-1}$  tandis que le minimum de teneur en nitrate est constaté avec le traitement N20P60 en monoculture (CbCb-N20P60) avec une teneur de  $0,97 \pm 0,18 \text{ mg N kg}^{-1}$  (Figure 9). Le système de culture a eu un effet significatif sur la teneur en nitrate ( $p\text{-value} = 0,001$ ) avec une importante teneur en association de culture par rapport à la monoculture. Par contre, les apports de fertilisant N et P n'ont aucun effet significatif sur la teneur en nitrate des sols rhizosphériques du haricot (Cf. Tableau 4).

#### IV-7-2- Disponibilité en ammonium dans les sols rhizosphériques du riz et du haricot

Pour le riz, le traitement N60P60 en association (RCb-N60P60) a donné une teneur en ammonium élevée avec  $6,58 \pm 0,36 \text{ mg N kg}^{-1}$ . Par contre, la plus faible teneur en ammonium est constatée au traitement P20 en monoculture (RR-P20) avec une teneur de  $2,31 \pm 0,14 \text{ mg N kg}^{-1}$  (Figure 10). Le système de culture et l'apport de P n'ont pas eu d'influence significative sur la teneur en ammonium des sols. Par contre, l'apport de N a eu un effet significatif sur cette teneur en ammonium dont la teneur la plus élevée est constatée à la dose 60 kg ha<sup>-1</sup> (Cf. Tableau 3).

Pour le haricot, la teneur en ammonium la plus élevée est constatée au traitement N60P60 en système association (RCb-N60P60) dont la teneur atteint  $6,57 \pm 0,35 \text{ mg N kg}^{-1}$ . Le traitement N60P20 en monoculture (CbCb-N60P20) a donné la plus faible teneur avec  $1,78 \pm 0,23 \text{ mg N kg}^{-1}$  (Figure 10). Le test de Kruskal-Wallis au seuil de signification 0,05 a révélé qu'il y a eu un effet significatif du système de culture sur la teneur en ammonium des sols rhizosphériques du haricot (*p-value* < 0,0001). La teneur en ammonium du système en association est significativement plus élevée par rapport à la monoculture. L'apport de P a eu une influence significative sur la teneur en ammonium dont la plus élevée est constatée à la dose 60 kg P ha<sup>-1</sup>. Il a été de même pour la fertilisation en N et la teneur la plus élevée a été observée à la dose 20 kg ha<sup>-1</sup> mais elle n'a pas montré pas de différence significative avec la dose 60 kg ha<sup>-1</sup> (Cf. Tableau 4).



**Légende :**

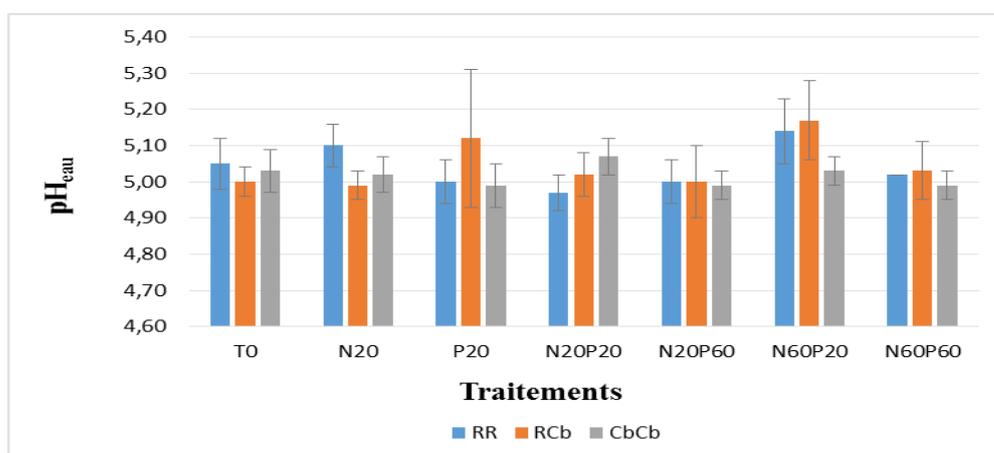
**RR** : Sols rhizosphériques de la monoculture du riz

**CbCb** : Sols rhizosphériques de la monoculture du haricot

**RCb** : Sols rhizosphériques de l'association Riz-haricot

**Figure 10** : Teneur en ammonium des sols rhizosphériques par traitement et par système

#### IV-8- $pH_{eau}$ des sols rhizosphériques



#### Légende :

**RR** : Sols rhizosphériques de la monoculture du riz

**CbCb** : Sols rhizosphériques de la monoculture du haricot

**RCb** : Sols rhizosphériques de l'association Riz-haricot

**Figure 11** :  $pH_{eau}$  des sols rhizosphériques par traitement et par système

Pour le riz, le  $pH_{eau}$  varie entre  $4,97 \pm 0,05$  à  $5,17 \pm 0,11$  respectivement aux traitements N20P20 en monoculture (RR-N20P20) et N60P20 en système association (RCb-N60P20) (Figure 11). Le système de culture et l'apport de P n'ont aucun effet significatif sur le pH. Par contre, l'apport de N a donné un effet significatif sur le  $pH_{eau}$  avec une valeur significativement plus élevée à la dose de  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de N (Cf. Tableau 3).

Pour le haricot, les valeurs du  $pH_{eau}$  variaient de  $4,99 \pm 0,06$  à  $5,17 \pm 0,12$  respectivement aux traitements N20P20 en monoculture (MONO-N20P20) et N60P20 en système association (ASSOC-N60P20) (Figure 11). Le système de culture, l'apport de P ainsi que l'apport de N n'ont aucun effet significatif sur le  $pH_{eau}$  du sol des haricots (Cf. Tableau 4).

#### IV-9- $pH_{KCl}$ des sols rhizosphériques

Concernant le  $pH_{KCl}$  des sols rhizosphériques du riz ou du haricot, aucun effet significatif du système de culture, de l'apport de P ou de celui de N n'ont été constatés.

**IV-10- Etude des corrélations entre les apports de fertilisants (N et P) et les paramètres physico-chimiques étudiées.**

Afin de trouver les relations linéaires entre les paramètres étudiés, les doses d'apport de N et P, des tests de corrélation de Pearson ont été réalisées. Les résultats sur les corrélations entre les variables ainsi que *les p-values* sont résumées dans les tableaux 5 et 6 pour le cas du riz et dans les tableaux 7 et 8 pour le cas du haricot. Il est à noter qu'une corrélation positive signifiait que les deux variables évoluent dans le même sens.

Pour le riz, il a été trouvé que des corrélations positives, avec un *p-value* inférieur à 0,001, existait entre :

- La biomasse totale et (i) l'apport de P ( $r=0,571$ ), (ii) l'apport de N ( $r=0,468$ ), (iii) le N prélevé ( $r=0,888$ ) et (iv) le P prélevé ( $r=0,885$ ).
- Le P résine et (i) l'apport de P ( $r=0,605$ ), (ii) le P microbien ( $r=0,545$ ) et (iii) la teneur en ammonium ( $r=0,517$ )
- La teneur en ammonium et (i) l'apport de N ( $r=0,527$ ), (ii) le P résine ( $r=0,517$ ), (iii) le P microbien ( $r=0,577$ )

Pour le haricot, les couples de variables qui ont donné une corrélation positive, avec un *p-value* inférieur à 0,001, étaient :

- La biomasse et (i) les apports de fertilisant N ( $r=0,515$ ) et P ( $r=0,456$ ), (ii) N et P prélevé (respectivement  $r=0,895$  et  $r=0,933$ ) par la plante, (iii) le P disponible du sol ( $r=0,729$ ), (iv) le P microbien du sol ( $r=0,395$ ) et (v) la disponibilité en azote du sol ( $r=0,609$ ).
- Le P résine et (i) les apports de fertilisants N ( $r=0,398$ ) et P ( $r=0,728$ ), (ii) N et P prélevé (respectivement  $r=0,576$  et  $r=0,795$ ), (iii) la teneur en P de la biomasse microbienne du sol ( $r=0,663$ ), (iv) la teneur en ammonium du sol ( $r=0,248$ )
- La teneur en nitrate et (i) l'apport de P ( $r=0,389$ ), (ii) la biomasse ( $r=0,372$ ) et (iii) le P prélevé par la plante ( $r=0,542$ )
- La teneur en ammonium et (i) l'apport de P ( $r=0,400$ ), (ii) la biomasse ( $r=0,609$ ), (iii) le N et P prélevé (respectivement  $r=0,460$  et  $r=0,648$ ), (iv) P résine ( $r=0,800$ ), et (v) P microbien ( $r=0,578$ ).

## V- Discussion

### V-1- Discussions et vérification des hypothèses

#### V-1- 1- Effet de l'association céréale-légumineuse sur la biomasse du riz et du haricot

D'après les résultats, la biomasse totale sèche du riz en monoculture est significativement plus élevée par rapport à la biomasse totale sèche du riz cultivée en association. La biomasse moyenne pour tous traitements confondus pour le riz en association ( $0.36 \pm 0.16 \text{ g pot}^{-1}$ ) diminue presque la moitié par rapport à celle en monoculture qui était de  $0.68 \pm 0.19 \text{ g pot}^{-1}$  (Cf. Annexe 10).

Une diminution de performance est donc constatée chez le riz en association par rapport à la monoculture. Cette diminution de performance pourrait être expliquée par l'existence de compétition interspécifique vis-à-vis des ressources disponibles telles que l'eau, la lumière et les nutriments (Betencourt, 2012). Selon Cahill (1999) et Cahill (2002), une compétition négative produit une diminution de la biomasse et limite la croissance, même dans le cas d'accroissement de ressources. Cette compétition peut être de trois natures à savoir (i) racinaire, (ii) foliaire ou (iii) totale (racinaire et foliaire). En effet, une compétition foliaire a été constatée au cours de l'expérimentation (Cf. photo 5) dans laquelle les plants du riz ont été généralement ombragés par le feuillage du haricot associé. On peut aussi considérer la présence d'une compétition racinaire dans les pots en association. D'après Wilson (1988), la compétition racinaire a un effet plus marqué sur la performance de la plante. Cette compétition racinaire est influencée par divers facteurs tels que l'eau, la teneur en minéraux du sol, la profondeur des racines, les ressources disponibles et l'espace occupé par les racines. Ce phénomène de compétition concorde avec le résultat qui a été trouvé sur le haricot. Pour le haricot, l'association de culture a procuré une biomasse significativement élevée par rapport à la monoculture.

Néanmoins, il ne semble pas y avoir de conditions défavorables pour l'accès aux ressources trophiques (N et P) pour le riz en association. Les teneurs en P résine dans les sols rhizosphériques du riz étaient significativement plus élevées en association par rapport à la monoculture ( $2,78 \pm 0,90 \text{ mg P kg}^{-1}$  en association contre  $1,72 \pm 0,58 \text{ mg P kg}^{-1}$  en monoculture d'après le tableau 3). Pour le N, il n'y a pas eu de différences significatives entre les teneurs en  $\text{N-NO}_3^-$  et  $\text{N-NH}_4^+$  entre la monoculture et l'association.

Par ailleurs, l'association a eu un effet positif sur la production globale de la biomasse végétale par pot comparée à la monoculture du haricot ou du riz. La production globale obtenue en association est de 2,48 g de biomasse pot<sup>-1</sup> contre 2,38 g pot<sup>-1</sup> en monoculture du haricot et 1,36 g pot<sup>-1</sup> en monoculture du riz.

Betencourt *et al.* (2010) ont trouvé des résultats différents de ce qu'on a trouvé au cours de l'expérimentation. En culture en pot, la biomasse de la céréale (blé dur) associée avec la légumineuse (le pois chiche) a été améliorée par rapport à celle de la monoculture du blé dur du fait de l'interaction entre les deux racines des deux espèces, qui a permis une optimisation de l'utilisation des ressources pour la production de la biomasse. Li *et al.* (2001) et Li *et al.* (2003) ont trouvé aussi une amélioration de la croissance en culture intercalaire de maïs-fève et blé-soja.

Les effets de l'association céréale-légumineuse sur la biomasse des deux plantes peut être donc influencés par différents facteurs tels que l'espèce légumineuse utilisée et la céréale associée, la compétitivité des deux plantes associées et les densités de semi.

**Ainsi d'après les différents résultats, la première hypothèse émise qui stipulait que l'association de la céréale avec la légumineuse permettrait d'obtenir le maximum de biomasse par rapport à la monoculture n'est que partiellement validée.**

#### **V-1-2- Effet de l'association céréale-légumineuse sur la disponibilité de N et P**

Pour vérifier l'effet positif ou négatif de l'association céréale-légumineuse sur la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol, on va analyser de près deux caractéristiques telles que la biodisponibilité réelle, c'est-à-dire les quantités de N et P prélevées par les plantes ainsi que la disponibilité sensu stricto, c'est-à-dire la teneur de N ou P labile dans le sol à un moment donné, c'est-à-dire au moment de la floraison du haricot.

La biodisponibilité d'un nutriment correspond à la quantité effectivement prélevée par un organisme, que ce soit les plantes ou les microorganismes du sol (Harmsen, 2007 ; Andriamaniraka, 2009). Par contre, la disponibilité d'un nutriment dans le sol correspond à la quantité présente dans la solution du sol immédiatement accessible à l'absorption par la plante, ainsi qu'à la fraction susceptible de passer facilement en solution (Harmsen, 2007).

Concernant cette biodisponibilité des éléments, nos résultats (Tableau 3 et 4) ont montré que l'azote absorbé par le riz et le haricot sous association ont été respectivement de l'ordre de  $1,83 \text{ mg N kg}^{-1}$  et  $16,29 \text{ mg N kg}^{-1}$ . Comparé à celui absorbé par le riz et le haricot en monoculture (respectivement de  $5,56 \text{ mg N kg}^{-1}$  et  $9,08 \text{ mg N kg}^{-1}$ ), l'association diminue l'absorption de N chez le riz mais a permis d'augmenter le prélèvement de N chez le haricot. Cette diminution d'acquisition de N chez le riz est due à la présence de la compétition interspécifique entre les deux espèces en association vis-à-vis de cet élément. Par ailleurs, chez le haricot en monoculture, la diminution de prélèvement de N par rapport à l'association peut être causée par la concurrence intraspécifique.

Toutefois, il faut prendre en compte la capacité des légumineuses à fixer l'azote atmosphérique. Cette quantité de N élevée dans le haricot en monoculture ou en association de culture peut provenir du sol mais aussi de l'atmosphère. Mais la fixation symbiotique est plus favorisée en association de culture la fixation symbiotique (Danso *et al.*, 1984), d'où la quantité importante de N absorbé chez le haricot en association.

Si on se réfère à la quantité d'azote absorbé globale par les plantes, la monoculture du haricot a prélevé le plus d'azote avec  $18,16 \text{ mg N kg}^{-1}$  (c'est-à-dire  $9,08 \text{ mg N kg}^{-1} \times 2$ ), suivi de l'association riz-haricot avec  $18,12 \text{ mg N kg}^{-1}$  (c'est-à-dire  $1,83 \text{ mg N kg}^{-1} + 16,29 \text{ mg N kg}^{-1}$ ) et enfin la monoculture de riz avec  $11,12 \text{ mg N kg}^{-1}$  (c'est-à-dire  $5,56 \text{ mg N kg}^{-1} \times 2$ ). Cela montre l'importance des légumineuses introduites dans les systèmes de culture pour l'acquisition de l'azote car elles peuvent puiser en même temps l'azote du sol mais aussi fixer le  $\text{N}_2$  de l'atmosphère.

Pour la biodisponibilité de P par les plantes, le P absorbé par le riz sous association a été de l'ordre de  $0,42 \text{ mg P kg}^{-1}$  et celui absorbé par le haricot était de  $2,86 \text{ mg P kg}^{-1}$ . Par comparaison de P absorbé par le riz et le haricot en monoculture (respectivement de  $0,69 \text{ mg P kg}^{-1}$  et  $1,41 \text{ mg P kg}^{-1}$ ), l'association de culture a diminué l'absorption de P chez le riz mais a augmenté celui du haricot. Cela peut être encore expliqué par la présence de compétition entre les deux espèces en association et par la concurrence dans la monoculture du haricot vis-à-vis de P biodisponible.

En outre, l'association riz-haricot a permis une absorption élevée de P par les plantes par rapport à la monoculture du haricot et la monoculture du riz (dont les valeurs respectives de  $3,28 \text{ mg P kg}^{-1}$ ,  $2,81 \text{ mg P kg}^{-1}$  et  $1,3 \text{ mg P kg}^{-1}$ ). L'association de culture a amélioré donc l'acquisition du P par les plantes. En effet, en culture plurispécifique, la rhizosphère pourra

être mieux exploitée et explorée par les activités racinaires induisant une meilleure acquisition de ressources (Betencourt, 2012).

Par ailleurs, le P immobilisé par les microorganismes a eu une tendance élevée en association riz-haricot par rapport à la monoculture dans la rhizosphère des deux plantes même si il n'a pas présenté de différence significative chez le haricot. Ces microflores du sol ont une importance capitale pour la disponibilité de P car elles peuvent entrer en compétition avec les plantes au cours de la période d'absorption de P (Andriamaniraka, 2009) et provoque la réorganisation du Pi en Po mais qui sera restitué au sol à sa mort.

Au stade de floraison du haricot, la teneur en nitrate dans la rhizosphère de l'association riz-haricot a eu une tendance de supériorité par rapport à la rhizosphère de la monoculture du riz même s'elle n'a pas présenté de différence significative. Par ailleurs, cette teneur en association a été significativement élevée par rapport à la teneur en nitrate dans la rhizosphère de la monoculture du haricot (Cf. Tableau 3 et 4). Pour le cas de l'ammonium, il a été trouvé que la teneur dans la rhizosphère de l'association a été inférieure par rapport à la teneur dans la rhizosphère de la monoculture du riz même s'il n'a pas présenté de différence significative. Par contre, la teneur en ammonium en association a montré une supériorité significative par rapport à la monoculture du haricot (Cf. Tableau 3 et 4). On peut déduire de ces résultats que l'azote dans les rhizosphères des plantes est plus disponible en association qu'en monoculture, surtout par rapport à la monoculture des légumineuses.

En outre, le résultat sur la disponibilité de P au stade floraison du haricot a montré que le P résine dans la rhizosphère du riz-haricot a été significativement élevé par rapport à la monoculture du haricot et à la monoculture du riz (dont les valeurs respectives sont 2,78 mg P kg<sup>-1</sup>, 2,11 mg P kg<sup>-1</sup> et 1,72 mg P kg<sup>-1</sup>). Les légumineuses ont favorisé donc la disponibilité de P par rapport à la céréale dans la même condition de système de culture (cas de la monoculture). De plus, cette disponibilité de P a été plus remarquée dans la rhizosphère de l'association céréale-légumineuse. Cela peut être dû à l'augmentation du taux de fixation symbiotique d'azote par le haricot en association, du fait de la compétition exercée par la céréale pour le prélèvement de l'azote minéral du sol. La fixation symbiotique de l'azote a un effet positif sur la disponibilité de P (Betencourt, 2012) par acidification de la rhizosphère. Mais, l'exsudation résultante d'OH<sup>-</sup> par la céréale (par l'absorption de la nitrate) tamponne l'effet de cette acidification de la rhizosphère, c'est pourquoi il n'y avait pas de différence

significative du pH entre la rhizosphère de l'association riz-haricot et la monoculture du haricot dans nos expérimentation.

**Ainsi donc la seconde hypothèse rapportant que l'association de la céréale avec la légumineuse permettrait une meilleure disponibilité en azote et phosphore par rapport à la monoculture est validée.**

### **V-1-3- Effet de l'apport des fertilisants N et P sur la disponibilité de N et P dans les sols rhizosphériques du riz et du haricot**

Même raisonnement que la sous partie V-2, regardant à la fois la biodisponibilité réelle de N et P et la disponibilité de N et P au moment du stade de floraison du haricot.

Les apports croissants de N n'ont pas eu d'effets significatifs sur les teneurs en nitrate au niveau de la rhizosphère des plantes prélevées au stade floraison du haricot mais les biodisponibilités de N ont augmenté avec la dose d'apport de N. Les prélèvements importants de nitrate par les plantes semblent maintenir les teneurs de cet élément à un niveau assez bas. Par contre, ces apports de N induisent une augmentation significative de la teneur en ammonium pour les deux plantes. Une ammonification relativement lente pourrait expliquer ces teneurs élevées d'ammonium pour les plus hauts niveaux d'apport de N. En plus, la fertilisation minérale azotée est l'un des moyens de gain d'azote du le sol.

Les apports croissants de N ont aussi induit une augmentation significative de la teneur en P résine des sols dans la rhizosphère du haricot. Ceci pourrait être expliqué notamment par les effets de la nutrition azotée sur les efflux de protons/hydroxyle au niveau de la rhizosphère, bien que l'effet tampon du sol ne permette pas d'observer des effets sur le pH du sol (il n'y a pas de différence significative sur le pH même avec une valeur élevée à dose 20 kg ha<sup>-1</sup> de N avec pH=5,06). Le prélèvement racinaire de nitrate conduit à la libération des ions OH<sup>-</sup> par les racines du haricot (Jaillard, 2001). La libération des ions OH<sup>-</sup> en solution va induire une compétition de ces ions avec le P inorganique pour les sites de fixation et va augmenter la solubilisation des formations Phosphore-Aluminium amorphe (Dubus, 1997), d'où l'augmentation du P disponible.

Il a été montré aussi que le P biodisponible par la plante a augmenté avec l'apport croissant de N dans la rhizosphère des plantes. Cela est confirmé par la présence de la corrélation positive entre les deux variables que ce soit dans la rhizosphère du riz ou du haricot (respectivement R=0,507 et *p-value* < 0,0001 ; R=0,389 et *p-value*=0,001). Une augmentation de la

disponibilité de P dans le sol par apport de N peut permettre une amélioration de l'acquisition de P par la plante. Par ailleurs, le P microbien dans la rhizosphère du haricot n'a pas été influencé par l'apport de N mais avec une tendance d'augmentation avec la dose croissante alors que chez le riz, le P microbien a augmenté significativement avec la dose croissante. Une corrélation positive a été aussi constatée entre l'apport de N et la teneur en P microbien. Rappelons que la microflore du sol peut immobiliser une quantité importante de P dans un contexte où le sol présente une quantité limitée en P (Mourreaux, 1973).

En outre, les apports de P n'ont pas eu d'effets significatifs sur la teneur en nitrate au niveau de la rhizosphère des plantes. De même, la fertilisation minérale phosphatée n'a pas eu d'effets sur la disponibilité de l'ammonium dans la rhizosphère du riz. Par contre, elle a induit une augmentation significative de la teneur en ammonium pour le plus haut niveau d'apport de P dans la rhizosphère du haricot. L'application de la dose élevée de P pourra stimuler la fixation symbiotique chez les légumineuses (Jemo *et al.*, 2006) ainsi peut favoriser l'acquisition en N<sub>2</sub> par rapport à l'ammonium du sol.

Les résultats du P résine montrent que la disponibilité augmentait avec la dose croissante d'apport P dans la rhizosphère des plantes prélevées au stade floraison du haricot, avec une teneur élevée à la dose 60 kg ha<sup>-1</sup>. Ce résultat concordait avec celui de Henintsoa (2011) et Henintsoa (2013) que la disponibilité de P répond mieux à la fertilisation minérale phosphatée. Ceci démontre l'importance des apports minéraux dans la mise à disponibilité du P (Henintsoa, 2013). En plus, une corrélation positive élevée (Tableau 5 et 7) a été observée entre les apports de P et le P résine dans la rhizosphère des plantes.

Chez les deux plantes, la biodisponibilité a augmenté avec les apports de P et surtout à niveau élevé de la dose. En effet, dans un contexte de forte adsorption des ions orthophosphates (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 directement par les plantes (Henintsoa, 2013). Par ailleurs, l'augmentation significative du P microbien du sol avec l'apport de P à dose élevée montre aussi l'importance des microflores à l'acquisition du P dans le sol mais aussi sur la compétition celle-ci avec les plantes (Andriamaniraka, 2009).

La valeur du P résine obtenue au cours de l'expérimentation oscillait entre 1,14 ± 0,11 et 4,78 ± 0,13 mg P kg<sup>-1</sup> avec une moyenne de 2,25 ± 0,93 mg P kg<sup>-1</sup> chez le riz et une moyenne de 2,45 ± 0,83 mg P kg<sup>-1</sup> chez le haricot, soit une moyenne inférieure à 1 % du P total. Ceci est

conforme aux résultats trouvés par Richardson *et al.* (2009) qui avaient aussi estimés que le P disponible dans les sols est inférieur à 1 %. En plus, ces valeurs sont largement inférieures à celle du P résine obtenu par Henintsoa (2013) sous TSP seul, qui était de  $13,3 \pm 8,7$  mg P kg<sup>-1</sup> chez le riz et  $10,6 \pm 7$  mg P kg<sup>-1</sup> chez le haricot sous labour conventionnel, du fait de l'acidité du sol qui a été de  $5,04 \pm 0,10$  dans notre étude contre  $5,38 \pm 0,4$  et  $5,49 \pm 0,2$ , respectivement pour le riz et le haricot, dans celle de Henintsoa (2013). La forme disponible de P est étroitement lié au pH et le maximum de disponibilité est rencontré au pH 5,5 à 7,5 (Schachtman *et al.*, 1998 ; Hinsinger, 2001). Ce P disponible n'est pas encore suffisant pour la nutrition phosphatée des plantes comparé à la valeur minimale en P disponible requise pour assurer les besoins phosphatés appropriés chez la plupart des plantes, qui est de 20 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kg<sup>-1</sup>, soit 8,73 mg P kg<sup>-1</sup> (Muhinda *et al.*, 2009). Pour subvenir donc au besoin phosphaté des plantes sur les sols ferrallitiques de tanety, une augmentation du pH s'avère nécessaire avant la culture par apport de la matière organique ou de dolomie.

**Ainsi la troisième hypothèse qui stipulait que les disponibilités des ressources trophiques (N et P) augmenteraient avec l'augmentation des doses d'apport de N et de P est validée.**

## **V-2- Points forts et limites de l'étude**

### **V-2-1- Points forts de l'étude**

L'un des points forts de cette étude était le fait d'avoir étudié la dynamique et la disponibilité de deux des principaux éléments nutritifs des plantes, que sont l'azote et le phosphore, et leurs effets sur la biomasse des plantes. En effet, ces éléments sont les deux principaux facteurs limitant la production agricole dans les sols ferrallitiques des « tanety » à Madagascar. Par ailleurs, la méthodologie adoptée dans cette étude a pris la peine de comparer deux systèmes de culture et différentes doses d'apport de phosphore et d'azote afin d'en tirer des conclusions sur leur efficacité.

### **V-2-1- Limites de l'étude**

Dans cette étude, étant donné que les données ne respectaient pas les conditions d'homoscédasticité (normalité des données et égalité des variances), il était interdit d'utiliser une analyse de la variance (ANOVA) pour le traitement des données. Ainsi, il a fallu utiliser un test non paramétrique dit de Kruskal-Wallis qui était beaucoup moins robuste que l'ANOVA. De même, les interactions entre les facteurs n'ont pas pu être étudiées avec le test de Kruskal-Wallis.

Ensuite, la méthodologie adoptée ne permettait pas de quantifier l'azote apporté par la fixation symbiotique de l'azote (FSN). En effet, les légumineuses, comme n'importe quelle autre plante, utilisent l'azote du sol et des engrais. Mais elles ont aussi la capacité d'utiliser l'azote atmosphérique *via* la fixation symbiotique. Ainsi, une fois que l'azote du sol ou des engrais est absorbé, on ne peut plus le distinguer de celui qui a été obtenu par symbiose. De telles études nécessitent l'usage de traceurs isotopiques ( $^{15}\text{N}$ ) pour pouvoir estimer et suivre le devenir de l'élément azote dans le sol en évaluant la proportion de l'azote provenant des fertilisants et celle provenant du sol afin d'en déduire l'azote réellement obtenu par la FSN (Danso et Eskew, 1984). Ces méthodes coûtent chers et demandent des formations spécifiques pour pouvoir maîtriser les techniques isotopiques qui y correspondent.

Ensuite, certains résultats étaient inexploitable, comme la nodulation, en raison de la forte variabilité intra-traitement de ce paramètre qui a été due à des pertes lors du prélèvement des sols et des plantes. Les analyses quantitatives (nombre et poids) et qualitatives (analyse fonctionnelle des nodules) pourraient apporter des informations pertinentes sur l'effet de la légumineuse sur la disponibilité de N et P.

## **VI- Conclusion et perspectives**

Cette étude a été menée dans le but de tester les effets du système de culture utilisant les légumineuses d'une part et les effets des apports de N et P sur la biomasse du riz et du haricot et sur les paramètres physico-chimiques des sols ferrallitiques de « tanety » d'autre part. L'objectif principal était de déterminer le système de culture le plus intéressant et les doses de N et P efficaces pour une meilleure disponibilité des éléments nutritifs du sol et une meilleure croissance des plantes pour l'amélioration de la production agricole.

En premier lieu, à l'issue de l'expérimentation, on a pu aboutir à la conclusion que l'association de culture a eu un effet négatif sur la biomasse du riz et un effet positif sur la biomasse du haricot en raison l'existence d'une compétition interspécifique entre les deux plantes. Par contre, elle a un effet positif sur la production de la biomasse globale par rapport à la monoculture. Ensuite, l'association a diminué la biodisponibilité de l'azote et du phosphore chez le riz et a amélioré chez le haricot, du fait de la compétition entre les deux espèces envers cette ressource mais aussi probablement par la capacité de fixation du N<sub>2</sub> chez le haricot qui peut être élevée en association. Par contre, la biodisponibilité globale de l'azote et du phosphore par les plantes a été élevée dans le système en présence de la légumineuse et en association riz-haricot. L'exploitation et l'exploration de la rhizosphère par les activités racinaires en culture plurispécifique pourraient être la cause de cette meilleure biodisponibilité. Par ailleurs, le P immobilisé par les microorganismes a eu une tendance élevée en association riz-haricot par rapport à la monoculture dans la rhizosphère des deux plantes même si il n'a pas présenté de différence significative chez le haricot. En outre, la teneur en nitrate et en ammonium ont été améliorée dans les rhizosphères de l'association par rapport à la monoculture, surtout par rapport à la monoculture du haricot au stade de floraison du haricot. Concernant la disponibilité de P, l'association de culture a présenté une teneur en P résine significativement élevé par rapport à la monoculture du haricot et du riz en raison probablement de l'augmentation du taux de fixation symbiotique d'azote par le haricot en association, qui a un effet positif sur la disponibilité de P.

En second lieu, la biodisponibilité de l'azote a augmenté avec l'apport de N chez les deux plantes et la teneur en nitrate dans les rhizosphères des plantes au moment de la floraison du haricot n'a pas été influencée par l'apport de N du fait des prélèvements importants de nitrate par les plantes. Par contre, la teneur en ammonium a augmenté avec la dose croissante de N

due certainement à une ammonification lente. En outre, ces apports croissants de N ont aussi induit une augmentation significative de la teneur en P résine des sols dans la rhizosphère du haricot, expliqué par les effets de la nutrition azotée sur les efflux de protons/hydroxyle au niveau de la rhizosphère. La fertilisation azotée a aussi augmenté le P biodisponible par la plante. Une augmentation de la disponibilité de P par la fertilisation azotée dans le sol a permis une amélioration de l'acquisition de P par la plante.

En troisième lieu, concernant l'apport croissant de P, il n'a pas eu d'effets sur la teneur en nitrate des sols rhizosphériques des deux plantes. Ensuite, l'apport de P n'a pas aussi eu d'influence significative sur la teneur en ammonium de la rhizosphère du riz, ce qui n'est pas le cas chez le haricot, surtout à dose élevée. La dose élevée du P a pour effet de stimuler la fixation symbiotique chez le haricot, induisant une plus d'acquisition de N<sub>2</sub> par rapport à l'ammonium du sol. Par contre, la dose croissante de P a favorisé l'augmentation significative du prélèvement de l'azote chez les deux plantes. Enfin le P biodisponibilité et le P disponible (P résine) au stade floraison du haricot dans les rhizosphères de deux plantes ont augmenté avec la dose croissante de P du fait que la fertilisation minérale phosphatée est essentielle dans la mise à disponibilité du P dans le sol mais aussi la mise à la disposition de celui-ci par les plantes et les microflores.

Ainsi, la première hypothèse émise qui stipulait que l'association de la céréale avec la légumineuse permettrait d'obtenir le maximum de biomasse par rapport à la monoculture n'est que partiellement validée. La seconde hypothèse rapportant que l'association de la céréale avec la légumineuse permettrait une meilleure disponibilité en azote et phosphore par rapport à la monoculture est validée. Et la troisième hypothèse qui stipulait que les disponibilités des ressources trophiques (N et P) augmenteraient avec l'augmentation des doses d'apport de N et de P est validée.

Cela nous pousse donc à élargir encore nos champs de recherche à de nombreuses perspectives. L'une d'elles est la mise en place d'un essai qui pourrait éclaircir la dynamique de la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses en utilisant la méthode isotopique (<sup>15</sup>N). La deuxième perspective qui pourra être avancé serait la mise en place d'un essai avec un large panel de la dose de fertilisant, c'est-à-dire au-delà de 60 kg ha<sup>-1</sup> afin de trouver la dose optimale pour un effet maximale des paramètres étudiés, du fait que les doses employées ne le permettent pas encore.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Andriamananjara A., 2011. Système de culture à rotation Voandzou-riz pluvial (*Oryza sativa*) sur les hautes terres de Madagascar. Rôle du Voandzou (*Vigna subterranea*) sur la biodisponibilité du phosphore dans les Ferralsols. Thèse de Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques. École Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo. 185 p.

Andriamaniraka J.H., 2009. Etude et modélisation de la biodisponibilité du phosphore dans un sol cultivé de Madagascar en fonction des pratiques culturales. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo. 186 p.

Anon, 2006. Rhizosphère et Symbiose, Biodisponibilité des éléments minéraux. Dossier scientifique. Perspectives INRA-Agro (Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier (AGRO.M), Institut National de la Recherche Agronomique. 15 p.

Barbosa Filho M.P. et Yamada T., 2002. Upland rice production in Brazil. Better Crops International. 16, 43-46.

Bertrand R. et Gigou J., 2000. La fertilité des sols tropicaux. 105-322p

Betencourt E., Cordier F., Justes E., Hinsinger P., 2010. Enhanced P availability in the rhizosphere of cereal-legume intercrops : evidence from a long term P fertilizer trial. 22p.

Betencourt E., 2012. Interactions entre céréale et légumineuse en association et acquisition de phosphore du sol: processus rhizosphériques sous-jacents. Thèse de doctorat en Ecosystèmes. Centre International d'Etudes Supérieures en Sciences Agronomiques, Montpellier SupAgro. 244 p.

Boyer J., 1982. Les sols ferrallitiques. Initiation-documentation techniques, 52 : 180-200

Cahill James F. Jr., 1999. Fertilization effects on interactions between above- and belowground competition in an old field, Ecology, 80(2) : 466-480

Cahill James F. Jr., 2002. Interactions between root and shoot competition vary among species, OIKOS, 99 : 101–112.

Cheab A., 2006. Effets de la limitation croisée en phosphore et en lumière sur la croissance et la morphogenèse aérienne et racinaire de jeunes plants de pin maritime. Thèse de Doctorat. Spécialité : Biogéochimie de l'Environnement, Université Bordeaux 1. 177 p + Annexes.

Cheema Z.A. and Ahmad A., 2000. Effects of urea on the nitrogen fixing capacity and growth of grain legumes. Agricultural. Biology, 2(4) : 388-394.

Dabin B., 1988. Phosphorus deficiency in tropical soils as a constraint on agricultural output. In: Soil-related constraints to food production in the tropics. ORSTOM, 217-232.

Danso S.K.A., Eskew D.L., 1984. Comment renforcer la fixation biologique de l'azote. Bulletin AIEA, 26(2) : 29-33.

Drevon, J.J., Alkama N., Amenc L., Lopez A., Pernot C., Rodino P., Zaman-Alla M., 2008. Participatory assessment of N and P biogeochemical cycles in legume rhizosphere for contribution to sustainability in agriculture

Dubus I., 1997. La rétention du phosphore dans les sols: principe d'étude, modélisation, mécanismes et compartiments du sol impliqués. ORSTOM, Centre Nouméa, Nouvelle Calédonie, Documents scientifiques et techniques III3, 74 p.

Edou-Minko A., Emane Mba S., Eba F., 2003. L'état de fertilité du complexe absorbant des sols du plateau manganésifère d'Okouma (Gabon). Rev. CAMES - Série A , 02 : 15-24.

Eghball B., Power J.F., Gilley J.E., Doran J.W. 1997. Nutrient, carbon, and mass loss of beef cattle feedlot manure during composting. 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. 4 p.

Fanjaniaina M., 2009. Effet du Guano et du Triple superphosphate sur le rendement du riz pluvial et sur la phytodisponibilité du phosphore du sol. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur Agronome. Ecole Supérieure des Sciences Agronomique, Département Agriculture. 82 p.

Fardeau, J.C. 1992. La fertilité des sols et son entretien. Agriculture-Environnement-Qualité. Fertilité des sols. 51-73.

FOFIFA et USAID, 1993. Légumineuses à graine de Madagascar pour l'exportation. Edition 1993.

FOFIFA, 2006. Fiche technique FOFIFA 172. Laharana ao @ tahirim-pirenena: 4370.

Frossard E., Julien P., Neyroud J.A., Sinaj S., 2004. Le phosphore dans les sols. État de la situation en Suisse. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne, Cahier de l'environnement 368. 180 p.

Harmsen, J. 2007. Measuring bioavailability: From a scientific approach to standard methods. Journal of Environmental Quality 36:1420-1428.

Harper, J.E., 1994. Nitrogen metabolism in "Physiology and determination of crop yield". 285-302.

Haynes R.J. et Mokolobate M.S., 2001. Amelioration of 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 : 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 de fin d'études en vue d'obtenir le Diplôme d'Ingénieur Agronome de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques. Spécialisation Agriculture. 87 p.

Henintsoa M., 2013. Disponibilité et dynamique du carbone, de l'azote, et du phosphore sous association culturale 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 ». Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'études approfondies, Foresterie-Développement-Environnement. 59p

Herridge D., Peoples M., Boddey R., 2008. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant Soil*, 311 : 1-18

Hinsinger P., 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. Kluwer Academic Publishers, *Plant and Soil*, 237 : 173-195.

Hinsinger P., Betencourt E., Bernard L., Brauman A., Plassard C., Shen J., Tang, X., Zhang F., 2011. P for two sharing a scarce resource soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species. *Plant Physiology*, 156 :1078-1086.

INSTAT 2012. Disponible en ligne sur: [http://www.instat.mg/index.php?option=com\\_content&view=article&id=33&Itemid=56](http://www.instat.mg/index.php?option=com_content&view=article&id=33&Itemid=56).

Iyamuremye F., Dick R.P., Baham J., 1996. Organic amendments and phosphorus dynamics. Phosphorus chemistry and sorption,. *Soil Science*. 161 : 426-435.

Jaillard B., 2001. Flux de protons dans la rhizosphère et acidification des sols. Colloque sur acidification des sols, INRA Versailles.

Jemo M., Abaidoo R.C., Nolte C., Tchienkoua M., Sanginga N., Horst W.J., 2006. Phosphorus benefits from grain-legume crops to subsequent maize grown on acid soils of southern Cameroon. *Plant Soil*, 284 : 385-397.

Joanne T., 2008. Où est donc passé tout le phosphore. Centre d'agriculture biologique, 1-2.

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

Le Gall A.C., 2004. Effets des dépôts atmosphériques de soufre et de l'azote sur les sols et les eaux douces en France. Unité de modélisation et analyse économique pour la gestion des risques. Direction des risques chroniques, INERIS. 116 p.

Li L., Sun J.H., Zhang F.S., Li X.L., Yang S.C., Rengel Z., 2001. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. *Field crops research*, 71 : 123-137.

Li L., Zhang F., Li X., Christie P., Sun J, Yang S., Tang C., 2003. Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba bean. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 65 : 61-71.

Li L., Li S.M., Sun J.H., Zhou L.L., Bao X.G., Zhang H.G., Zhang F.S., 2007. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus deficient soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States*

Machado C.T.T., Furlani A.M.C., 2004. Root phosphatase activity, plant growth and phosphorus accumulation of maize genotypes. Piracicaba Brazil, *Science Agriculture* 2,.61.: 216-223.

Maep, 2004. Filières de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche et Actions du Maep. Filière de l'Agriculture, Tome 1, 106 : 2-13.

Malezieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., de Tourdonnet S., Valantin-Morison M., 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. *A review Agronomy for Sustainable Development*, 29 : 43-62

Marschner P., 1995. Mineral nutrition in higher plants. Academic Press, London.

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*, Brisbane, Australia. 52-55.

McLaughlin M.J., Alston A.M., Lartin J.K., 1996. Measurement of phosphorus in the soil microbial biomass: a modified procedure for field soils. *Soil Biology and biochemistry*, 18 : 437-443

MERIGOUT P., 2006. Étude du métabolisme de la plante en réponse à l'apport de différents fertilisants et adjuvants culturels. Influence des phytohormones sur le métabolisme azoté. Thèse en vue d'obtenir le grade de Docteur de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon. 229 p.

Morel C., 2006. Mobilité et biodisponibilité du phosphore dans les sols: mécanismes, modélisations et diagnostic. Stock et flux de phosphore dans les écosystèmes terrestres et aquatiques, et impacts environnementaux. 5-6.

Mourreaux C.L., 1973. Cours de microbiologie du sol. ORSTOM. 164 p.

Muhinda J.J.M., Nzeyimana I., Bucagu C., Culot M., 2009. Caractérisation physique, chimique et microbiologique de trois sols acides tropicaux du Rwanda sous jachères naturelles et contraintes à leurs productivités. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 13(4) : 545-558.

Ofori F., Stern W.R., 1987. Cereal-legume intercropping systems. *Advance in Agronomy*; 41: 41-90.

Pypers P., Verstraete S., Thi C.P., Merckx R., 2005. Changes in mineral nitrogen, phosphorus availability and salt-extractable aluminium following the application of green manure residues in two weathered soils of South Vietnam. *Soil Biology and Biochemistry*, 37 : 163–172.

Rabeharisoa L., 2004. Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar. Thèse de Doctorat 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'Académie Nationale, Madagascar.

Rabenantoandro Y., 2009. Etat des lieux de la Recherche-Développement sur le riz pluvial au FOFIFA depuis 1997. Actes de l'atelier national sur la recherche et le développement du riz pluvial à Madagascar. 144 p.

Rabetokotany N., 2008. Effets d'une fertilisation Phosphatée par le bat guano et des doses croissantes de TSP sur un sol ferrallitique malgache. Cas de Ferralsol « tanety » sis à Lazaina, Mémoire de DEA, Ecole supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 60 p.

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* 114.

Reddy K.R., Wang Y., DeBusk W.F., Fisher M.M., Newman S., 1998. Forms of soil phosphorus in selected hydrologic units of the Florida Everglades. *Soil Science Society of America*, 62 (4) : 1134-1147.

- 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., Barea J.M., McNeill A.M., Prigent-Combaret C., 2009a. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil*, 321 : 305–339.
- Richardson A.E., Hocking P.J., Simpson R.J., George T.S., 2009b. Plant mechanisms to optimise access to soil phosphorus. CSIRO Publishing. *Crop and Pasture Science*, 60 : 124-143.
- Rimski-Korsakov H., Gutierrez Boem J.D., Scheiner J., Equiza, Lavado R.S., 2000. Nitratos residuales en soja. Efecto de dosis y momento de fertilizacion. *Actas International Soil Conservation Organization (ISCO)*. 11°. Conferencia Internacional. Buenos Aires (II) 151 p.
- Rogolini M., 2006. Caractérisation de la réponse écophysiological du chou-fleur (*Brassica oleracea* Var. *botrytis* L.) à une carence temporaire en azote. Application à la mise en évidence de différences variétales. Thèse de docteur de l'Ecole National Supérieur Agronomiques de Rennes. Mention Biologie et Agronomie. 264 p.
- Roland J.B., Smithson P.C., Hellums D.T., 1997. Building soil phosphorus capital in Africa. *American Society of Agronomy and Soil Science Society of America* , 51 : 111-149.
- Sanchez P. A., Shepherd K. D., Soule M. J., Place F. M., Buresh R. J., Izac A.M.N., Mokwunye A.U., Kwesiga F.R., Ndiritu C.G., Woomer P.L., 1997. Soil Fertility replenishment in Africa: An Investment in Natural Resource Capital. *American Society of Agronomy and Soil Science Society of America*, 51 : 1-46.
- 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.
- 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.

Ségalen P., 1995. Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique: les facteurs de formation et les sols ferrallitiques en Amérique. 169 p.

Smith F.W., Mudge S.R., Rae A.L., Glassop D., 2003. Phosphate transport in plants. Kluwer Academic Publishers. Plant and Soil 248 : 71-83

Stevenson F. J., 1982. Origin and distribution of nitrogen in soil. In: Nitrogen in agricultural soils, Agronomy Monograph 22 : 1-42.

Stroia C., 2007. Etude de fonctionnement de l'écosystème prairial en conditions de nutrition N et P sublimitantes. 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.

Willey R., 1979. Intercropping-its importance and research needs. Competition and yield advantages. Field Crop Abstracts, 32 : 1-10.

Wilson JB., 1988. Shoot competition and root competition. 25 : 279 –96,

Zahran H.H., 1999. Rhizobium-legume symbiosis and Nitrogen fixation under severe conditions and in an Arid Climate. Microbiology and Molecular biology Reviews: 63 (4) : 968-989

## ANNEXES

**Annexe 1** : Doses d'apport de N et P

Apport	Forme d'apport	Dose d'apport (Kg/ha)	Dose équivalente (mg pot <sup>-1</sup> )	Quantités (g pot <sup>-1</sup> )
Azote	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	20	16,67	0,05
Phosphore	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	20	16,67	0,07
Azote	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	60	49,99	0,14
Phosphore	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	60	49,99	0,22

**Annexe 2** : Doses d'apport des macronutriments

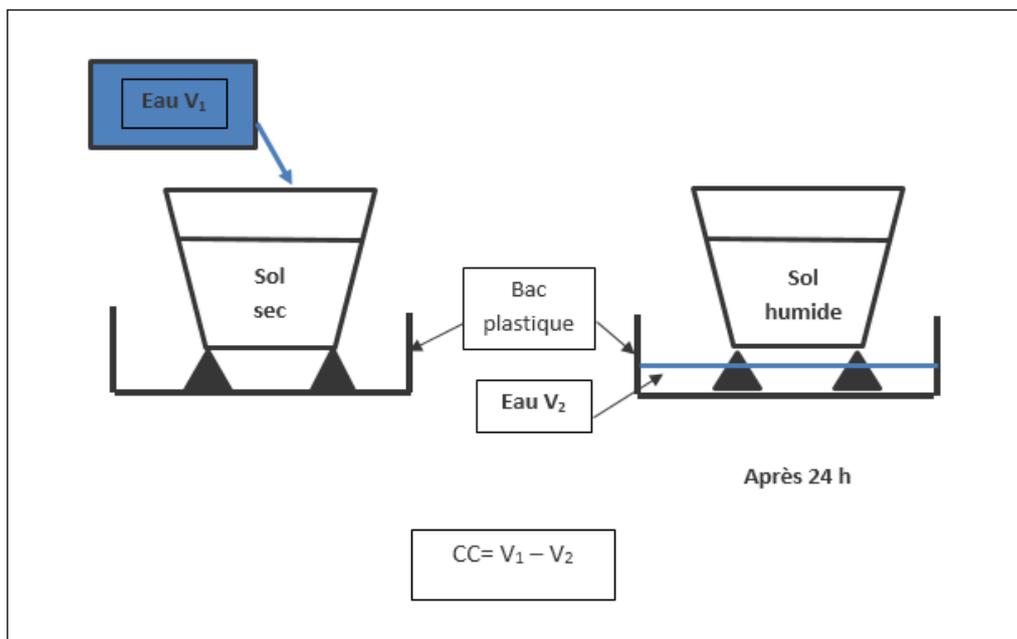
Macronutriments	Forme d'apport	Solution mère (g l <sup>-1</sup> )	Molarité	Volume à apporter (ml pot <sup>-1</sup> )
Magnésium	MgSO <sub>4</sub> , 7H <sub>2</sub> O	123,25	0,5 M	8
Calcium	CaCl <sub>2</sub>	244	2,2 M	3
Potassium	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	87	0,5 M	6

**Annexe 3** : Doses d'apport des micronutriments

Micronutriments	Forme d'apport	Solution mère (g l <sup>-1</sup> )	Volume à apporter (ml pot <sup>-1</sup> )
Bore	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	6,25	0,08
Manganèse	MnSO <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O	25	
Zinc	ZnSO <sub>4</sub> , 7H <sub>2</sub> O	6,25	
Cuivre	CuSO <sub>4</sub> , 5H <sub>2</sub> O	6,25	
Molybdène	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O	0,63	

**Annexe 4** : Méthode de calcul de la capacité au champ

Le calcul de la capacité au champ qu'on a fait n'est qu'une mesure rapproché de la capacité de rétention (adapté d'après D.Pol, TP de biologie, Bordas, 1994). Dans une locale à température ambiante (24°C), on a versé un volume  $V_1$  de 1000 ml dans un pot plastique percé contenant 2 kg de sol sec et qu'on a laissé l'eau s'infiltrer pendant 24 heure. Le principe est que l'eau infiltré va remplir les pores et les excédents d'eau vont être évacués. L'eau excédentaire  $V_2$  est recueillie par un bac plastique qu'on a mesuré dans une éprouvette graduée. La capacité de rétention s'obtient par la différence entre le volume d'eau initial et le volume recueilli. La mesure a été faite avec 3 répétitions.

**Annexe 5** : Mesure de la capacité au champ

	BAC 1	BAC 2	BAC 3
<b>V1 (ml)</b>	1000	1000	1000
<b>V2 (ml)</b>	255	254	256
<b>CC (ml)</b>	745	746	744

**Annexe 6 : Biomasse du riz et résultats des analyses physico-chimiques des sols rhizosphériques du riz**

TRAITEMENTS	Biomasse	N-Plante (g N kg <sup>-1</sup> )	N prélevé (mg N kg <sup>-1</sup> )	P-Plante (mg P kg <sup>-1</sup> )	P prélevé (mg P kg <sup>-1</sup> )	P	P	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N kg <sup>-1</sup> )	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N kg <sup>-1</sup> )	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>
	sèche totale (g pot <sup>-1</sup> )					Résine (mg P kg <sup>-1</sup> )	Microbien (mg P kg <sup>-1</sup> )				
MONO-T0	0,31±0,04efgh	2,89±1,59f	0,45±0,15f	2,19±0,27bcd	0,34±0,06defg	1,22±0,08f	1,82±0,19ef	2,82±0,08abc	4,10±0,26bcde	5,05±0,07abc	4,58±0,05a
MONO-N20	0,62±0,57abcde	17,59±4,15ab	5,50±1,44abcd	2,18±0,63bcd	0,67±0,14abcd	1,38±0,13ef	2,76±0,16ab	3,53±0,74abc	4,19±0,06abcd	5,10±0,06c	4,61±0,05a
MONO-P20	0,59±0,06abcde	15,37±2,99abc	4,51±0,46abcd	1,84±0,16cde	0,55±0,08bcdef	1,78±0,13def	1,53±0,06ef	3,62±0,78abc	2,31±0,14h	5,00±0,06c	4,57±0,04a
MONO-N20P20	0,76±0,06abc	18,96±3,71a	7,15±1,29ab	1,68±0,21e	0,64±0,10abcde	1,74±0,11def	2,09±0,17bcde	1,67±0,19de	4,77±0,24ab	4,97±0,05c	4,57±0,04a
MONO-N20P60	0,84±0,09ab	15,40±1,45abc	6,77±0,56abc	2,12±0,30bcde	0,93±0,15a	1,82±0,08cdef	1,85±0,19def	0,97±0,29e	2,75±0,32gh	5,00±0,06bc	4,57±0,04a
MONO-N60P20	0,72±0,02abcd	17,66±3,19ab	6,38±1,21abc	2,31±0,52abc	0,84±0,20ab	1,14±0,11f	1,86±0,25cdef	7,20 ±0,15ab	4,62±0,35abc	5,14±0,09a	4,57±0,05a
MONO-N60P60	0,88±0,06a	19,59±3,24a	8,13±1,23a	2,17±0,21bcde	0,90±0,06ab	2,94±0,11ab	2,44±0,10ab	1,28±0,11e	4,41±0,42abcd	5,02±0,02abc	4,60±0,04a
ASSOC-T0	0,17±0,04h	12,21±1,54bcde	1,03±0,28ef	2,49±0,45ab	0,21±0,06g	1,96±0,11cde	1,45±0,47f	2,05±0,15cd	3,72±0,10defgh	5,00±0,04bc	4,56±0,03a
ASSOC-N20	0,23±0,05gh	11,79±1,69bcde	1,32±0,27ef	2,08±0,28bcde	0,23±0,07g	2,52±0,18abcd	1,49±0,19f	1,68±0,19de	4,18±0,15abcd	4,99±0,04c	4,57±0,02a
ASSOC-P20	0,28±0,04fgh	9,79±2,40def	1,39±0,49ef	2,31±0,41abc	0,32±0,04efg	2,44±0,11abcd	2,34±0,05abc	1,66±0,17de	3,39±0,16fgh	5,12±0,19ab	4,60±0,03a
ASSOC-N20P20	0,29±0,03fgh	13,69±9,60abcd	1,95±0,18def	1,76±0,10de	0,25±0,02fg	2,66±0,16abc	2,14±0,30bcd	2,31±0,23bcd	3,88±0,32cdef	5,02±0,06bc	4,60±0,04a
ASSOC-N20P60	0,52±0,24abc	8,67±3,20ef	2,19±0,74def	3,07±0,44a	0,75±0,19abc	3,02±0,16a	2,11±0,10bcd	10,69±0,15a	3,79±0,13cdefg	5,00±0,10bc	4,61±0,07a
ASSOC-N60P20	0,51±0,17defg	10,62±1,27cdef	2,57±0,38bcde	1,91±0,25cde	0,46±0,07cdefg	2,10±0,34bcde	2,27±0,39bcd	1,61±0,22de	3,43±0,23efgh	5,17±0,11a	4,59±0,05a
ASSOC-N60P60	0,56±0,06bcdefg	8,54±9,01ef	2,38±0,33cde	2,62±0,49ab	0,73±0,16abc	4,78±0,13a	3,33±0,16a	2,42±0,16bcd	6,58±0,36a	5,03±0,08abc	4,59±0,05a

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%.

**Annexe 7** : Biomasse du haricot et résultats des analyses physico-chimiques des sols rhizosphériques du haricot

TRAITEMENTS	Biomasse sèche totale (g pot <sup>-1</sup> )	N-Plante (g N kg <sup>-1</sup> )	N prélevé (mg N kg <sup>-1</sup> )	P-Plante (mg P kg <sup>-1</sup> )	P prélevé (mg P kg <sup>-1</sup> )	P Résine (mg P kg <sup>-1</sup> )	P Microbien (mg P kg <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N kg <sup>-1</sup> )	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N kg <sup>-1</sup> )	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>
MONO-T0	0,83±0,01h	13,19±1,68de	5,48±0,69h	2,20±0,18ef	0,91±0,07f	1,48±0,13f	1,85±0,26cde	1,73±0,45cde	2,72±0,26de	5,03±0,06bc	4,55±0,03b
MONO-N20	0,96±0,06gh	15,22±0,65abcd	7,27±0,37fgh	2,32±0,21def	1,11±0,13ef	1,68±0,13ef	1,89±0,19bcde	1,75±0,11cd	2,82±0,35de	5,02±0,05bc	4,60±0,04a
MONO-P20	1,06±0,08efgh	16,87±2,56ab	8,86±1,61fgh	2,39±0,46cdef	1,26±0,23def	2,28±0,16cde	1,52±0,12de	2,03±0,04abc	3,51±0,22cd	5,03±0,05abc	4,59±0,04ab
MONO-N20P20	1,05±0,06fgh	12,60±0,22e	6,61±0,29gh	2,23±0,22ef	1,17±0,12ef	1,96±0,11def	1,92±0,24bcd	1,80±0,07bcd	3,85±0,23abc	4,99±0,06c	4,56±0,06ab
MONO-N20P60	1,27±0,05defgh	15,72±0,25abcd	9,97±0,36efgh	2,58±0,47abcde	1,63±0,28cdef	2,64±0,11abc	2,55±0,38ab	0,97±0,18e	4,00±0,42abc	5,07±0,05abc	4,58±0,06ab
MONO-N60P20	1,58±0,14cdef	16,16±3,77ab	12,73±2,73cdef	2,09±0,28f	1,67±0,35cdef	1,62±0,16ef	1,63±0,18cde	1,56±0,56de	1,78±0,23e	5,03±0,04abc	4,56±0,03b
MONO-N60P60	1,61±0,10bcdef	15,74±1,52abc	12,64±0,68cdef	2,66±0,63abcd	2,13±0,46bcd	3,14±0,17ab	1,83±0,28cde	1,74±0,34cde	2,99±0,19de	4,99±0,04bc	4,57±0,05ab
ASSOC-T0	1,50±0,04cdefg	14,97±2,26abcde	11,20±1,63defg	2,55±0,13bcde	1,91±0,10cde	1,96±0,11def	1,45±0,47f	2,05±0,15abc	3,72 ±0,10defgh	5,00±0,04bc	4,56±0,03ab
ASSOC-N20	2,03±0,19abc	16,36±1,83ab	16,55±1,74abcd	2,34±0,16def	2,39±0,31abc	2,52±0,18bcd	1,49±0,19f	1,68±0,19cde	4,18±0,15abcd	4,99±0,04c	4,57±0,02ab
ASSOC-P20	1,74±0,39bcde	14,99±2,28abcde	12,76±1,48bcdef	2,81±0,28abc	2,43±0,46abc	2,44 ±0,11bcd	2,34±0,05abc	1,66±0,17cde	3,39±0,16fgh	5,12±0,19bc	4,60±0,03a
ASSOC-N20P20	1,95±0,16abcd	14,62±0,46abcde	14,25±1,30abcde	2,54±0,51bcdef	2,48±0,20abc	2,66±0,15abc	2,14±0,30bcd	2,31±0,23ab	3,88±0,32cdef	5,02±0,06bc	4,60±0,04a
ASSOC-N20P60	2,37±0,17ab	14,35±0,38bcde	17,00±1,33abc	3,32±0,16a	3,92±0,18ab	3,02±0,16ab	2,11±0,10bcd	10,69±0,15a	3,79±0,13cdefg	5,00±0,11bc	4,61±0,08a
ASSOC-N60P20	2,25±0,15ab	19,40±4,09a	21,68±4,34a	2,26±0,19def	2,54±0,19abc	2,10±0,34cdef	2,27±0,39bcd	1,61±0,22cde	3,43±0,23efgh	5,17±0,12a	4,59±0,05ab
ASSOC-N60P60	2,99±0,22a	13,76±1,02cde	20,57±2,22ab	2,93±0,31ab	4,35±0,20a	4,78±0,13a	3,33±0,16a	2,42±0,16a	6,58±0,36a	5,03±0,09abc	4,59±0,05ab

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%.

**Annexe 8** : p-value sur la corrélation entre les apports de P, N et les paramètres étudiés pour le riz

Variables	P	N	Biomasse sèche	N prélevé	P prélevé	P Résine	P Microbien	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>
P	<b>0</b>										
N	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0</b>									
Biomasse sèche	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0</b>								
N prélevé	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0</b>							
P prélevé	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0</b>						
P Résine	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0,002</b>	0,549	0,093	0,436	<b>0</b>					
P Microbien	<b>0,001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0,032</b>	0,292	<b>0,004</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0</b>				
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,107	0,632	0,613	0,740	<b>0,032</b>	0,823	0,722	<b>0</b>			
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,146	<b>&lt; 0,0001</b>	0,696	0,999	0,273	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	0,767	<b>0</b>		
pH <sub>eau</sub>	0,285	<b>0,042</b>	0,926	0,865	0,864	0,248	0,380	0,683	0,846	<b>0</b>	
pH <sub>KCl</sub>	0,414	0,454	0,649	0,998	0,383	0,474	0,077	0,414	0,873	0,273	<b>0</b>

**Annexe 9** : p-value sur la corrélation entre les apports de P, N et les paramètres étudiés pour le haricot

Variables	P	N	Biomasse totale	N prélevé	P prélevé	P Résine	P Microbien	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>
P	<b>0</b>										
N	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0</b>									
Biomasse totale	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0</b>								
N prélevé	<b>0,003</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0</b>							
P prélevé	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0,001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0</b>						
P Résine	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0,001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0</b>					
P Microbien	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0,021</b>	<b>0,001</b>	0,084	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0</b>				
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0,001</b>	0,582	<b>0,001</b>	<b>0,025</b>	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0,038</b>	0,547	<b>0</b>			
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<b>0,001</b>	0,400	<b>&lt; 0,0001</b>	0,341	<b>0</b>						
pH <sub>eau</sub>	1,000	0,435	0,530	<b>0,031</b>	0,711	0,628	0,726	0,325	0,806	<b>0</b>	
pH <sub>KCl</sub>	0,310	0,995	0,161	0,290	0,077	0,317	0,529	0,157	0,341	0,325	<b>0</b>

**Annexe 10** : Matrice de corrélation de Pearson entre les apports de P, N et les paramètres étudiés pour le riz

Variables	P	N	Biomasse sèche	N prélevé	P prélevé	P Résine	P Microbien	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>
P	<b>1</b>										
N	<b>0,470</b>	<b>1</b>									
Biomasse sèche	<b>0,571</b>	<b>0,468</b>	<b>1</b>								
N prélevé	<b>0,373</b>	<b>0,394</b>	<b>0,888</b>	<b>1</b>							
P prélevé	<b>0,677</b>	<b>0,507</b>	<b>0,885</b>	<b>0,739</b>	<b>1</b>						
P Résine	<b>0,605</b>	<b>0,370</b>	-0,073	-0,202	0,095	<b>1</b>					
P Microbien	<b>0,402</b>	<b>0,484</b>	<b>0,257</b>	0,128	<b>0,336</b>	<b>0,545</b>	<b>1</b>				
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,194	0,058	0,061	-0,040	<b>0,256</b>	-0,027	-0,043	<b>1</b>			
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,175	<b>0,527</b>	0,048	0,000	0,133	<b>0,517</b>	<b>0,577</b>	0,036	<b>1</b>		
pH <sub>eau</sub>	-0,129	<b>0,244</b>	-0,011	-0,021	-0,021	-0,140	0,107	0,050	0,024	<b>1</b>	
pH <sub>KCl</sub>	0,099	0,091	0,055	0,000	0,106	0,087	0,213	0,099	0,019	0,133	<b>1</b>

**Annexe 11** : Matrice de corrélation de Pearson entre les apports de P, N et les paramètres étudiés pour le haricot

Variables	P	N	Biomasse totale	N prélevé	P prélevé	P Résine	P Microbien	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>
P	<b>1</b>										
N	<b>0,470</b>	<b>1</b>									
Biomasse totale	<b>0,456</b>	<b>0,515</b>	<b>1</b>								
N prélevé	<b>0,355</b>	<b>0,562</b>	<b>0,895</b>	<b>1</b>							
P prélevé	<b>0,565</b>	<b>0,389</b>	<b>0,933</b>	<b>0,804</b>	<b>1</b>						
P Résine	<b>0,728</b>	<b>0,398</b>	<b>0,729</b>	<b>0,576</b>	<b>0,795</b>	<b>1</b>					
P Microbien	<b>0,593</b>	<b>0,275</b>	<b>0,395</b>	0,208	<b>0,463</b>	<b>0,663</b>	<b>1</b>				
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0,389</b>	-0,067	<b>0,372</b>	<b>0,268</b>	<b>0,542</b>	<b>0,248</b>	0,073	<b>1</b>			
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<b>0,400</b>	0,102	<b>0,609</b>	<b>0,460</b>	<b>0,648</b>	<b>0,800</b>	<b>0,578</b>	0,115	<b>1</b>		
pH <sub>eau</sub>	0,000	0,095	0,076	<b>0,258</b>	0,045	-0,059	-0,043	-0,119	-0,030	<b>1</b>	
pH <sub>KCl</sub>	0,123	0,001	0,169	0,128	0,213	0,121	0,077	0,171	0,115	0,119	<b>1</b>

Les valeurs en gras sont significativement différents de 0 à un niveau de signification alpha = 0,05

**Annexe 12** : Comparaison entre monoculture et l'association de culture. Cas du riz

	MONOCULTURE	ASSOCIATION	Augmentation par rapport à la monoculture (%)	Différence significative
<b>Biomasse totale (g pot<sup>-1</sup>)</b>	0,68	0,36	-47,06%	oui
<b>N prélevé (mg N kg<sup>-1</sup>)</b>	5,56	1,83	-67,09%	oui
<b>P prélevé (mg P kg<sup>-1</sup>)</b>	1,83	0,42	-77,05%	oui
<b>P Résine (mg P kg<sup>-1</sup>)</b>	1,72	2,78	61,63%	oui
<b>P microbien (mg P kg<sup>-1</sup>)</b>	2,05	2,16	5,37%	non
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg N kg<sup>-1</sup>)</b>	3,02	3,20	5,96%	non
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg N kg<sup>-1</sup>)</b>	4,19	4,14	-1,19%	non
<b>pH<sub>eau</sub></b>	5,04	5,05	0,20%	non
<b>pH<sub>Kcl</sub></b>	4,58	4,59	0,22%	non

**Annexe 13** : Comparaison entre la monoculture et l'association de culture. Cas du haricot

	MONOCULTURE	ASSOCIATION	Augmentation par rapport à la monoculture (%)	Différence significative
<b>Biomasse totale (g pot<sup>-1</sup>)</b>	1,19	2,12	78,15%	oui
<b>N prélevé (mg N kg<sup>-1</sup>)</b>	9,08	0,69	-92,40%	oui
<b>P prélevé (mg P kg<sup>-1</sup>)</b>	1,83	0,42	-77,05%	oui
<b>P Résine (mg P kg<sup>-1</sup>)</b>	2,11	2,78	31,75%	oui
<b>P microbien (mg P kg<sup>-1</sup>)</b>	1,89	2,16	14,29%	non
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg N kg<sup>-1</sup>)</b>	1,66	3,20	92,77%	oui
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg N kg<sup>-1</sup>)</b>	3,09	4,14	33,98%	oui
<b>pH<sub>eau</sub></b>	5,03	5,05	0,40%	non
<b>pH<sub>Kcl</sub></b>	4,57	4,59	0,44%	non

**Annexe 14** : Photos prélevés lors de l'expérimentation



**Photo 2** : Arrosage des pots



**Photo 1** : Riz en monoculture



**Photo 4** : Haricot en monoculture



**Photo 3** : Association riz-haricot

**Annexe 15** : Détermination de la teneur en azote minéral du sol

Pour la détermination de la teneur en azote minéral du sol ( $\text{NH}_4^+$  et  $\text{NO}_3^-$ ), 5 g de sol frais conservé à 4°C a été agité pendant une heure avec une solution de KCl à 1 M avec un rapport sol : solution de 1 : 10 (c'est-à-dire 5 g de sol dans 50 ml de solution). L'extrait a été obtenu après filtration lente de la suspension. La détermination de l'ammonium et du nitrate utilise la réaction de Berthelot modifiée, mesurée à 660 nm avec la coloration à flux continu au Skalar.

**Annexe 16** : Détermination du phosphore microbien et du phosphore disponible du sol

En ce qui concerne le P de la biomasse microbienne, la méthode utilisée était la méthode d'extraction avec une résine échangeuse d'anions couplée avec la méthode de fumigation-extraction d'après Kouno *et al.* (1995) et McLaughlin *et al.* (1996). Pour ce faire, trois (3) solutions ont été considérées et l'équivalent de 2 g de sol sec a été ajouté dans chaque solution et agité pendant 16 heures en présence de bandes de résines (une bande de 6 cm x 2 cm ou deux bandes de 3 cm x 2 cm) échangeuses d'anions. Les trois (3) solutions utilisées sont les suivantes :

- (i) 30 ml d'eau distillée (sol non fumigé),
- (ii) 29 ml d'eau distillée + 1 ml d'héxanol (sol fumigé) et
- (iii) 29 ml d'eau distillée+ 1 ml de solution de P à 20 ppm pour corriger l'adsorption du phosphore libéré durant la fumigation-extraction.

Après 16 heures d'agitation, le P adsorbé par la résine a été désorbé dans 30 ml de solution NaCl/HCl à 0,1 M pendant 2 heures d'agitation. Le phosphore dans l'extrait de NaCl/HCl a été ensuite 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'héxanol 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 (sol non fumigé).

**Annexe 17** : Détermination du pH du sol

Dans cette étude, le  $\text{pH}_{\text{eau}}$  et le  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  ont été tous les deux mesurés. Le  $\text{pH}_{\text{eau}}$  correspond à la concentration en ion hydrogène ( $\text{H}^+$ ) de la solution du sol également appelé acidité active du sol. La détermination du  $\text{pH}_{\text{eau}}$  a été faite à partir de 5 g de sol sec tamisé à 2 mm dans lequel on a ajouté 12,5 ml d'eau distillée et qui a été agité pendant 30 min. La détermination du  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ , quant à elle, consistait à mettre en suspension 5 g de sol sec broyé à 2 mm dans 12,5

ml de solution KCl à 1 M suivi d'une agitation de 30 min. L'utilisation de solution KCl dans cette seconde méthode permet d'extraire tous les ions  $H^+$  du sol afin de déterminer l'acidité potentielle du sol.

**Annexe 18** : Détermination du C et N total du sol à l'état initial

Les teneurs en azote (N) et en carbone (C) totaux ont été déterminés sur les échantillons broyés à 0,2 mm. La détermination se fait par un microanalyseur élémentaire CHN (Carlo Erba NA 2000) après combustion par voie sèche. Il s'agit d'une méthode d'analyse de C et N par chromatographie en phase gazeuse. Des échantillons, de poids inférieur à 100mg, sont pesés au 1/10 de mg, mis dans des capsules en étain et passés dans un four (à 1050°C) en condition oxydante. Le carbone et l'azote des échantillons sont transformés respectivement en  $CO_2$  et divers oxydes d'azote réduit en azote moléculaire. Les gaz ainsi obtenus sont dosés par chromatographie en phase gazeuse. Les éléments carbonés et azote sont dosés simultanément et rapidement.

**Annexe 19** : Détermination du P total du sol à l'état initial

Tamisé et broyé à 0.2mm de diamètre, le sol est attaqué par l'acide perchlorique concentré ( $HClO_4$ ), suivi d'un dosage colorimétrique par la « méthode au bleu », le bleu de molybdène et les ions phosphates formant un complexe phosphomolibdique. La lecture se fait par spectrophotomètre à la longueur d'onde de 882 nm.

**Annexe 20** : Détermination de la teneur en N et P total des biomasses végétales

Pour la détermination de la teneur en azote total de la biomasse aérienne de la plante, le mélange sulfo-salicylique concentré à chaud minéralise l'azote des matières organiques azotées en azote ammoniacal. Les autres substances sont oxydées (C en  $CO_2$ , H en  $H_2O$ ). L'ammoniac ( $NH_3$ ) libéré est immédiatement fixé par l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) et forme du  $(NH_4)_2SO_4$ . L'ammoniac ( $NH_4$ ) a été dosé en colorimétrie automatique utilisant la réaction de Berthelot.

La teneur totale en phosphore a été déterminée après calcination des matières végétales. Le dosage des extraits de cendre a été réalisé par la méthode colorimétrique en utilisant un mélange de molybdate et de métavanadate d'ammonium.

## RÉSUMÉ

La saturation des bas-fonds et la croissance démographique ont conduit les agriculteurs à cultiver sur les « tanety ». Cependant, les sols ferrallitiques des tanety sont caractérisés par leur acidité et leur faible disponibilité en phosphore (P) due à l'adsorption des oxyhydroxydes de fer et d'aluminium présent en quantité abondante dans le sol, qui vont certainement limiter la production agricole. Face à ce problème de fertilité, les solutions proposées dans cette étude sont les apports de fertilisant et l'association avec les légumineuses dans le système de culture. Ainsi une expérimentation en serre a été menée dans le but de déterminer le système de culture intéressante d'une part et la dose des fertilisants azotés et phosphaté (N et P) efficace d'autre part pour obtenir le plus de biomasse mais aussi pour la meilleure disponibilité de N et P. Du riz et du haricot ont été cultivé en association et en monoculture sur le dispositif et trois facteurs ont été étudiés tels que (i) le système de culture (monoculture et association), (ii) les apport de N et (iii) les apport de P avec les doses de 0, 20 et 60 kg ha<sup>-1</sup>. Les résultats ont montré que chez le riz, l'association a diminué significativement la biomasse, la biodisponibilité de N et P tandis qu'un effet positif sur la biomasse, le N et P biodisponible ainsi que le N disponible ont été constatés chez le haricot. Ensuite, l'association a eu un effet significativement élevée sur le P disponible chez les deux plantes. Enfin, la dose croissante de N a eu un effet significatif sur le N biodisponible (à dose 20 kg ha<sup>-1</sup> chez le riz et 60 kg ha<sup>-1</sup> chez le haricot) et sur la teneur en ammonium des sols rhizosphériques (à doses 60 kg ha<sup>-1</sup> chez le riz et 20 kg ha<sup>-1</sup> chez le haricot). La fertilisation azotée a induit aussi à une augmentation d'assimilation de P chez les plantes ainsi que l'augmentation du P résine de la rhizosphère du haricot à dose 60 kg ha<sup>-1</sup>. L'apport de P a favorisé l'augmentation significative du prélèvement de l'azote chez les deux plantes (à dose 20 kg ha<sup>-1</sup> chez le riz et à dose 60 kg ha<sup>-1</sup> chez le haricot) ainsi que la teneur en ammonium de la rhizosphère du haricot à dose 60 kg ha<sup>-1</sup>. Par ailleurs, le prélèvement en P par les plantes ainsi que le P résine dans les rhizosphères de deux plantes ont augmenté significativement avec la dose croissante de P.

**Mots clés :** azote, phosphore, disponibilité, association de culture, ferrallitiques

## ABSTRACT

The saturation of the hollows and the demographic growth led the farmers to cultivate on the "tanety". However, ferrallitic soils of the tanety are characterized by their acidity and their low availability in phosphorus (P) due to adsorption of aluminum and iron oxyhydroxydes present in abundant quantity in the soil, which certainly will limit the agricultural production. Facing this problem of fertility, the solutions suggested in this study are the fertilizer contributions and intercropped legume in the farming system. Thus an experimentation in greenhouse was carried out with the aim of determining the interesting farming system on the one hand and the amount of fertilizers nitrogenized and phosphated (N and P) effective on the other hand to obtain the most biomass but also for the best availability of N and P of soil. Rice and common bean were cultivated in association and monoculture on the device and three factors were studied such as (i) the farming system (monoculture and association), (ii) the contribution of N and (iii) the contribution of P with the amounts of 0, 20 and 60 kg ha<sup>-1</sup>. The results showed that at rice, association significantly decreased the biomass, the plant-availability of N and P while a positive effect on the biomass, the N and P plant-available as well as the N available were noted at common bean. After, association had an effect significantly raised on P available at the two plants. Lastly, the increasing amount of N had a significant effect on the N plant- available (with amount 20 kg ha<sup>-1</sup> at rice and 60 kg ha<sup>-1</sup> at common bean) and on the ammonium content of the rhizospheric soil (with amounts 60 kg ha<sup>-1</sup> at rice and 20 kg ha<sup>-1</sup> at bean). The nitrogenized fertilization also induced with an increase in plant-availability of P as well as the increase in the P available of the rhizospheric soil of common bean with amount 60 kg ha<sup>-1</sup>. The contribution of P supported the significant increase in N plant-available at the two plants (with amount 20 kg ha<sup>-1</sup> at rice and with amount 60 kg ha<sup>-1</sup> at common bean) as well as the ammonium content of the rhizospheric soil of common bean with amount 60 kg ha<sup>-1</sup>. In addition, P plant-available as well as the P available in the rhizospheric soils of two plants increased significantly with the increasing amount of P.