



**ATHENEE SAINT JOSEPH ANTSIRABE  
(ASJA)  
Université Privée à Vocation Professionnalisante**  
\*\*\*\*\*

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER  
en**

**Filière : Sciences Agronomiques**

**Option : Production Végétale**

**Evaluation des teneurs et du stock de phosphore (P) total et de son  
potentiel de rétention sur les sols d'une petite région agricole du  
Moyen-Ouest de Madagascar**



**Soutenu par**

**RAKOTOMANGA Hajaniaina Noa Hervé, le 14 novembre 2013**

**Devant les membres de jury composé de :**

**Président : Damien RALAIVAOHITA, Agroéconomiste, Enseignant, ASJA**

**Rapporteur : Sahondra ANDRIAMALAZA, Docteur en pédologie, Enseignante, ASJA**

**Thierry BECQUER, Docteur en pédologie, Directeur de Recherche, IRD**

**Examineur : Eugène RABARY, Agronome sélectionneur, Enseignant, ASJA**

**Julie DUSSERRE, Ecophysiologiste, Chercheur, CIRAD**



## Remerciements

Avant toute chose, je loue l'Eternel Tout Puissant de m'avoir rempli de toute l'énergie nécessaire pour accomplir ce mémoire.

Ce mémoire n'aurait pu s'achever sans l'aide et la contribution de nombreuses personnes, physiques et morales, à qui j'aimerais témoigner ici ma profonde gratitude et toute ma sincère reconnaissance.

Je remercie en premier lieu l'Université Athénée Saint Joseph Antsirabe (ASJA) et tous ses membres administratifs et corps enseignants, sous la direction de son fondateur et Directeur Général **Père Mario Giuseppe CUOMO** et de son Recteur en la personne du **Professeur Laurence RALAMBORANTO**, de m'avoir fourni les nécessaires pour faire face aux nombreux défis du monde professionnel.

Mes plus vifs remerciements vont aussi à l'endroit du **Professeur Lilia RABEHARISOA**, Directeur du Laboratoire des Radiosotopes d'Antananarivo, de m'avoir accueilli dans son laboratoire afin que je puisse accomplir tous les travaux relatifs au présent mémoire.

Mes remerciements vont également à l'endroit de **Monsieur Damien RALAIVAOHITA, Agréonomiste, Enseignant à l'ASJA**, d'avoir eu l'obligeance de présider la soutenance de ce mémoire, de **Monsieur Eugène RABARY, Agronome sélectionneur, Enseignant à l'ASJA**, et de **Madame Julie DUSSERE, Ecophysiologiste, Chercheur au CIRAD**, d'avoir bien accepté de siéger parmi les membres de jury de la soutenance de ce mémoire. Je vous suis très reconnaissant d'avoir bien voulu apporter un œil critique sur le contenu et la forme de ce mémoire.

Je tiens également à présenter ma vive reconnaissance à mes deux encadreurs, **Docteur Sahondra ANDRIAMALAZA**, Pédologue, Enseignante à l'ASJA et **Docteur Thierry BECQUER**, Pédologue, Directeur de Recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), malgré leurs multiples responsabilités, d'avoir été à mon écoute, d'avoir apporté leurs aides et leurs conseils mais également leur partage d'expérience et compétence qui m'ont été précieux dans la réalisation du présent mémoire.

Un grand merci à toute l'équipe technique du laboratoire LRI, sous la responsabilité de **Madame Marie-Paule RAZAFIMANANTSOA**, de leur accueil chaleureux et convivial, de

leur partage d'expérience et de compétence sans lesquelles je n'aurai pu accomplir toutes mes analyses au sein de ce laboratoire.

Que tous mes amis stagiaires trouvent ici mes remerciements pour leur convivialité et leur amitié ainsi que de leur sympathie durant ces quelques mois de stage que nous avons passés ensemble. Je remercie tout particulièrement mes deux collègues de l'ASJA, **Nourdine et Damase**, de m'avoir prêté main forte quand j'en avais besoin.

*Last but not least*, je ne remercierai jamais assez les personnes qui m'ont soutenu moralement et financièrement, **mes parents**, et aussi particulièrement **Monsieur et Madame RAZAFINDRAKOTO Jacques**, afin que je puisse accomplir ces deux dernières années universitaires.

Toutes mes excuses à tous ceux que je n'ai pas pu citer nommément mais qui ont contribué, de près ou de loin à la réalisation du présent mémoire. Qu'ils trouvent ici toute ma vive gratitude.

RAKOTOMANGA Hajamaina Noa Hervé

## Liste des figures

Figure 1: Cycle simplifié du phosphore dans les sols agricoles .....	8
Figure 2. Distribution des espèces d'ions $P_i$ en solution selon le pH .....	11
Figure 3. Relation entre les fractions de P dans le sol .....	12
Figure 4. Sort des phosphates dans le sol suivant le pH .....	14
Figure 5 : Complexe binucléaire formé par réaction des oxydes de Fe et d'Al avec les $P_i$ .....	15
Figure 6 : Formation du complexe P-Ca .....	15
Figure 7 : Réaction de désorption des $P_i$ sorbés sur des oxydes de Fe et d'Al .....	16
Figure 8 : Variation de la disponibilité des ions $P_i$ selon le pH des sols .....	17
Figure 9: Les sols de la région de Vakinankaratra de Madagascar .....	20
Figure 10 : Carte de localisation des parcelles de prélèvement .....	21
Figure 11. Représentation schématique du carré de prélèvement .....	22
Figure 12 : Prélèvement au cylindre des échantillons pour la détermination de $D_a$ .....	22
Figure 13: Prélèvement des sols au carottier .....	23
Figure 14 : Préparation des échantillons pour les analyses .....	23
Figure 15 : Représentation schématique de la détermination de P total après attaque avec $HClO_4$ .....	25
Figure 16 : Représentation schématique de l'expérimentation en « batch » .....	26
Figure 17 : Représentation schématique de la méthode de la résine échangeuses d'anions.....	27
Figure 18: Variation du pH-eau par horizon de sol .....	30
Figure 19: Variation du pH-eau par groupe de sol ferrallitique de la zone étudiée .....	30
Figure 20 : Valeurs de pH-KCl observées au niveau des deux systèmes .....	31
Figure 21: Variation du pH-KCl par horizon de sol .....	32
Figure 22: Variation du pH-KCl selon les groupes de sol .....	32
Figure 23: Variation du $\Delta pH$ selon les deux modes de gestion de sol .....	33
Figure 24: Valeurs de $\Delta pH$ pour chaque groupe de sols ferrallitiques .....	33
Figure 25 : Distribution des valeurs de $\Delta pH$ par groupe de sols.....	34
Figure 26: Variation des $D_a$ pour chaque horizon sol.....	35
Figure 27: Variation des compacités des sols de chaque groupe.....	35
Figure 28 : Stock de P pour chaque groupe de sols.....	36
Figure 29: Concentration de P à l'équilibre pour chaque horizon de sol.....	36
Figure 30: Concentration de P à l'équilibre pour chaque horizon de sol.....	37
Figure 31 : Concentration à l'équilibre pour chaque groupe de sols.....	37
Figure 32 : Variation de P adsorbé pour les deux systèmes.....	38
Figure 33 : Variation de P adsorbé selon les horizons de sols.....	38
Figure 34 : Variation de l'adsorption de P selon les groupes de sol.....	38
Figure 35 : Distribution de P disponible pour les deux systèmes.....	39
Figure 36: Valeur de P disponible pour chaque horizon de sol.....	39
Figure 37 : Balance de précision .....	Annexe3
Figure 38 : Micropipettes .....	Annexe3

Figure 39 : Etuve pour la détermination de l'humidité.....	Annexe3
Figure 40 : Etuve pour séchage des matériels.....	Annexe3
Figure 41 : Agitateur va-et-vient.....	Annexe3
Figure 42 : Agitateur vortex.....	Annexe3
Figure 43 : pH-mètre.....	Annexe3
Figure 44 : Distillateur.....	Annexe3
Figure 45 : Hotte .....	Annexe3
Figure 46 : Bloc chauffant .....	Annexe3
Figure 47 : Spectrophotomètre .....	Annexe3
Figure 48 : Cuve en verre rinçable pour la lecture au bleu de Murphy et Riley .....	Annexe3
Figure 49 : Cuve jetable pour la lecture au vert de malachite .....	Annexe3

## Liste des sigles et abréviations

<b>% :</b>	pourcent
<b>°C :</b>	degré Celsius
<b>μM :</b>	micron mole
<b>Å :</b>	Angstrom
<b>Al :</b>	Aluminium
<b>Ca :</b>	Calcium
<b>CAH :</b>	Complexe Argilo-Humique
<b>cm<sup>2</sup> :</b>	centimètre carré
<b>cm<sup>3</sup> :</b>	centimètre cube
<b>cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> :</b>	centimole de cation par kilogramme
<b>Da :</b>	Densité apparente
<b>Dp :</b>	Densité particulaire
<b>Fe :</b>	Fe
<b>FTM :</b>	Foibe Taontsarintany Madagasikara
<b>g :</b>	gramme
<b>ha :</b>	hectare
<b>kg P ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> :</b>	kilogramme de Phosphore par hectare par an
<b>kg :</b>	kilogramme
<b>L :</b>	litre
<b>LRI :</b>	Laboratoire des Radio-Isotopes
<b>m<sup>2</sup> :</b>	mètre carré
<b>mg :</b>	milligramme
<b>ml :</b>	millilitre
<b>mm :</b>	millimètre
<b>mmol :</b>	millimole
<b>Mn :</b>	Manganèse
<b>Mg :</b>	Magnésium
<b>MO :</b>	Matières organiques
<b>pH :</b>	potentiel hydrogène
<b>P :</b>	Phosphore
<b>P<sub>ads</sub> :</b>	Phosphore adsorbé

<b>Pi :</b>	Phosphore inorganique
<b>Pmin :</b>	Phosphore minéral
<b>pKa :</b>	constante d'acidité
<b>Po :</b>	Phosphore organique
<b>P<sub>ret</sub> :</b>	Phosphore rémanent ou Concentration de Phosphore à l'équilibre
<b>p-value :</b>	Plus-value
<b>rpm :</b>	round per minute ou Tour Par Minute
<b>SCV :</b>	Système de culture sous Couverture Végétale
<b>SFC :</b>	sol ferrallitique concrétionné
<b>SPD :</b>	sol ferrallitique rajeuni à structure peu dégradée ;
<b>SSD :</b>	Sol ferrallitique rajeuni à structure dégradée ;
<b>ZPC :</b>	Zero Point of Charge

## **Liste des tableaux**

Tableau 1 : Récapitulatif des moyennes et plus-value des différents paramètres .....	29
Tableau 2 : Matrice de corrélation de Pearson .....	40
Tableau 3 : Classification de la fertilité phosphatée des sols selon la valeur de P disponible .....	47
Tableau 4 : Liste des parcelles de prélèvement .....	Annexe 1
Tableau 5 : Résultats des analyses effectuées au laboratoire .....	Annexe 1

## **Liste des annexes**

Annexe 1 : Liste des parcelles de prélèvement .....	i
Annexe 2 : Résultats des analyses effectuées au laboratoire de LRI .....	viii
Annexe 3 : Photos de quelques matériels utilisés au laboratoire .....	xviii

## Glossaires

- Adsorption :** Phénomène par lequel des solides ou des solutions retiennent à leur surface des molécules, des ions en phase gazeuse ou liquide
- Acidité potentielle :** Dans un sol, quantité d'ions échangeables d'hydrogène qui peuvent être libérés dans la solution du sol, par échange cationique
- Densité apparente :** Masse de sol sec par unité de volume brut. Le volume brut est calculé avant séchage du sol par étuvage à 105°C. Unité : g cm<sup>-3</sup>
- Densité particulaire :** Mesure de la masse par volume unitaire de particules du sol. Unité: g cm<sup>-3</sup>
- pH du sol:** Logarithme négatif de l'activité des ions H<sup>+</sup> d'un sol. Degré d'acidité ou d'alcalinité, mesuré au moyen d'une électrode en verre, d'une électrode à quinhydrone ou de tout autre électrode ou indicateur appropriée, d'un sol ayant une teneur en eau ou un rapport sol/eau déterminé
- Spéciation :** Apparition de différences génétiques, morphologiques, physiologiques ou éthologiques entre deux populations d'une même espèce, entraînant leur séparation en deux espèces distinctes.

## Résumé

Cette étude vise à évaluer la fertilité phosphatée, le stock en P et la capacité de rétention en P des sols ferrallitiques de la zone de Moyen Ouest de Madagascar. Pour ce faire, des prélèvements de sols ont été réalisés au niveau de cent parcelles paysannes conduites sous système SCV et conventionnel. Les analyses de pH-eau, pH-KCl et Da ont été effectuées sur les trois horizons superficiels (0-10, 10-20 et 20-30 cm) et celles du stock total de P, P total,  $P_{ret}$ ,  $P_{ads}$  et P résine sur les deux premiers.

L'ensemble des sols étudiés ont des moyennes de 5,30 pour pH-eau, 4,37 pour pH-KCl, -0,93 pour  $\Delta pH$ , 1,18 g cm<sup>-3</sup> pour Da, 637 mg P kg<sup>-1</sup> pour P total, 729 kg P ha<sup>-1</sup> pour stock en P, 18,0 mg P L<sup>-1</sup> pour  $P_{ret}$ , 420 mg P kg<sup>-1</sup> pour  $P_{ads}$  et 2,0 mg P kg<sup>-1</sup> pour P résine. Un effet hautement significatif du SCV sur l'adsorption du P, comparativement au système conventionnel, a été observé. Il se traduit par une amélioration notable de la disponibilité du P, même si elle reste limitée. Dans les sols étudiés, cette disponibilité en P diminue d'une manière significative en profondeur. Enfin, pour les trois groupes de sols, les SFC présentent un stock et une teneur en P total les plus élevées alors qu'aucune différence de teneurs en P résine n'est pas décelée.

Cette étude a permis de révéler une très basse fertilité phosphatée des sols ferrallitiques du Moyen Ouest avec une capacité d'adsorption moyenne. L'étude de corrélation n'a pas permis de mettre en évidence un effet du pH sur la rétention et la disponibilité du P. Les variations sont donc attribuées au rôle des MO des sols.

**Mot-clés :** *Stock P,  $P_{ret}$ , P disponible, sols ferrallitiques, Moyen Ouest, Madagascar*

## Abstract

The aim of this study is to assess the P fertility, the P stock and P sorption capacity of Ferralsols of the Middle West region of Madagascar. Soils samples have been collected in hundred farmer's lands cultivated under no-tillage and conventional tillage systems. pH and bulk density (Da) have been determined for the 0-10, 10-20 and 20-30 cm layers and total P, P stock,  $P_{ret}$ ,  $P_{ads}$ , P resin for the 0-10 and 10-20 cm layers.

The means of the physico-chemical properties of the soils are: 5.30 for pH-eau, 4.37 for pH-KCl, -0.93 for  $\Delta pH$ ,  $1.18 \text{ g cm}^{-3}$  for Da,  $637 \text{ mg P kg}^{-1}$  for total P,  $729 \text{ kg P ha}^{-1}$  for P stock,  $18.0 \text{ mg P L}^{-1}$  for  $P_{ret}$ ,  $420 \text{ mg P kg}^{-1}$  for  $P_{ads}$  and  $2.0 \text{ mg P kg}^{-1}$  for P resin. A significant increase of P resin content has been observed under no-tillage system compared with conventional tillage system. Comparing the three soils groups studied, it has been shown a higher total P and P stock in SFC soils than in SJPD and SJSD but no significant distinction in P resin content.

The results have shown a low P fertility of these soils without significant pH effect on P sorption by the Ferralsols of the Middle West region of Madagascar. The variability can be assigned to the effects of organic matter.

**Key words:** *P stock,  $P_{ret}$ , P available, Ferralsols, Middle West, Madagascar*

# Table des matières

REMERCIEMENTS	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	
LISTE DES TABLEAUX ET DES ANNEXES	
GLOSSAIRE	
RESUME/ABSTRACT	
INTRODUCTION .....	1
<b>PREMIERE PARTIE: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
Chapitre 1. LES SOLS FERRALLITIQUES .....	3
1.1. Définition et caractéristiques .....	3
1.2. Répartition des sols ferrallitiques.....	3
1.3. Constituants des sols ferrallitiques .....	3
1.3.1. <i>Fraction minérale</i> .....	3
1.3.2. <i>Fraction organique des sols ferrallitiques</i> .....	4
1.4. Propriétés physico-chimiques des sols ferrallitiques .....	5
1.4.1. <i>La capacité d'échange cationique (CEC)</i> .....	5
1.4.2. <i>Capacité d'échange anionique (CEA)</i> .....	5
1.4.3. <i>Somme des cations échangeables (S) et taux de saturation (V)</i> .....	6
1.4.4. <i>Acidité des sols ferrallitiques</i> .....	6
1.4.5. <i>Charge électrique de surface des sols ferrallitiques</i> .....	7
Chapitre 2. CYCLE BIOGEOCHIMIQUE DU P DANS LES ECOSYSTEMES CULTIVES .....	8
2.1. Présentation générale .....	8
2.1.1. <i>Les entrées dans le cycle du P d'une parcelle cultivée</i> .....	8
2.1.2. <i>La sortie de P hors de la parcelle</i> .....	8
2.2. Stock du P et sa répartition dans le sol .....	9
2.3. Spéciation du P dans les sols .....	9
2.3.1. <i>Le P inorganique</i> .....	9
2.3.2. <i>Le P organique (Po)</i> .....	11
2.3.3. <i>P labile – P non labile</i> .....	12
Chapitre 3. RETENTION ET PHYTODISPONIBILITE DU P EN SOL FERRALLITIQUE .....	13
3.1. Rétention du P dans les sols ferrallitiques .....	13
3.1.1. <i>Les compartiments impliqués</i> .....	13
3.1.2. <i>Influence du pH des sols</i> .....	13
3.1.3. <i>Influence de la matière organique des sols</i> .....	14
3.1.4. <i>Les réactions chimiques impliquées dans la rétention du P</i> .....	14
3.2. Phytodisponibilité du P des sols .....	17
3.2.1. <i>Part de P phytodisponible dans les sols</i> .....	17
3.2.2. <i>Evaluation du P phytodisponible</i> .....	17
<b>DEUXIEME PARTIE: MATERIELS ET METHODE</b>	
Chapitre 1. ZONE D'ETUDES ET SOLS ETUDIES.....	19
1.1. Zone d'études .....	19
1.1.1. <i>Climat, végétation et relief de la zone de Betafo</i> .....	19
1.1.2. <i>Les sols ferrallitiques de la zone de Betafo</i> .....	19
1.1.3. <i>Sols étudiés</i> .....	20
Chapitre 2. MATERIELS ET METHODE .....	22
2.1. Prélèvement et préparation des échantillons.....	22

2.1.1.	<i>Prélèvement des sols</i> .....	22
2.1.2.	<i>Préparation des échantillons</i> .....	23
2.2.	Détermination des propriétés physico-chimiques des sols .....	23
2.2.1.	<i>Densités apparentes et humidité à 105°C</i> .....	23
2.2.2.	<i>pH-eau et pH-KCl</i> .....	24
2.3.	Les différentes études au laboratoire et les méthodes utilisées .....	24
2.3.1.	<i>Détermination du P total et du stock de P dans les sols</i> .....	24
2.3.2.	<i>Caractérisation de la capacité de rétention en P des différents sols</i> .....	25
2.3.3.	<i>Détermination de P disponible</i> .....	26
2.3.4.	<i>Principe du dosage colorimétrique du P dans le sol</i> .....	27
2.4.	Présentation et analyse statistique des résultats .....	28
<b>TROISIEME PARTIE: RESULTATS, INTERPRETATIONS ET DISCUSSIONS</b>		
Chapitre 1.	RESULTATS ET INTERPRETATIONS .....	29
1.1.	Résultats des analyses au laboratoire .....	29
1.2.	Acidité des sols .....	30
1.2.1.	<i>Acidité actuelle : pH-eau</i> .....	30
1.2.2.	<i>Acidité potentielle : pH-KCl</i> .....	31
1.2.3.	<i>Ecart entre les deux pH : <math>\Delta pH</math></i> .....	32
1.3.	Teneurs et formes du Phosphore .....	33
1.3.1.	<i>Teneur en P total, densité apparente et stock en P des sols</i> .....	33
1.3.2.	<i>Potentiel de rétention en P</i> .....	36
1.3.3.	<i>Teneur en P disponible</i> .....	39
1.4.	Corrélation entre les différents paramètres étudiés .....	40
Chapitre 2.	DISCUSSIONS .....	42
2.1.	Densité apparente, P total et stock en P des sols étudiés .....	42
2.1.1.	<i>Densité apparente</i> .....	42
2.1.2.	<i>P total et stock en P des sols étudiés</i> .....	43
2.2.	Acidité des sols, Pret et P disponible .....	44
2.2.1.	<i>Acidité des sols</i> .....	44
2.2.2.	<i>P rémanent (Pret) et P disponible (P résine)</i> .....	45
2.3.	Validation des hypothèses .....	48
2.3.1.	<i>Hypothèse 1 : « La fertilité phosphatée des sols ferrallitiques du Moyen Ouest de Madagascar est proche de celle des autres sols ferrallitiques d'autres zones de l'île »</i> .....	48
2.3.2.	<i>Hypothèse 2 : « Les modes de gestion influencent l'acidité des sols ainsi que les teneurs et le comportement du P dans les sols agricoles »</i> .....	48
2.3.3.	<i>Hypothèse 3 : « Les différences de fertilité phosphatée peuvent être significatives entre les différents groupes de sols de la zone du Moyen Ouest »</i> .....	48
CONCLUSION ET PERSPECTIVE .....		50
Références bibliographiques .....		51
<b>Annexes</b>		



## INTRODUCTION

A Madagascar, les sols ferrallitiques revêtent un intérêt particulier dans l'économie agricole du fait de leur grande étendue. En effet, occupant une superficie de 274 500 km<sup>2</sup>, ce type de sol s'étend à peu près sur 46,5% de la surface totale de l'île (Razafimahatratra, 2011) et caractérise particulièrement les zones de tanety. Ceci a amené de nombreux chercheurs, pédologues, géographes et agronomes, à mener des études sur ces sols à l'échelle de l'île depuis leur formation, leur évolution, leur répartition, leurs caractérisations en vue de permettre une meilleure valorisation agricole. Citons entre autres les travaux d'Aubert (1965), Hervieu (1967), Bourgeat et Aubert (1971), parmi les nombreux travaux de pédologues qui ont permis de révéler la complexité des sols ferrallitiques malgaches, dont les caractéristiques sont variées selon les conditions climatiques et leurs positions géographiques dans l'île.

Sur le plan agronomique, la qualité d'un sol s'évalue par son aptitude à fournir aux cultures un milieu propice à leur développement en vue de permettre une production satisfaisante. De ce fait, le sol en tant que support et réserve de nutriments pour les plantes, présente une place majeure dans les problématiques de sécurisation alimentaire. Parmi les principaux éléments nécessaires à la croissance végétale, le phosphore (P) joue un rôle capital en assurant à la fois un rôle dans la structure et la physiologie des organismes, bien qu'il ne représente que 0,1 à 1% de la matière sèche végétale. Il intervient dans tous les processus essentiels de la synthèse de la matière vivante. Les résultats de multiples travaux de recherche menés au niveau des sols ferrallitiques dans le monde ont permis de considérer le P comme étant le principal facteur limitant de la productivité agricole au niveau de ces sols en relation avec la faible teneur en forme assimilable de cet élément.

Concernant les activités agraires malgaches, la ruée vers l'exploitation des zones de tanety est liée à l'impossibilité d'accroître les surfaces dédiées aux cultures vivrières dans les sols de fonds de vallée afin de nourrir une population dont le taux annuel de croissance est de 2,8% et dont 77,8% vivent de l'activité agricole (Rasambainarivo et Ranaivoarivelo, 2004). De nombreux essais agronomiques et examens pédologiques ont été menés depuis 1960 au niveau de ces zones, en particulier dans le Moyen Ouest, par divers centres de recherche dans le cadre de nombreux programmes/projets afin de vérifier leurs aptitudes culturales et d'établir des conseils de fertilisation.

Cette étude menée dans une petite région agricole du Moyen Ouest de Madagascar, à proximité de Betafo, se fixe pour objectif principal de déterminer les teneurs et les stocks de P total ainsi que son potentiel de rétention et sa disponibilité dans les sols ferrallitiques de cette

zone en fonction notamment des pratiques agronomiques et des groupes de sols ferrallitiques présents. La connaissance des teneurs et des stocks en un élément donné dans le sol permet d'orienter les actions futures pour optimiser les investissements agricoles. Cette étude est menée conjointement avec une autre activité qui consiste à quantifier les teneurs et les stocks de carbone (C) et azote (N) des sols dans cette zone en vue d'établir une cartographie des stocks de ces trois éléments. Néanmoins, la seule connaissance des stocks de P est insuffisante. Des données sur la rétention ou la disponibilité du P sont nécessaires pour une meilleure gestion de la fertilité phosphatée des sols.

Ainsi, l'étude vise à répondre à différentes questions : à quel niveau est le stock en P et la fertilité phosphatée des sols ferrallitiques du Moyen Ouest de Madagascar comparés à ceux des autres zones et pays tropicaux ; l'adoption de nouveau mode de gestion des sols par les paysans suffit-elle à améliorer la fertilité phosphatée de ces sols ; existe-t-il des différences significatives quant à la fertilité phosphatée de chaque groupe de sols ferrallitiques de la zone étudiée ?

Afin de répondre à ces questions, des hypothèses de recherche ont été émises et ont été axées sur les points essentiels suivants :

- Hypothèse 1 : « *La fertilité phosphatée des sols ferrallitiques du Moyen Ouest de Madagascar est proche de celle des autres sols ferrallitiques d'autres zones de l'île* » ;
- Hypothèse 2 : « *Les modes de gestion influencent l'acidité des sols ainsi que les teneurs et le comportement du P dans les sols agricoles* » ;
- Hypothèse 3 : « *Des différences de fertilité phosphatée peuvent être significatives entre les différents groupes de sols de la zone du Moyen Ouest* » ;

Ce mémoire est articulé en trois parties:

- Première partie** : Synthèse bibliographique sur les sols ferrallitiques, le cycle biogéochimique du P dans les sols cultivés ainsi que sur la rétention et la phytodisponibilité de cet élément dans les sols ferrallitiques;
- Deuxième partie** : Matériels et méthode : zone d'étude et méthodologie adoptée depuis les prélèvements sur le terrain jusqu'au traitement des données en passant par les analyses au laboratoire ;
- Troisième partie** : Résultats et interprétations suivis d'une discussion et perspective



**Première partie:**  
**Synthèse bibliographique**

# LES SOLS FERRALLITIQUES

## 1.1. Définition et caractéristique

Les sols ferrallitiques sont des sols profonds qui se forment dans les zones tropicales chaudes et humides (plus de 1500 à 1700 mm.an<sup>-1</sup>) suite à une altération très poussée, conduisant à une hydrolyse totale des minéraux primaires, hormis le quartz. Ils ont une faible réserve minérale et se caractérisent par une richesse en oxyhydroxydes, un coefficient  $K_i = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 2$  et un rapport limon/argile < 20% (sauf pour les sols issus de roches sédimentaires) (Bourgeat et Aubert, 1971 ; Duchaufour, 1985 ; Ségalen, 1994).

Ce sont des sols à profil ABC. Leur horizon A, de couleur vive, est généralement grumeleux. L'horizon B est de structure polyédrique ou continue, parfois grenue leur conférant une grande friabilité (Roederer, 1971 ; Ségalen 1994 ; FAO, 2001).

## 1.2. Répartition des sols ferrallitiques

Les sols ferrallitiques occupent environ  $24 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup>, soit 19 % des sols mondiaux (Rabeharisoa, 2004) et se concentrent surtout dans les zones tropicales humides. En Amérique, leur extension se fait depuis le Tropique du Cancer jusqu'à près de 30° de latitude Sud. En Afrique où ils couvrent  $4,2 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup>, soit 14-19 % de surface totale (Ségalen 1994), ils s'étendent entre 14° de latitude Nord et 20° de latitude Sud. Par contre, en Australie et en Asie, ils occupent des surfaces restreintes (Ségalen, 1994).

A Madagascar, ils occupent 274 561 km<sup>2</sup> (46,5% de la surface) et se localisent surtout sur la côte Est et les Hautes Terres (Riquier, 1966b ; Hanitra, 2012).

## 1.3. Constituants des sols ferrallitiques

### 1.3.1. Fraction minérale

#### ▪ Minéraux argileux

La kaolinite  $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$  représente plus de 90% des minéraux argileux des sols ferrallitiques. C'est une argile type 1:1, en forme de microplaquettes hexagonales de 0,1 à 0,3 μ (Ségalen, 1994), constituées par l'empilement d'une centaine de feuillets élémentaires de deux couches de tétraèdres  $\text{SiO}_4$  et d'octaèdres  $\text{Al}(\text{OH})_6$ , à équidistance stable de 7,2 Å. La liaison se fait par l'intermédiaire des  $\text{O}_2$ . Certains sommets sont occupés par des -OH et la liaison interfoliaire est assurée par des ponts  $\text{H}^+$  (Rabeharisoa, 2004 ; Soltner, 2005).

#### ▪ Les oxyhydroxydes de Fe

Ils sont issus principalement de l'altération des minéraux ferromagnésiens (biotite,

amphiboles, pyroxènes) (Dubus, 1997b ; Drouet, 2010). Dans les sols ferrallitiques, ils se présentent surtout sous formes cristallines, la goethite  $\alpha\text{-FeO.OH}$  et l'hématite  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , qui s'associent à la kaolinite pour donner la coloration vive des profils des sols : jaune à brunâtre (cas de la goethite) et rouge (cas de l'hématite) (Ségalen, 1969 ; FAO, 2001).

La cristallisation est favorisée par les alternances d'humectation et de dessiccation et la température élevée du pédoclimat (FAO, 2001 ; Razafimahatratra, 2011). Elle est contrôlée par la teneur en MO (Dubus, 1997b ; Drouet, 2010).

Les oxyhydroxydes de Fe, et d'Al, peuvent intervenir dans la formation d'agrégats et améliorer la stabilité structurale des sols (Dabin, 1985 ; Ségalen, 1994). Par contre, leurs formes mobiles peuvent parfois participer à la formation de carapaces et de cuirasses par cristallisation sous l'effet des températures élevées (Drouet, 2010).

Les sols ferrallitiques de Madagascar présentent des teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  de 4 à 12 % sur gneiss et de 18 à 26 % sur basalte (Drouet, 2010).

#### **Les oxyhydroxydes d'Al**

Ils proviennent de l'altération hydrolytique des aluminosilicates au cours de la pédogenèse. Leur teneur dans les sols ferrallitiques est généralement élevée, jusqu'à 30 % dans certains horizons concrétionnés (Drouet, 2010). Leur forme principale dans ces sols, en cas de bon drainage et de faible teneur en MO, est la gibbsite  $\text{Al(OH)}_3$ , une forme minérale microcristalline très stable, épaisse de 4,85 Å, et aux sommets occupés par des -OH (Dubus, 1997b ; Ségalen, 1994 ; Rabeharisoa, 2004).

Leur comportement et leur spéciation dans les sols dépendent surtout du pH, de la teneur en  $\text{SiO}_4$ , et de la présence de composés organiques solubles (Drouet, 2010). Des formes cationiques  $\text{Al}^{3+}$  échangeables peuvent se former par hydrolyse de  $\text{Al(OH)}_3$  à pH inférieur à 5,5 avec un accroissement rapide entre 5,4 et 4 (Thomas, 1996 ; Harter, 2007). Par ailleurs, elles peuvent se former également par hydrolyse de kaolinite. Certains travaux menés au Brésil sembleraient même montrer qu'il y ait plus d' $\text{Al}^{3+}$  échangeables en présence de  $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$  que de  $\text{Al(OH)}_3$  (Becquer, comm. perso.). Leur teneur en solution peut être de l'ordre de 10-250  $\mu\text{M}$  (Haynes et Mokolobate, 2001).

#### **1.3.2. Fraction organique des sols ferrallitiques**

Les sols ferrallitiques se caractérisent par une teneur généralement faible en MO, surtout en humus, et une faible activité microbologique due à leurs conditions acides (Boissezon, 1973 ; Moreaux, 1973 ; Rabeharisoa, 2004).

L'humus est formé principalement d'acides humiques (plus de 50% des MO totales) et d'acides fulviques, incorporés à l'horizon minéral, avec une litière très peu épaisse, sinon inexistante (Boissezon, 1973 ; Dabin, 1980). Certains sols ferrallitiques d'altitude ou développés sur roche basique sont pourvus d'humus grossier dans leur horizon supérieur (Boissezon, 1973). Sous végétation naturelle, le bilan humique peut être positif mais le défrichement et la mise en culture peuvent le rendre négatif (Riquier, 1966a).

## **1.4. Propriétés physico-chimiques des sols ferrallitiques**

### **1.4.1. La capacité d'échange cationique (CEC)**

La CEC correspond à la quantité maximale de cations pouvant être retenus sous forme échangeable (DRMAC, 1976 ; Tessier *et al.*, 1996 ; Drouet, 2010 ). Elle dépend des types et de la teneur en minéraux argileux, en oxyhydroxydes et en MO (FAO, 2001). La CEC effective mesurée au pH du sol est considérée comme représentative de la réalité dans les conditions de culture par rapport à la CEC potentielle, la plus utilisée, déterminée en milieu tamponné à pH 7 (Bilong, 1992; Pansu et Gautheyrou, 2003). Cette CEC effective s'obtient en ajoutant à la somme des cations échangeables obtenus par extraction à l'acétate d'ammonium neutre normal l'Al échangeable extrait au KCl normal (Ségalen, 1994).

La CEC potentielle des sols ferrallitiques est inférieure à 3-4  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  (FAO, 2001) ou inférieure à 5  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  (Rabeharisoa, 2004). Le rôle de la MO est capital dans la CEC de ces sols (Dabin, 1985 ; Dubus et Becquer, 2001) du fait de sa CEC potentielle élevée (en moyenne 100-200  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) (Boissezon, 1970 ; Drouet, 2010). Elle contribue à 20-70 % de la CEC des horizons de surface de nombreux sols (Ségalen, 1994).

### **1.4.2. Capacité d'échange anionique (CEA)**

L'importance de la CEA d'un sol peut être estimée par la valeur de  $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{eau}}$ . Dans les sols ferrallitiques,  $\Delta\text{pH}$  est généralement proche de -1 dû aux charges permanentes négatives liées à la kaolinite, constituant fondamental de ces sols (Ségalen, 1994) et surtout à des charges permanentes des MO. En général, la CEA représente 1-5% de la CEC (Pansu et Gautheyrou, 2003). La protonation des groupes -OH à pH faible peut augmenter la CEA des sols jusqu'à des valeurs supérieures à leur CEC. La CEA des sols ferrallitiques peut atteindre 3  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  au pH du sol avec des rapports  $\text{CEC}/\text{CEA} \leq 1$  (Becquer *et al.*, 2001 ; Pansu et Gautheyrou, 2003). L'influence de la CEA est alors plus significative (Pansu et Gautheyrou, 2003). La valeur du pH à laquelle la valeur de CEA compense celle de la CEC est appelée point de charge nulle nette d'un sol ou « point of zero net charge » (PZNC) (FAO, 2001).

### 1.4.3. Somme des cations échangeables (S) et taux de saturation (V)

Les sols ferrallitiques ont généralement une  $S < 2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  (Dabin, 1985).  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  sont les deux principaux cations échangeables.  $\text{Ca}^{2+}$  occupe 70-80 % de S suivi de loin par  $\text{Mg}^{2+}$ .  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$  sont toujours présents en quantité très faible ( $\leq 0.5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) (Ségalen 1994). Pour les sols ferrallitiques malgaches, S varie entre 0,1 à  $4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  (Hanitra, 2012).

Dans les sols,  $V (\%) = (S/\text{CEC}) * 100$  et varie de moins de 5% à plus de 95% (Ségalen, 1994). Les sols ferrallitiques dont le complexe absorbant est généralement désaturé, ont un  $V < 40\%-50\%$ , et souvent  $V < 5\%-10\%$ , valeur calculée à partir de la CEC potentielle (Riquier, 1966b; Bourgeat et Aubert, 1971).

### 1.4.4. Acidité des sols ferrallitiques

#### 1.4.4.1. Causes de l'acidité des sols ferrallitiques

##### ☞ Forte altération des minéraux primaires

Elle entraîne un appauvrissement en minéraux altérables susceptibles de réapprovisionner le stock en cations basiques, capables de jouer un rôle tampon pour le pH (Dabin, 1985 ; Tessier et al., 1996) et favorise la perte par lessivage de cations, notamment  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ , et/ou de  $\text{SiO}_4$  (Djondo, 1995).

##### ☞ La disparition des couvertures végétales et la mise en culture

Elles accélèrent la perte en cations par érosion et ruissellement causés par les fortes pluies dans les zones intertropicales ainsi que leur remplacement par des cations plus acides ( $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) (Tessier et al., 1996 ; Haynes et Mokolobate, 2001). En effet, les pertes par érosion peuvent être élevées sous culture et sur sol nu. Les résultats de Roose en 1975 en Côte d'Ivoire montrent des pertes en terre de  $30 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  sous culture (57 kg CaO et 35 kg de MgO) et plus de  $100 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  sur sol nu (140 kg CaO et 75 kg MgO) (Dabin, 1985).

##### ☞ Décomposition des MO

Les températures élevées des régions intertropicales accélèrent les réactions chimiques et stimulent la décomposition de la MO, favorisant ainsi la formation d'acides organiques et inorganiques (tel que l'acide carbonique  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) qui contribuent à entretenir une ambiance acide dans le sol (Moureaux, 1973 ; Djondo, 1995). La décomposition des résidus végétaux, surtout si ceux-ci sont pauvres en bases, libère du  $\text{CO}_2$ . L'augmentation de la quantité de  $\text{CO}_2$  dissoute dans le sol entraîne un accroissement des  $\text{H}^+$  libérés qui s'échangent avec les cations basiques, et diminue le pH (Moureaux, 1973 ; Harter, 2007). En outre, les cations basiques

peuvent être lixiviés dans le cas d'un drainage des sols.

#### **1.4.4.2. Conséquence de l'acidification**

L'acidification se traduit par des teneurs élevées en éléments toxiques tels que  $\text{Al}^{3+}$  ou  $\text{Mn}^{2+}$ , la diminution de la CEC et du V des sols et la fixation du P par les composés d'Al et de Fe (Dabin, 1985 ; Tessier et al., 1996 ; Haynes et Mokolobate, 2001).

A pH 5,5, les minéraux alumineux (kaolinite, gibbsite) réagissent avec  $\text{H}^+$  pour libérer des  $\text{Al}^{3+}$  en solution qui deviennent toxiques pour les plantes (Harter, 2007).

#### **1.4.5. Charges électriques de surface des sols ferrallitiques**

##### **1.4.5.1. Charges développées par les oxyhydroxydes de Fe et d'Al**

Les oxyhydroxydes ont une charge variable suivant le pH du milieu et qui apparaît lors de l'ionisation des groupements amphotères  $-\text{OH}$  en milieu hydraté par adsorption ou désorption de protons (Djondo, 1995; Dubus, 1997b). Du fait de leur point de charge nulle élevé, proche de 8 pour les oxydes de Fe et proche de 9 pour les oxydes d'Al, leurs charges sont toujours positives dans les sols agricoles (Houmane et al., 1986 ; FAO, 2001).

##### **1.4.5.2. Charges développées par la kaolinite**

La kaolinite présente une surface spécifique de  $15 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ , une capacité de liaison de cation de  $0,5 \mu\text{M m}^{-2}$  (Rabeharisoa, 2004) et un ZPC entre 4,6 et 4,8 (Ehlers, 2010). Elle présente une faible charge permanente (Pansu et Gautheyrou, 2003) mais surtout des charges variables en bordure du feuillet dues à la dissociation des groupes  $-\text{OH}$  et la protonation par des groupements acides à la périphérie des feuillets entraînant une augmentation de la densité des charges (-) qui croît avec le pH (FAO, 2001 ; Rabeharisoa, 2004). A un pH inférieur au ZPC, ses bordures acquièrent une charge (+) par l'absorption de protons en excès pour neutraliser les charges dues aux ions  $\text{O}^{2-}$  et  $\text{OH}^-$  (Djondo, 1995).

##### **1.4.5.3. Charges développées par les matières organiques**

Les charges développées par les composés organiques du sol sont souvent négatives et croissent avec le pH. Elles proviennent de l'ionisation des différents groupes fonctionnels (FAO, 2001 ; Drouet, 2010) portées par les substances humiques ( $-\text{OH}$  [alcoolique, phénolique],  $-\text{COOH}$ ,  $\text{C}=\text{O}$ ) et qui leur confèrent le caractère d'acides faibles (pKa de 4 à 6), capables de retenir des cations et anions par échange et complexation (Haynes et Mokolobate, 2001 ; Rabeharisoa, 2004).

# Chapitre 1. CYCLE BIOGEOCHIMIQUE DU P DANS LES ECOSYSTEMES CULTIVES

## 2.1. Présentation générale

Le cycle de P s'effectue sans composante gazeuse majeure (Pansu et Gautheyrou, 2003; Beaudin et al., 2008 ; Lamontagne, 2009) et dépend à 90% des microorganismes du sol (bactéries et champignons hétérotrophes) (Provencher, 2003 ; Ehlers, 2010). Il désigne la circulation du P dans les écosystèmes, conduite par des mécanismes et des processus variés qui assurent son passage entre le sol, la solution et la plante puis son retour au sol (figure 1) (Morel, 2002 ; Provencher, 2003 ; Rabeharisoa, 2004).

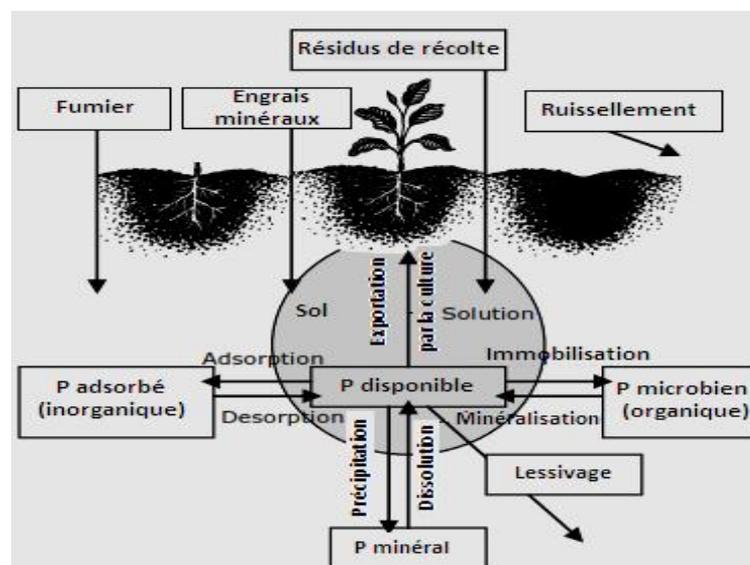


Figure 1: Cycle simplifié du phosphore dans les sols agricoles (Adapté de Hyland et al., 2005)

### 2.1.1. Les entrées dans le cycle du P d'une parcelle cultivée

Plusieurs sources ont contribué et contribuent toujours au cycle de P. L'altération des roches libère  $0,01-1 \text{ kg P ha}^{-1}\text{an}^{-1}$  parfois jusqu'à  $5 \text{ kg P ha}^{-1} \text{an}^{-1}$  (Frossard et al., 2004 ; Beaudin, 2006). Ceci explique pour une large part les teneurs élevées observées dans les sols ferrallitiques sous végétation. Les dépôts atmosphériques sont de  $0,01-2 \text{ kg P ha}^{-1} \text{an}^{-1}$  (Frossard et al., 2004 ; Beaudin, 2006). Ils sont généralement négligeables dans les régions tropicales peu polluées.

Les gisements de phosphates naturels, dont les teneurs sont comprises entre 100 et 140  $\text{g P kg}^{-1}$ , constituent les principales sources de P en agriculture (Morel, 2002).

### 2.1.2. La sortie de P hors de la parcelle

La sortie du P se fait par exportation par les récoltes (environ de  $2-4 \text{ kg P ha}^{-1}\text{an}^{-1}$  dans les sols tropicaux) (Morel, 2002), les pertes par ruissellement et par érosion (formes dissoutes

et particulaires) (Fourrie et al., 2011 ; Pierzynski et al., 2000) qui peuvent atteindre  $6,6 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  en systèmes conventionnels et  $0,13 \text{ kg P}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  en systèmes SCV (Razafindramanana, 2011), et parfois pertes par écoulement hypodermique et infiltration en profondeur (Andriamaniraka, 2009).

## **2.2. Stock du P et sa répartition dans le sol**

Le P représente environ 0,04-0,12% des éléments constitutifs de l'écorce terrestre (ISMA, 1990 ; Soltner, 2005; Messiga, 2010). Sa teneur dans les sols varie selon la nature des roches-mères (Cross et Schlesinger, 1994 ; Lamontagne, 2009). Les roches sédimentaires présentent en général une teneur en P de l'ordre de 0,3-1,5%, les roches volcaniques et cristallines de 0,1-0,3% (Soltner, 2005) alors que les granites ont une teneur moyenne de 0,1% (ISMA, 1990). Par ailleurs, le processus pédogénétique et la texture des sols influent également sur cette teneur de P dans le sol (Cross et Schlesinger, 1994 ; Lamontagne, 2009).

En systèmes agricoles, le P est stocké principalement dans les sols où sa teneur est de l'ordre de 100 à 3000-5000  $\text{mg P kg}^{-1}$  de sol (Frossard et al., 2004 ). La majeure partie de ce P est stockée dans la couche superficielle du sol (Frossard et al., 2004 ; Beaudin, 2006).

La teneur en P des sols ferrallitiques cultivés varie entre 20-3000  $\text{mg kg}^{-1}$  de P total dans les couches labourées, soit environ entre 400-2000  $\text{kg P ha}^{-1}$  si la densité apparente moyenne du sol sur 0-20 cm est de  $0,75-1,33 \text{ g cm}^{-3}$ . Elle est de 1300  $\text{mg P kg}^{-1}$  dans les sols ferrallitiques désaturés malgaches (Rabeharisoa, 2004), 436 à 2046  $\text{mg P kg}^{-1}$  dans les horizons de 20 cm des sols ferrallitiques d'Antsapanimahazo, une petite région agricole des Hautes terres de Madagascar (Rajaonarison, 2012).

Ce stock du P du sol se répartit dans divers compartiments qui interagissent sous l'effet de mécanismes physico-chimiques, biologiques et biochimiques (Messiga, 2010) de proportion très variable suivant le type de sols: P minéral ( $P_{\text{min}}$ , 40-75%), P organique ( $P_{\text{o}}$ , 20-60%) et P microbien (5%) (Morel, 2002; Soltner, 2005 ; Messiga, 2010).

## **2.3. Spéciation du P dans les sols**

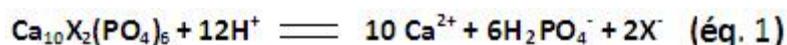
### **2.3.1. Le P inorganique**

#### **■ P inorganique de la phase solide**

Le  $P_{\text{min}}$  provient de l'altération des roches phosphatées par hydrolyse, par solubilisation ou par des réactions d'oxydoréduction (Cross et Schlesinger, 1994 ; Mathieu et Pieltain, 2003 ; NZIC, 2003). Il se présente sous forme d'ions orthophosphates ( $P_i$ )

majoritairement localisés dans les phases solides des sols où ils sont associés à des cations, à des oxydes et hydroxydes métalliques, aux argiles, au C, ou à l'intérieur d'organismes morts ou vivants et constitue généralement une part majoritaire des réserves en P du sol (Morel, 2002 ; Rabeharisoa, 2004 ; Lamontagne, 2009).

Le principal minéral phosphaté des sols est l'apatite  $\text{Ca}_{10}\text{X}_2(\text{PO}_4)_6$  dont l'altération libère des  $\text{P}_i$  dans le sol (éq. 1). X peut être OH ou F, Ca peut être substitué par Na, Mg ou des éléments traces comme Cd et  $\text{PO}_4$  peut être substitué par  $\text{CO}_3$  (Frossard et al., 2004). La substitution de certains groupements phosphates par des groupements carbonates conduit à de nombreuses apatites carbonatées (ISMA, 1990 ; Mathieu et Pieltain, 2003).



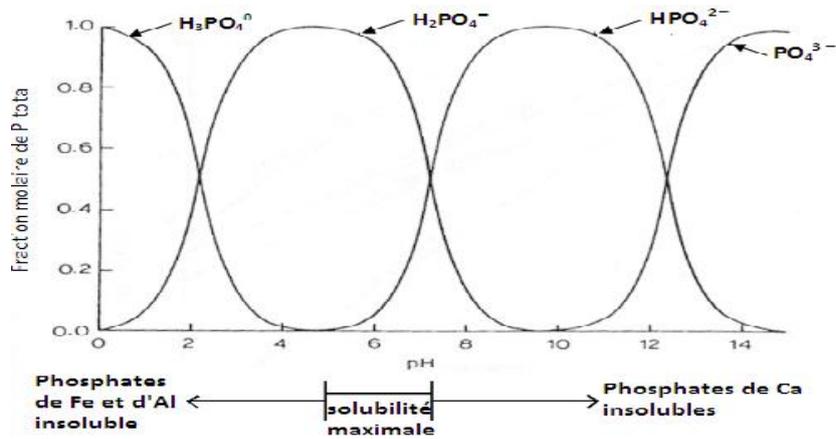
#### ▪ Le P inorganique en solution

Le P dissous représente en moyenne 0,1-4% du P du sol (Hinsinger, 2001 ; Soltner, 2005), moins de 1% (Bolan, 1991 ; Achat, 2009) et autour de 0,1 % selon Ehlers (2010). En terme de concentration, il représente environ 0,02 mg P L<sup>-1</sup> (Bolland et al., 2003; NZIC, 2003), 0,009-0,52 mg P L<sup>-1</sup> (Messiga, 2010), 0,035-1,009 mg P L<sup>-1</sup> (Morel et al., 2000 *In* Andriamaniraka, 2009), et 0,021-0,437 mg P L<sup>-1</sup> (Compaoré et al., 2001 ; Soltner, 2005) voire moins en sols ferrallitiques (de l'ordre de 0,001 mg P L<sup>-1</sup>) (Randriamanantsoa, 2013).

Il est constitué à la fois d'ions  $\text{P}_i$  adsorbés sur colloïdes en solution et du  $\text{P}_o$  dissous complétés par d'autres espèces de molécules et des colloïdes minéraux et/ou organiques contenant des groupements  $-\text{PO}_4$  (Compaoré et al., 2001 ; Rabeharisoa, 2004).

Le  $\text{P}_i$  en solution se présente sous forme de trois espèces ioniques libres ou complexées selon leur protonisation et les constantes acido-basiques de dissociation (figure 2) (Hinsinger, 2001 ; Scudiero, 2009). Les deux principales formes sont  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et  $\text{HPO}_4^{2-}$ , le  $\text{PO}_4^{3-}$  étant inexistant au pH des sols cultivés. L'équilibre entre les deux principales formes solubles  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et  $\text{HPO}_4^{2-}$  est fonction du pH. Pour un pH de 5,5-7,5, il existe dans le sol une majorité de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et une quantité croissante de  $\text{HPO}_4^{2-}$  (Soltner, 2005) ; à pH 7-7,2, leurs quantités sont équivalentes (Pansu et Gautheyrou, 2003 ; Drouet, 2010).

Selon Compaoré et al. (2001), une nutrition phosphatée adéquate des cultures ne peut être atteinte que si la teneur en  $\text{P}_i$  dissous dépasse 0,218 mg P L<sup>-1</sup>.



**Figure 2. Distribution des espèces d'ions Pi en solution selon le pH (adapté de Scudiero, 2009),**

### 2.3.2. Le P organique (Po)

#### ▪ Formes de Po dans les sols

Le Po peut être défini comme étant le P présent dans un composé organique en tant que constituant, c'est-à-dire P ayant des liaisons avec C ou H (Achat, 2009). Les formes les plus communes sont les phosphates monoesters, en particulier les phosphates d'inositol dont l'acide phytique, qui sont principalement sous la forme d'hexaphosphates (60% du Po total) (Cosgrove, 1967 ; Achat, 2009). Les acides nucléiques, les phospholipides, le glucose-1-phosphate, le glycérophosphate et les phosphoprotéines constituent moins de 2-3% du Po total. Parmi ces composés de Po dans les sols, les inositols et les phosphates de poids moléculaire élevé sont les moins dégradables (Achat, 2009; Lamontagne, 2009).

Environ 90% du Po du sol sont contenus dans l'humus à peu près dans la proportion C : N : P de 100 : 10 : 1, sous forme de humo-phosphates. Le reste est présent sous forme de MO fraîche (Soltner, 2005).

Le P microbien ne représente que quelques pourcents (soit quelques dizaines de  $kg\ ha^{-1}$  de P) dans les sols de grande culture cultivés de longue date (Morel, 2002). Dans les sols ferrallitiques, il représente 1-2% du P total du sol (Ehlers, 2010).

#### ▪ Teneur en Po des sols

La teneur de Po du sol varie selon les types de sols, les pratiques agricoles et la couverture du sol (Achat, 2009 ; Drouet, 2010 ; Ehlers, 2010). Toutefois, sa variation interannuelle demeure stable sur le long terme (Morel, 2002).

Le Po des sols ferrallitiques se présente essentiellement sous forme de phosphates monoesters (Turner, 2006). Certains sols ferrallitiques malgaches, sous culture de riz ont une teneur en Po de 22-393  $mg\ kg^{-1}$  de sol, équivalant à 7-29% de P total (Turner, 2006).

### ▪ Assimilabilité du Po des sols

Le Po participe à la nutrition des plantes après leur minéralisation par des micro-organismes du sol et par des phosphatases extracellulaires. Dans la plupart des sols tropicaux, le Po représente 30-50% du P total assimilé (Dubus, 1997b), 30-65% (Frossard et al., 2004), parfois la quasi-totalité du P potentiellement disponible dans certains sols (Drouet, 2010).

#### 2.3.3.P labile – P non labile

Une partie du P du sol, P min et Po, appelé P labile, peut être facilement échangeable et peut alimenter le pool alimentaire du sol par dissolution (Provencher, 2003 ; Soltner, 2005). Ce sont des Pi adsorbés à la surface des argiles et le CAH à l'aide d'un pont  $\text{Ca}^{2+}$  et sur des oxyhydroxydes de Fe, d'Al et des ions  $\text{Ca}^{2+}$  par chimisorption ou complexation donnant lieu à la formation de ligands (Soltner, 2005). C'est une association phosphate/support ayant des liaisons faibles dont les Pi sont facilement mobilisables et plus ou moins rapidement biodisponibles. Le support en question peut être de l'argile ou des MO (Provencher, 2003 ; Andriamaniraka, 2009 ; Fourrie et al, 2011). Le P labile constitue une réserve de P soluble pour la plante, qui est mise en solution par diffusion d'une zone de forte concentration vers la zone de prélèvement autour des rhizosphères (Van Raij, 1998) (figure 3).

L'autre partie, insolubilisée par cristallisation ou par précipitation, est difficilement échangeable (Soltner, 2005). Elle forme le P non labile qui est contenu dans les minéraux et les précipités organiques du sol, et très peu biodisponible (Provencher, 2003 ; Andriamaniraka, 2009).

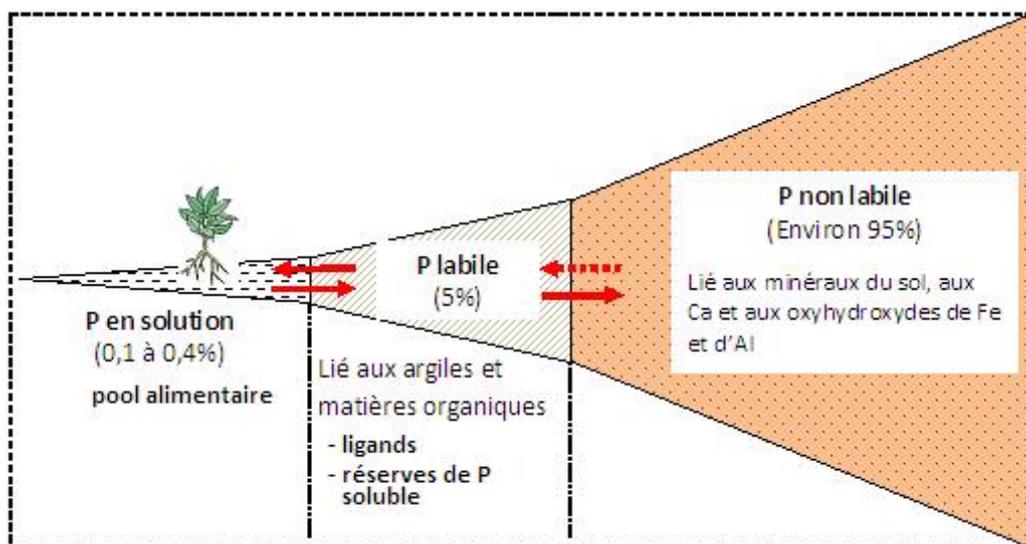


Figure 3. Relation entre les fractions de P dans le sol  
(Adapté de Mengel et Kirkby, *in* ISMA, 1990)

## Chapitre 2. RETENTION ET PHYTODISPONIBILITE DU P EN SOL FERRALLITIQUE

### 3.1. Réention du P dans les sols ferrallitiques

La réention se définit comme le passage d'une espèce chimique d'une phase liquide à une phase solide. Elle implique l'adsorption et la précipitation des  $P_i$  et les réactions d'immobilisation par les micro-organismes du sol (Bolan, 1991) mais également des phénomènes de fixation chimique (cas des molécules organiques) et de diffusion intra-agrégats (Dubus, 1997a ; Dunne et al, 2005).

#### 3.1.1. Les compartiments impliqués

La faible fertilité et la forte réention du P constituent des problèmes majeurs dans les sols ferrallitiques (Cross et Schlesinger, 1995; Ehlers, 2010). Cette forte réention du P est due à la réactivité des surfaces des oxyhydroxydes et des bordures de la kaolinite (Djondo, 1995).

Les oxyhydroxydes de Fe et d'Al sont les principaux responsables de la réention du P dans ces sols (Dubus, 1997b). En effet, leur ZPC élevé fait qu'ils ont toujours une charge positive dans la gamme de pH de tous les sols agricoles (Dubus, 1997a ; Harter, 2007).

L'intensité de réention des  $P_i$  par les oxyhydroxydes est inversement proportionnelle au pH du sol (Hinsinger, 2001 ; Achat, 2009). En outre, dans les sols, leurs formes amorphes adsorbent beaucoup plus les ions  $P_i$  que leurs formes cristallines, du fait d'une surface spécifique beaucoup plus importante (Fontes et Weed, 1996).

#### 3.1.2. Influence du pH des sols

La mobilité et l'adsorption des  $P_i$  varient inversement à la variation du pH des sols (figure 4). L'augmentation du pH diminue la charge (+) des surfaces hydroxylées, augmente la teneur en solution des ions  $OH^-$  susceptibles de rentrer en compétition avec les  $P_i$  pour les sites de fixation et augmente la solubilisation des formations P-Al amorphes. Les  $P_i$  possèdent une très grande affinité pour les sites  $-OH_2^+$ , ainsi, la diminution de la charge (+) des surfaces hydroxylées provoque leur libération en solution (Dubus, 1997b).

La diminution du pH favorise les réactions inverses. En particulier, les réactions d'hydrolyse des composés de Fe et d'Al libèrent des ions  $Al^{3+}$  et  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  qui réagissent spontanément avec les  $P_i$  en solution favorisant leur fixation (Harter, 2007). L'adsorption augmente effectivement avec la baisse du pH mais passe par un maximum entre pH 3,5 et 6 (Dubus, 1997b). Néanmoins, le composé P-Al conserve une bonne labilité à pH nettement acide, alors que le P-Fe devient très insoluble sauf en milieu réducteur (Dabin, 1985).

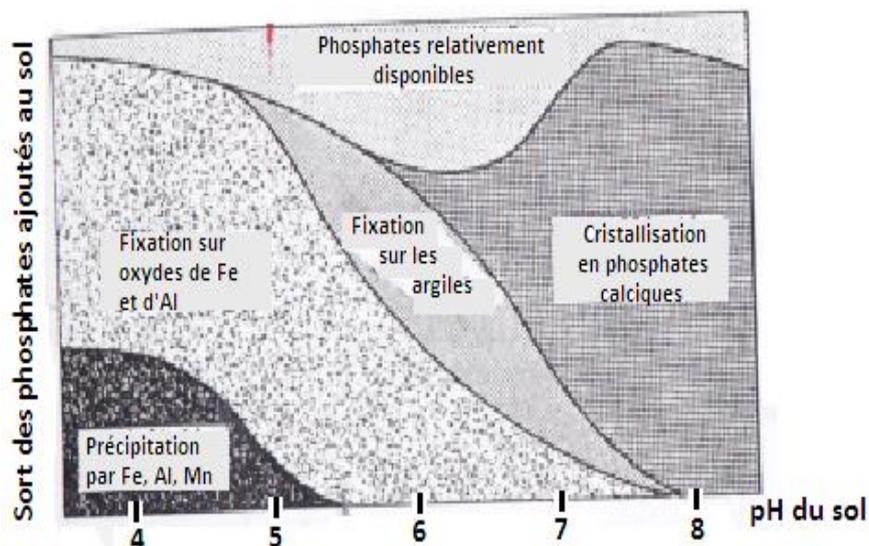


Figure 4. Sort des phosphates dans le sol suivant le pH (selon Soltner, 2005)

### 3.1.3. Influence de la matière organique des sols

Les molécules organiques augmentent la disponibilité du P dans les sols : par compétition pour les sites de fixation sur Al et Fe (Haynes et Mokolobate, 2001; Guppy et al., 2005; Soltner, 2005), ou par formation de chélates avec les oxydes de Fe et d'Al (ISMA, 1990 ; Haynes et Mokolobate, 2001 ; Lamontagne, 2009) qui augmente le pH du sol (Haynes et Mokolobate, 2001) et renforce l'activité hydrolytique (Drouet, 2010). Elles protègent les Pi assimilables contre les risques d'insolubilisation en formant le complexe humo-phosphate, facilitant ainsi leur libération en solution (Dubus, 1997b ; Haynes et Mokolobate, 2001 ; Soltner, 2005 ; Drouet, 2010). Enfin, elles favorisent l'augmentation des charges (-) dans le sol réduisant ainsi l'attraction électrostatique de P (Provencher, 2003 ; Guppy et al., 2005).

### 3.1.4. Les réactions chimiques impliquées dans la rétention du P

#### 3.1.4.1. Adsorption-désorption des Pi

##### ▪ Adsorption des Pi dans les sols

Les Pi en solution peuvent réagir facilement par adsorption avec des sorbants du sol pour former des composés stables (Bolland et al., 2003). En effet, les sorbants du sol (oxydes de Fe et d'Al, argiles...) présentent une affinité plus élevée pour les Pi que pour les autres ligands du sol ( $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{SiO}_4$ , citrate...) (Haynes et Mokolobate, 2001 ; Hinsinger, 2001). L'adsorption se fait à la surface des constituants par pont  $\text{Ca}^{2+}$  (minéraux argileux et/ou l'humus), ou par chimisorption et par complexation (oxydes de Fe et d'Al) (Soltner, 2005).

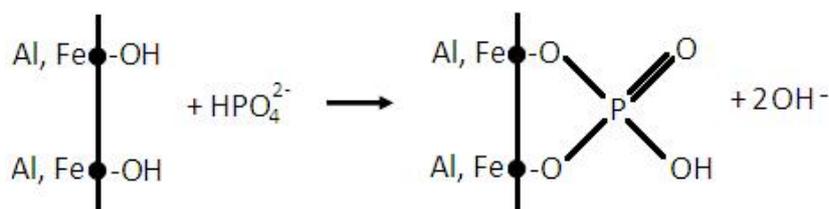
##### ▪ Adsorption spécifique et adsorption non spécifique

L'adsorption non spécifique se fait indépendamment de la structure électronique de

l'espèce adsorbée et conduit à la formation d'un complexe de sphère externe où les Pi sont liés aux sorbants en s'entourant de molécules d'eau. Par contre, l'adsorption spécifique met en jeu des liaisons électrostatiques et covalentes conduisant à la formation de complexe de sphère interne. Elle peut engendrer une plus forte proportion de Pi adsorbés sur des surfaces qu'en solution (Dubus, 1997b ; Achat, 2009 ; Boukemara, 2009).

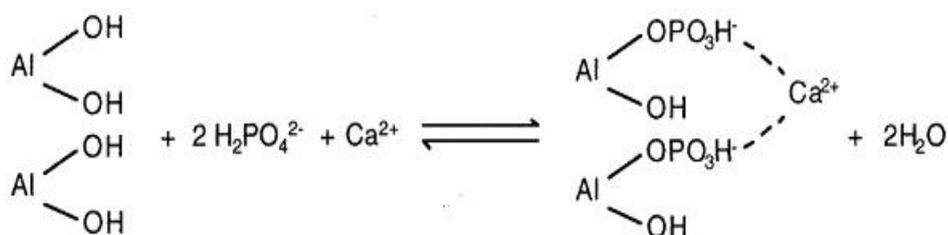
#### ▪ Composés formés par adsorption des Pi dans les sols

A pH < 4,5-5, la réaction des oxydes de Fe et d'Al et la kaolinite avec les Pi conduit à la formation de complexes binucléaires relativement stables, donc irréversibles, par remplacement de groupements -OH surtout dans le cas de la kaolinite (figure 5) (Dubus, 1997b ; Haynes et Mokolobate, 2001 ; Provencher, 2003).



**Figure 5 : Complexe binucléaire formé par réaction des oxydes de Fe et d'Al avec les Pi (Dubus, 1997b)**

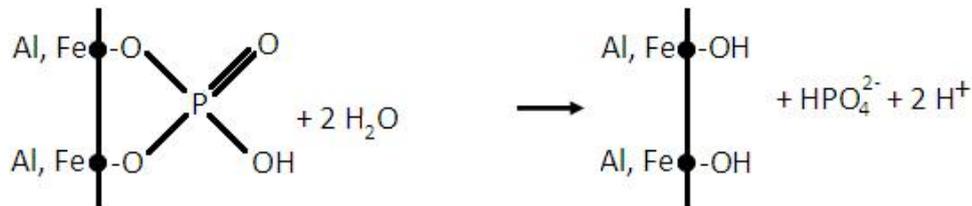
L'adsorption des Pi peut augmenter avec les concentrations en  $\text{Ca}^{2+}$  dans le sol résultant de la formation de complexes P-Ca (figure 6) à la surface des colloïdes du sol pour des pH voisins de 5-6 et à la formation de précipités P-Ca en solution pour des pH environ 7.



**Figure 6 : Formation du complexe P-Ca (Dubus, 1997b)**

#### ▪ La désorption des Pi dans les sols

La désorption (figure 7) est contrôlée par des mécanismes de diffusion à travers des agrégats et d'échange d'ions et est gouvernée par le gradient de concentration existant entre la phase solide et la solution (IRDA-CRAAQ, 2008b). Elle a lieu du fait soit de la diminution de la concentration en Pi en solution, soit d'une augmentation de la concentration en anions compétiteurs (Hinsinger, 2001).



**Figure 7 : Réaction de désorption des ions P sorbés sur des oxydes de Fe et d'Al (Dubus, 1997b)**

#### **3.1.4.2. Précipitation-dissolution**

Les Pi peuvent précipiter facilement avec les cations métalliques pour former des séries de minéraux phosphatés. A pH<4,5, leur précipitation avec les Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup> et Al<sup>3+</sup> forme des composés phosphatés tels que la strengite Fe(OH)<sub>2</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, la variscite Al(OH)<sub>2</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>. L'équilibre précipitation-dissolution dépend directement du pH, de la concentration de Pi en solution et celle des cations métalliques. Quand le pH augmente, la solubilité des P-Fe et de P-Al augmente alors que celle des P-Ca diminue sauf pour des pH > 8 (Hinsinger, 2001 ; Dunne et al., 2005).

#### **3.1.4.3. Immobilisation et minéralisation**

##### **▪ Immobilisation de P par la microflore du sol**

En relation avec son activité métabolique (Cosgrove, 1967), la microflore du sol peut immobiliser jusqu'à 20-50% du Po du sol de surface dans le cas où le P est en quantité limitée dans le sol (Moureaux, 1973 ; Cross et Schlesinger, 1994). Elle peut ainsi 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 qui sera restitué au sol à sa mort. Ainsi, il faut que les résidus végétaux apportés aient un C/P < 200 (Moureaux, 1973) et une teneur de 0,2-0,3 % en P pour leur bonne décomposition (Haynes et Mokolobate, 2001).

La carence ou l'abondance relative du P dans le sol est aussi liée à sa teneur en N. Le rapport N/P doit être compris entre 5 et 10 pour des alimentations équilibrées en P et en N (Moureaux, 1973). Guivarch (2001 *In* Andriamaniraka, 2009), a observé que l'apport de boues au rapport C/N élevé favorise l'immobilisation de N et de P par la microflore du sol.

##### **▪ Minéralisation et solubilisation du P par la microflore du sol**

La minéralisation croît avec la température, particulièrement au-dessus de 30°C (Cosgrove, 1967). Selon Cross et Schlesinger (1994), le taux de minéralisation du Po varie suivant la teneur en P total du sol. Il est environ 1 % an<sup>-1</sup> de Po dans les sols déficitaires en P. Ce taux est corrélé avec celui de N et de C (Cosgrove, 1967).

De nombreuses bactéries (*Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Bacillus mycoïdes* et *B. megaterium*) et champignons hétérotrophes (*Penicillium*, *Aspergillus*, *Trochoderma*) sont capables de minéraliser le Po sous forme de  $H_3PO_4$  en présence des sources d'énergie disponibles de C et de N (Cosgrove, 1967 ; Moureaux, 1973 ; Rabeharisoa, 2004).

A côté de cette minéralisation microbienne du Po dans le sol, les phosphates insolubles (P-Al, P-Fe ou P-Ca), sont lentement attaqués et solubilisés par les acides organiques issus des activités bactériennes (acides citrique, acide succinique, acide acétique, ...) (Moureaux, 1973).

### 3.2. Phytodisponibilité du P des sols

#### 3.2.1. Part de P phytodisponible dans les sols

Le P phytodisponible est la quantité totale de P dans le sol susceptible de passer en solution durant une période équivalente à la durée de croissance de la culture. Elle dépend à la fois de la teneur en P du sol, de sa capacité de sorption, de la source de P apportée au sol et des activités microbiennes favorisant la libération de  $P_i$  disponible (Beaudin et al., 2008).

La quantité de P phytodisponible dépend également du pH du sol. Elle est maximale à un pH proche de la neutralité puis diminue par phénomène de rétention avec  $CaCO_3$  à pH basique et avec les oxydes de Fe et d'Al à pH acide (Figure 8) (Hyland et al, 2005).

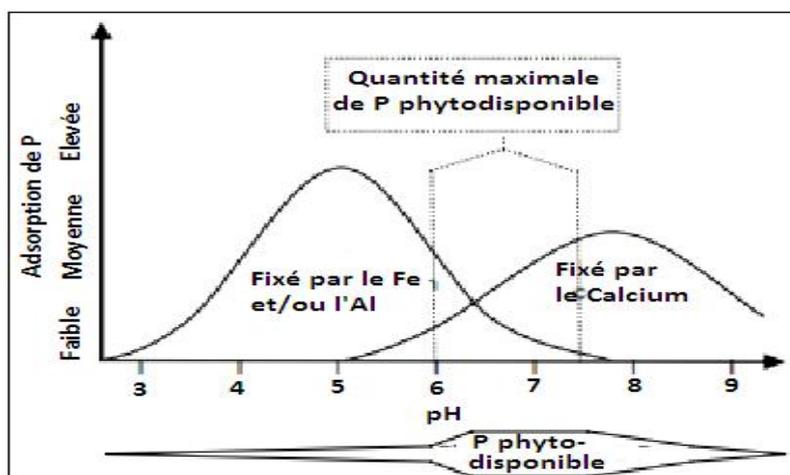


Figure 8 : Variation de la disponibilité des ions  $P_i$  selon le pH des sols (Adapté de Hyland et al, 2005)

#### 3.2.2. Evaluation du P phytodisponible

L'évaluation du P phytodisponible tient compte de trois facteurs : le facteur intensité (**I**) représente la portion du P aussitôt disponible pour les plantes dans la solution du sol ; le facteur quantité (**Q**) explicite la portion labile présente dans le sol susceptible de passer en solution et d'être prélevée par les plantes ; le facteur capacité (**C**) désigne le pouvoir tampon du sol pour les  $P_i$  (Van Raij, 1998 ; Compaoré et al, 2001 ; Beaudin, 2006).

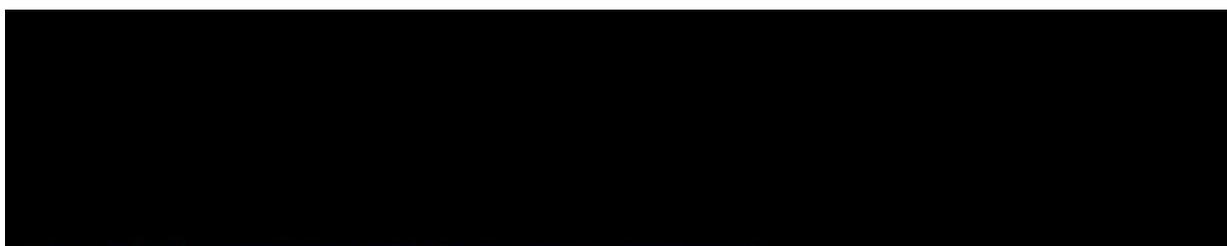
La quantité de P réellement disponible pour la culture demeure encore difficile à évaluer. Aucune méthode n'est universellement adaptée à l'ensemble des types de sols pour prédire la quantité totale de P pouvant être libérée pendant la croissance d'une culture ainsi que sa vitesse de libération (Dubus, 1997b ; IRDA-CRAAQ, 2008). Plusieurs méthodes d'extraction ont été développées dans le monde et calibrées en fonction du prélèvement des cultures et des propriétés physicochimiques des sols.

Les méthodes chimiques extraient par dissolution les différentes formes de P contenus dans le sol et font appel à divers extractants chimiques (acides forts, acides faibles, ou solutions alcalines) (Mathieu et Pieltain, 2003). La quantité **Q** extraite est par la suite corrélée avec la réponse des plantes à la fertilisation. L'intensité **I** est estimée par une extraction à l'eau ou par des sels dilués. La capacité **C** est généralement déterminée en comparant **I** par rapport à **Q** (IRDA-CRAAQ, 2008). Plusieurs méthodes chimiques peuvent être citées : Dyer (1894), Bray et Kurtz n°2 (1945), Olsen (1954), Joret-Hébert (1955), Chang et Jackson (1957), Olsen modifiée Dabin (1967) (Mathieu et Pieltain, 2003).

La méthode de cinétique d'échange isotopique, initiée par Barbier en 1971 et développée ensuite par Fardeau et Morel (Mathieu et Pieltain, 2003), fait appel aux isotopes radioactifs  $^{32}\text{PO}_4^{3-}$  et  $^{33}\text{PO}_4^{3-}$ . Elle permet d'estimer directement les trois facteurs **I**, **Q**, **C** et repose sur l'hypothèse que ces isotopes ont un comportement identique pendant les processus chimiques, physiques et biologiques. Aussi est-il possible de suivre leurs déplacements dans le système sol-eau-plante (IRDA-CRAAQ, 2008).

Les méthodes physicochimiques telles les membranes échangeuses d'ions permettent de mesurer le flux de P qui passe en solution. Elles simulent en quelque sorte le prélèvement par les racines en utilisant une résine échangeuse d'anions (Mathieu et Pieltain, 2003 ; IRDA-CRAAQ, 2008).

Certaines méthodes par extraction séquentielle, particulièrement celle de Chang et Jackson (1957), permettent de séparer des fractions P-Al, P-Fe, P-Ca et les fractions de P-occlus (Fe-Al) (Bolan, 1991 ; Pansu et Gautheyrou, 2003). Hedley *et al.* (1982) (*In* Cross et Schlesinger, 1994 ; Pansu et Gautheyrou) ont proposé une méthode permettant de séparer les formes plus ou moins labiles des formes phytodisponibles (P résine, P  $\text{NaHCO}_3\text{-CHCl}_3$ , P NaOH, P NaOH-ultrasons, P HCl et P Sol résiduel).



## **Chapitra 1. ZONE D'ETUDES ET SOLS ETUDIES**

### **1.1.Zone d'études**

Les études ont été réalisées dans quelques localités de la zone de Betafo (District de Mandoto et de Betafo), région de Vakinankaratra, zone agro-écologique du Moyen Ouest de Madagascar. Les parcelles de prélèvement ont été comprises entre 19°56' et 19°69' de latitude sud et entre 46°45' et 46°63' de longitude est (Annexe 1).

#### **1.1.1.Climat, végétation et relief de la zone de Betafo**

La zone de Betafo est située au sud du massif volcanique de l'Ankaratra dans la zone centrale de Madagascar. Elle fait partie des zones tropicales de moyenne altitude (600-1000 m) et est soumise à un climat subhumide (Hervieu, 1967 ; Raunet, 1998 *In Razafimahatratra*, 2011) avec deux saisons très marquées : un hiver austral avec peu de pluie, et un été pluvieux. La pluviométrie moyenne y est de 1000-1500 mm an<sup>-1</sup> et la saison sèche dure de 6-7 mois (avril à novembre). La T° moyenne annuelle est de 21° C.

Dans cette zone, la végétation climacique, forêt décidue sèche ne subsiste plus qu'en des surfaces restreintes. Les formations herbacées dominent (pseudo-steppe ou savanes plus ou moins arborées) avec les genres *Aristida*, *Heteropogon* et *Hyparrhenia* (Hervieu, 1967).

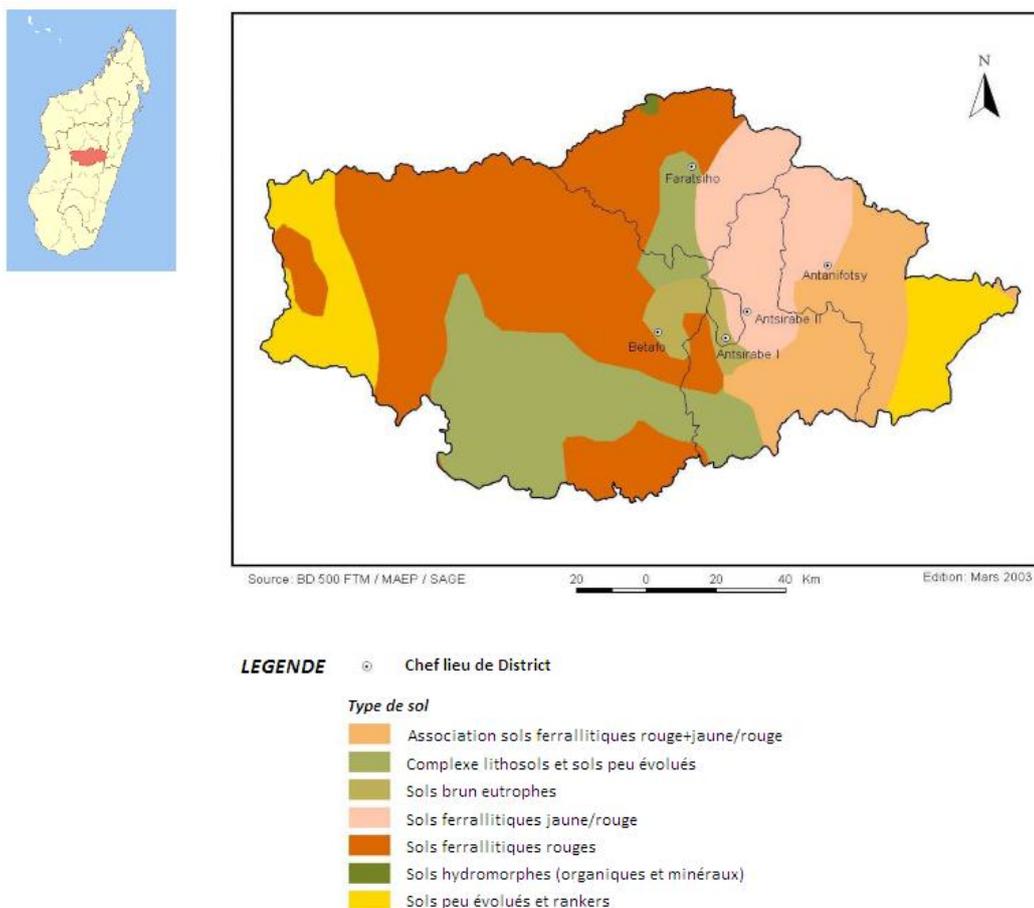
Cette zone est marquée par un relief de plateaux et collines convexes à pentes plus ou moins fortes (Rasambainarivo et Ranaivoarivelo, 2004 ; Husson et al., 2012)..

#### **1.1.2.Les sols ferrallitiques de la zone de Betafo**

Les sols ferrallitiques rouges sur roches volcaniques basiques (basaltes) hérités d'un volcanisme ancien, dominant dans cette zone (figure 9). Ce sont des sols de couleur rouge ou brun-rouge, argileux (autour de 60 % d'argiles), peu acides (pH = 5,5-6) qui se rencontrent sur les zones de tanety et les colluvions de bas de pente (Hervieu, 1961 ; Husson et al., 2012). Ils peuvent être compactés ou non (Husson et al., 2012) et sont généralement formés sous des pseudo-steppes à *Aristida* (Roederer, 1971). Ils sont moyennement désaturés (Hanitra, 2012 ; Husson et al., 2012) et moyennement allitiques (Ki = 0,9-1,5) (Bourgeat et Aubert, 1971). La végétation naturelle y est assez diversifiée, avec des plantes indicatrices d'une fertilité relativement bonne (*Ageratum spp*, *Cynodon spp*, diverses légumineuses) (Husson et al., 2012).

Leurs caractéristiques physico-chimiques varient suivant la toposéquence. Les sols ferrallitiques sur glacis se caractérisent par un horizon friable et une CEC de 2-4 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> (Hanitra, 2012). Ceux des versants de glacis et de la zone des collines disséqués ont des

réserves plus importantes mais sont sujets à l'érosion. Ce sont des sols ferrallitiques rajeunis, limoneux à faible cohésion (Hanitra, 2012).



**Figure 9: Les sols de la région de Vakinankaratra de Madagascar  
(Source : MAEP-UPDR, 2003)**

### 1.1.3. Sols étudiés

Cent (100) parcelles paysannes, réparties comme le montre la figure 10, ont fait l'objet des prélèvements de sols dans le cadre de cette étude. Quarante six (46) d'entre elles sont conduites en SCV et cinquante-quatre (54) en système conventionnel. Les informations sur ces parcelles sont données en annexe 1.

Les sols étudiés appartiennent à trois groupes de sols ferrallitiques (selon le fond topographique de BD 200 de FTM Madagascar): sol ferrallitique rajeuni à structure dégradée, sol ferrallitique à structure peu dégradée et sol ferrallitique concrétionné.



## Chapitre 2. MATERIELS ET METHODE

### 2.1.Prélèvement et préparation des échantillons

#### 2.1.1.Prélèvement des sols

Les prélèvements des sols de chaque parcelle ont été faits en positionnant au hasard un carré de 10 m x 10 m, aux quatre extrémités duquel ont été réalisés les prélèvements (figure 11). Ils ont été réalisés à l'aide d'un carottier à moteur (figure 13) sur une profondeur de un mètre (1 m). Cinq horizons par trou ont été récoltés séparément dans des sachets en plastique: 0-10, 10-20, 20-30, 50-60 et 80-90 cm. Pour cette étude, seuls les trois premiers horizons ont été utilisés dans la mesure du pH et les deux premiers pour les analyses sur le P.

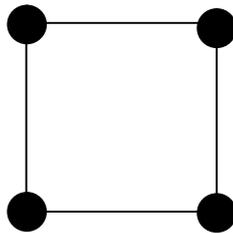


Figure 11. Représentation schématique du carré de prélèvement

La première répétition a été prélevée dans le but de comparer la densité apparente ( $D_a$ ) obtenue à l'aide du carottier avec celle obtenue par méthode classique au cylindre. Les trois autres ont servi à constituer l'échantillon composite pour chaque horizon et pour chaque parcelle. Les aliquotes non mélangées ont aussi été gardés séparément, mais n'ont pas été utilisées pour ce travail.

Pour la détermination de la  $D_a$  des sols de chaque parcelle, les sols ont été prélevés à l'aide d'un cylindre de 8,10 cm de hauteur et 9,80 cm de diamètre, de volume  $V = 504,99 \text{ cm}^3$  (figure 12). Seuls les trois horizons supérieurs (0-10, 10-20 et 20-30 cm) ont été pris et un seul trou par parcelle a été réalisé.

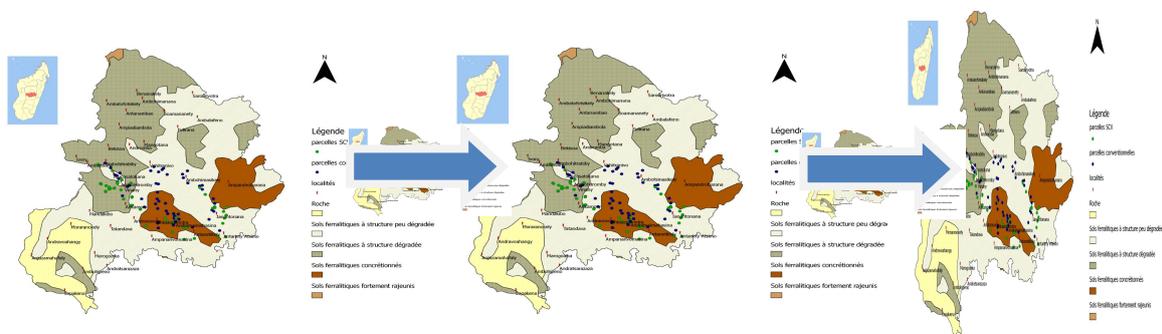


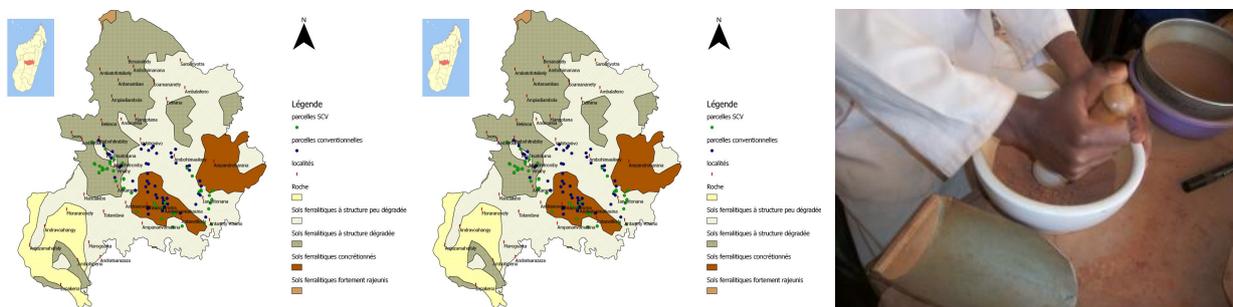
Figure 12 : Prélèvement au cylindre des échantillons pour la détermination de  $D_a$



**Figure 13: Prélèvement des sols au carottier**

### 2.1.2. Préparation des échantillons

Une fois arrivé au LRI, les sols ont été séchés à l'air libre dans une serre dans leurs sachets d'origine. Ils ont d'abord été tamisés à 2 mm pour la détermination du P résine anionique et la détermination de la capacité de rétention en P des sols. Ensuite, un sous échantillon, environ 30 g, a été broyé manuellement à l'aide d'un pilon et d'un mortier en porcelaine, par passage à travers un tamis métallique de 0,2 mm pour les analyses du P total (figure 14).



**Figure 14 : Préparation des échantillons pour les analyses ; de gauche à droite : séchage à l'air libre sous serre, tamisage à 2 mm, broyage à 0,2 mm**

## 2.2. Détermination des propriétés physico-chimiques des sols

### 2.2.1. Densités apparentes et humidité à 105°C

Les  $D_a$  des sols (masse volumique en  $g\ cm^{-3}$ ) ont été déterminées à partir de prélèvements volumétriques au cylindre. Elles sont égales au rapport du poids total sec de l'échantillon sur son volume. Les poids secs ont été obtenus en pesant 20 g de sols de chaque échantillon après étuvage à 105°C durant 48 heures et après refroidissement de quelques minutes dans un dessiccateur.

L'humidité relative et l'humidité d'analyse (en %) ont été déterminées pour chaque échantillon et pour chaque horizon des sols. Elles correspondent au rapport entre le poids des échantillons à l'état humide et leur poids sec après étuvage à 105°C suivant la relation 1.

$$\text{Teneur en eau \% } 105^{\circ}\text{C} = 100 * \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \quad (1)$$

Où  $m_0$  : masse de la boîte à tare ;  $m_1$  : masse de la boîte à tare + masse de terre séchée à l'air libre (de l'ordre de 5 g) ;  $m_2$  : poids après séchage à 105°C durant 24 heures pour l'humidité d'analyse et 48 heures pour l'humidité relative.

### **2.2.2.pH-eau et pH-KCl**

Le résultat de mesure du pH caractérise l'ambiance physico-chimique d'un sol découlant des équilibres instantanés contrôlés par différents éléments constitutifs du milieu (sels divers, acides organiques,  $\text{CaCO}_3$  ...) (Pansu et Gautheyrou, 2003). Le pH d'un sol, représente le pH d'une solution en équilibre avec le sol.

Le pH-eau, acidité actuelle, reflète la concentration de  $\text{H}^+$  dans la solution du sol. Il est considéré comme le pH que subissent les racines et les micro-organismes dans le sol. Le pH-KCl, acidité potentielle, est le pH que peut atteindre un sol laissé évoluer sans chaulage. Il s'obtient par ajout de KCl à la solution eau : sol, qui va chasser les  $\text{H}^+$  fixés sur le CAH du sol. Ces ions  $\text{H}^+$  désorbés vont être dosés, en plus de ceux déjà présents dans la solution du sol

Dans cette étude, le pH des sols a été déterminé suivant la norme expérimentale AFNOR X-31-103 avec un rapport sol : eau de 1 : 2,5 (Pansu et Gautheyrou, 2003). La mesure a été réalisée par méthode potentiométrique à l'aide d'un pH-mètre à électrode en verre et un système à lecture directe. Le pH-eau a été obtenu après 30 minutes d'agitation d'une solution de mélange de 5 g de sol et 12,5 ml d'eau distillée à 175 rpm. Pour le pH-KCl, 0,93 g de KCl a été ajouté à cette solution puis le tout a été agité à 175 rpm pendant 15 minutes.

## **2.3.Les différentes études au laboratoire et les méthodes utilisées**

### **2.3.1.Détermination du P total et du stock de P dans les sols**

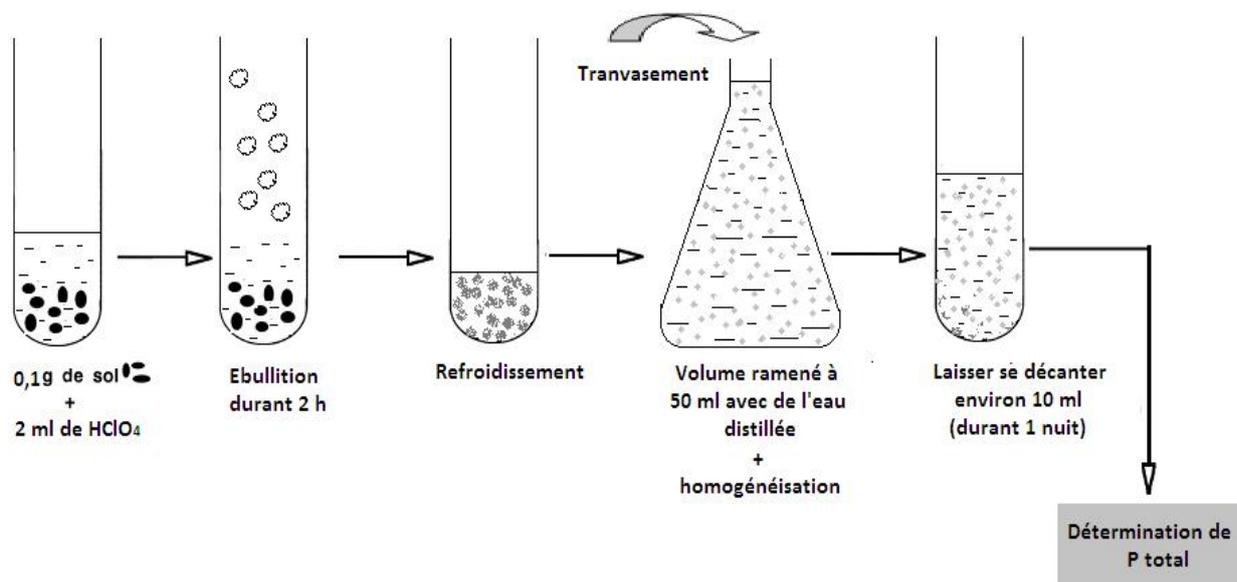
Les méthodes de détermination du  $\text{P}_{\text{tot}}$  consistent à transformer toutes les formes relativement insolubles du P vers des formes solubles (Mathieu et Pieltain, 2003). Dans cette étude, la méthode par attaque à l'acide perchlorique  $\text{HClO}_4$  concentré à chaud des échantillons de sol broyé à 0,2 mm a été utilisée. Le procédé (figure 15) consiste à laisser bouillir un mélange de  $0,1 \pm 0,01$  g de sol broyé à 0,2 mm et 2 ml de  $\text{HClO}_4$  concentré, durant 2 heures à 203°C (ébullition de  $\text{HClO}_4$ ) dans un bloc chauffant. Après avoir été laissé à refroidir dans le bloc

chauffant, le mélange a été dilué avec de l'eau distillée (volume ramené à 50 ml). Ensuite, environ 10 ml du mélange dilué ont été laissés se décanter durant une nuit avant le dosage par la méthode de Murphy et Riley (voir paragraphe 2.3.4).

Pour chaque série d'échantillons, un échantillon témoin de sol et une gamme de concentration 0 ; 0,03 ; 0,10 ; 0,25 ; 0,50 ; 0,75 et 1,00 mg P L<sup>-1</sup> ont été utilisés. Ils ont reçu le même traitement que les échantillons.

La concentration en P<sub>tot</sub> (mg.kg<sup>-1</sup>) a été déterminée par la relation (2) :

$$P_{\text{tot}} \text{ (mg.kg}^{-1}\text{)} = (\text{ppm filtrat} - \text{ppm blanc}) * \frac{1}{\text{dilution}} * \frac{\text{Volume filtrat (ml)}}{\text{Masse de l'échantillon (g)}} \quad (2)$$



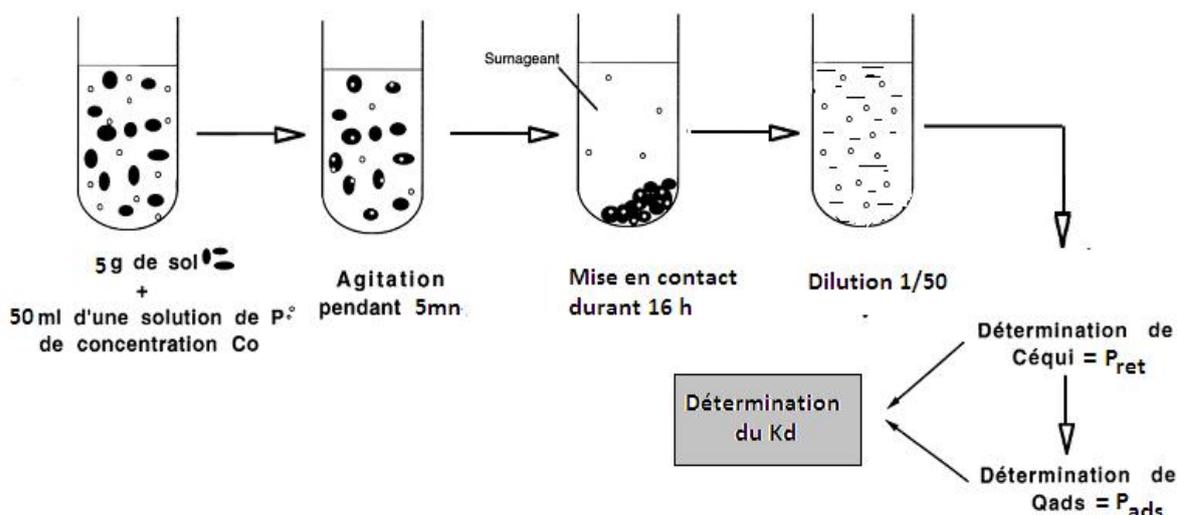
**Figure 15 : Représentation schématique de la détermination de P total après attaque avec HClO<sub>4</sub>**

### 2.3.2. Caractérisation de la capacité de rétention en P des différents sols

Elle consiste à déterminer la concentration à l'équilibre de P (en mg L<sup>-1</sup>) dans une solution d'échange contenant une certaine concentration de P après un temps d'agitation. C'est un test destiné à comparer la capacité de différents échantillons de sol à stocker le P<sub>min</sub> présent dans le milieu.

L'expérimentation a été réalisée en « batch » (figure 16) pour mettre en contact 5 ± 0,001 g de terre tamisée à 2 mm avec 50 ml d'une solution d'échange à concentration unique contenant 10 mmol CaCl<sub>2</sub> et 60 mg P L<sup>-1</sup> basé sur la méthode développée par Alvarez et Fonseca (1991). Pour ce faire, le mélange a été agité par va-et-vient durant 5 minutes puis laissé en contact durant 16 heures. Le surnageant, récupéré par la suite au repos, a été dilué au 1/50 (0,200 ml + 9,8 ml d'eau distillée) dans un tube à essai en verre puis dosé afin de déterminer la

concentration à l'équilibre ( $C_e$ ) par la méthode de Murphy et Riley. Pour chaque série d'échantillons, une gamme de concentration 0 ; 0,03 ; 0,10 ; 0,25 ; 0,50 ; 0,75 et 1,00 mg P L<sup>-1</sup> a été préparée.



**Figure 16 : Représentation schématique de l'expérimentation en « batch »**

La concentration à l'équilibre  $P_{ret}$ , la quantité de P adsorbée  $P_{ads}$  et le coefficient d'adsorption  $K_d$  ont été obtenus suivant les relations 2, 3 et 4 (Dubus, 1997a):

$$P_{ret} \text{ (mg L}^{-1}\text{)} = \text{ppm filtrat} * 1/\text{dilution} \quad (3)$$

$$P_{ads} \text{ (mg kg}^{-1}\text{)} = (C_o - C_e) * V/M \quad (4)$$

$$K_d \text{ (L kg}^{-1}\text{)} = X/C_e \quad (5)$$

Où  $C_o$  : concentration initiale (60 mg P L<sup>-1</sup>) ; V : Volume (L) et M : masse de l'échantillon (kg)

### 2.3.3. Détermination de P disponible

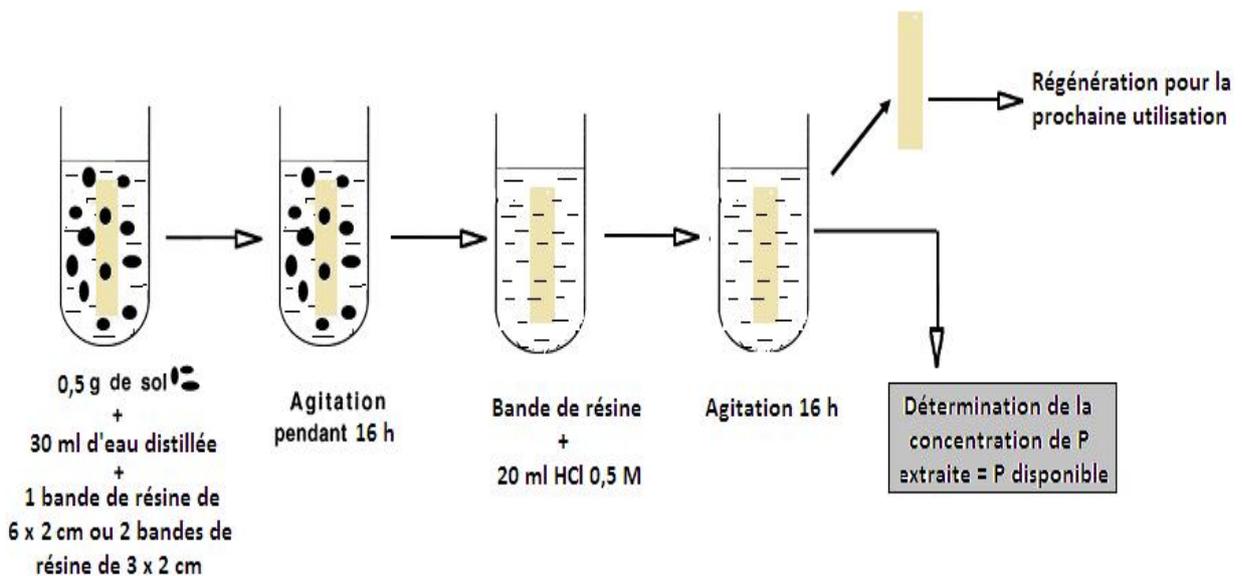
Le P disponible a été déterminé suivant la méthode de la résine échangeuse d'anions. Cette méthode physico-chimique permet d'évaluer la fraction disponible en P des sols en simulant l'action des racines des plantes dans l'adsorption des  $P_i$  du sol (Mathieu et Pieltain, 2003 ; Pansu et Gautheyrou, 2003 ; Qian et al. 2006).

Les résines sont des polymères organiques comportant des groupements ionisables ayant la propriété d'échanger de façon réversible certains ions. Ils fonctionnent d'une manière analogue aux colloïdes des sols dans l'absorption des  $P_i$  (Skogley et Dobermann, 1996 ; Qian et al., 2006). Le principe de cette méthode repose sur le transfert de  $P_i$  présent en solution vers la surface des résines (Skogley et Dobermann, 1996) provoquant l'apparition d'un gradient de concentration entre la phase solide du sol et la solution et une désorption subséquente de  $P_i$  de la phase solide du sol (Frossard et al., 2004). Le  $P_i$  dissous est échangé contre des anions saturant la surface des résines suivant la réaction 1.



Les résines, des membranes échangeuses d'anions (réf 551642S, VWR/BDH/PROLABO) de surface 12 cm<sup>2</sup>, ont été mises en contact, par agitation va-et-vient durant 16 h, avec un mélange de 0,5 ± 0,001 g de sols tamisé à 2 mm et 30 ml d'eau distillée. Les résines, séparées de la solution de sol puis rincées à l'eau distillée, ont été ensuite agitées durant 16 h dans 20 ml de HCl 0,5 M afin de procéder à l'élution du Pi adsorbé sur leur surface. Le P élué a été ensuite dosé à la méthode par colorimétrie au vert de malachite (voir paragraphe 2.3.4). A chaque série d'échantillons, deux blancs (30 ml d'eau distillée) et deux références (0,5 ± 0,001 g de Ter Munk + 30 ml d'eau distillée) ont été utilisés. La démarche est résumée dans la figure 17.

Pour chaque série, une gamme d'étalonnage colorimétrique de concentration 0 ; 0,02 ; 0,04 ; 0,06 ; 0,08 ; 0,10 ; 0,20 ; 0,30 et 0,40 mg P L<sup>-1</sup> ont été préparées.



**Figure 17 : Représentation schématique de la méthode de la résine échangeuses d'anions**

#### 2.3.4.Principe du dosage colorimétrique du P dans le sol

Le dosage du P est basé sur la formation et la réduction d'un complexe phosphomolybdate  $\text{H}_3\text{P}(\text{Mo}_3\text{O}_{10})_4$  formé suite à la réaction de l'acide orthophosphorique avec le molybdate suivant la relation (1) ( Kuo, 1996; Mathieu et Pieltain, 2003):



La réduction du phosphomolybdate s'accompagne d'une coloration bleu dans le cas de la méthode au bleu de Murphy et Riley, et vert dans le cas de la méthode au vert de malachite plus sensible que la méthode précédente, dont l'intensité est proportionnelle à la quantité de  $\text{H}_3\text{P}(\text{Mo}_3\text{O}_{10})_4$  réduit, et donc à la quantité de P présent dans le milieu considéré (Mathieu et Pieltain, 2003).

Dans le cas de méthode de Murphy et Riley, la lecture a été réalisée dans une cuve en verre de trajet optique 1 cm, sur un spectrophotomètre (Metertech SP8001 UV/VIS), à une longueur d'onde  $\lambda = 882$  nm. Par contre, dans le cas de la méthode au vert de malachite, elle a été effectuée dans une cuve en plastique jetable de trajet optique 1 cm, sur un spectrophotomètre à une longueur d'onde  $\lambda = 610$  nm. En effet, le vert de malachite se fixe fortement sur les parois des cuves, contrairement au bleu de Murphy et Riley. Ce qui fait que les cuves ne sont plus réutilisables avec cette méthode.

## **2.4.Présentation et analyse statistique des résultats**

Les variations du pH, de la teneur en P disponible, des stocks et de la capacité de rétention en P des sols ont été évaluées par horizon et par mode de gestion des sols.

Les tests statistiques ont été réalisés avec le logiciel XLSTAT 2008 au seuil de risque  $\alpha=0,05$ . Pour des raisons de commodités, la représentation graphique de la statistique descriptive sous forme de boîte à moustache a été adoptée afin de pouvoir présenter les différents valeurs des paramètres de position (moyenne, médiane, les valeurs minimales  $Q_0$  et maximales  $Q_4$ , les quartiles  $Q_1$ ,  $Q_2$  et  $Q_3$ ) et des paramètres de dispersion (intervalle inter-quartile  $Q_3-Q_1$ , l'étendue  $Q_4-Q_0$ ).

Comme certaines données ne répondent pas au critère de normalité, des tests non paramétriques, basés sur les rangs des échantillons, ont été effectués. Ainsi, le test de Kruskal Wallis couplé avec le test de comparaison multiple de Dunn, a été réalisé pour détecter la différence entre les trois horizons dans le cas du pH et de la Da. Par contre, pour comparer les deux systèmes entre eux ainsi que les résultats relatifs au P obtenus au niveau des deux horizons, le test de comparaison de deux échantillons de Mann-Whitney a été réalisé. La règle de décision est dictée par la valeur *p-value* calculée qui désigne le risque d'erreur encourue en rejetant  $H_0$  alors qu'elle est vraie. Si *p-value* est inférieure à la valeur de  $\alpha$  alors, au moins une différence significative existe au niveau des résultats (Saporta, 1978). Elle est hautement significative si elle est inférieure à  $\alpha = 0,01$ .

En sus, des méthodes de régression linéaire et des tests de corrélations de Pearson ont été également effectuées pour déterminer la présence d'éventuelle corrélation entre les différents paramètres étudiés et entre P, C et N.



**Troisième Partie :**  
**Résultats, Interprétations et**  
**Discussions**

## Chapitre 1. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

### 1.1. Résultats des analyses au laboratoire

Tableau 1 : Récapitulatif des moyennes et p-value des différents paramètres

	pH-eau	pH-KCl	$\Delta$ pH	Da	P <sub>ret</sub>	P <sub>ads</sub>	P résine	P total	Stock P
MG	5,30 ± 0,35	4,37 ± 0,36	-0,93 ± 0,27	1,18 ± 0,12	18,0 ± 5,7	420 ± 57	2,0 ± 2,4	637 ± 157	729 ± 178
Conv	5,30 ± 0,32 <sup>ns</sup>	<b>4,42 ± 0,37**</b>	<b>-0,99 ± 0,26**</b>	1,18 ± 0,12 <sup>ns</sup>	<b>16,6 ± 5,6**</b>	<b>434 ± 56**</b>	<b>1,8 ± 2,4**</b>	616 ± 147 <sup>ns</sup>	754 ± 196 <sup>ns</sup>
SCV	5,30 ± 0,38 <sup>ns</sup>	<b>4,31 ± 0,34**</b>	<b>-0,88 ± 0,27**</b>	1,17 ± 0,11 <sup>ns</sup>	<b>19,7 ± 5,5**</b>	<b>403 ± 55**</b>	<b>2,3 ± 2,4**</b>	655 ± 164 <sup>ns</sup>	698 ± 152 <sup>ns</sup>
Pr	0,530	0,001	0,0002	0,852	0,0002	0,0002	0,004	0,176	0,051
0-10	<b>5,14 ± 0,31**a</b>	<b>4,19 ± 0,22**a</b>	-0,95 ± 0,23 <sup>ns</sup>	<b>1,12 ± 0,11**a</b>	<b>20,1 ± 5,7**</b>	<b>400 ± 57**</b>	<b>2,8 ± 2,8**</b>	654 ± 155 <sup>ns</sup>	729 ± 169 <sup>ns</sup>
10-20	<b>5,28 ± 0,31**b</b>	<b>4,34 ± 0,31**b</b>	-0,95 ± 0,26 <sup>ns</sup>	<b>1,18 ± 0,11**b</b>	<b>16,0 ± 5,1**</b>	<b>440 ± 51**</b>	<b>1,2 ± 1,6**</b>	620 ± 159 <sup>ns</sup>	728 ± 189 <sup>ns</sup>
20-30	<b>5,48 ± 0,35**c</b>	<b>4,57 ± 0,44**c</b>	-0,91 ± 0,37 <sup>ns</sup>	<b>1,22 ± 0,11**c</b>					
Pr	< 0,0001	< 0,0001	0,462	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,071	0,675
SSD	<b>5,31 ± 0,36**b</b>	<b>4,29 ± 0,30**a</b>	<b>-1,02 ± 0,24**a</b>	<b>1,16 ± 0,10 ab</b>	<b>20,3 ± 5,7 b</b>	<b>397 ± 57 a</b>	2,0 ± 2,1 <sup>ns</sup>	<b>606 ± 124**a</b>	<b>691 ± 143**a</b>
SPD	<b>5,38 ± 0,34**b</b>	<b>4,44 ± 0,37**b</b>	<b>-0,94 ± 0,27**b</b>	<b>1,16 ± 0,12 a</b>	<b>17,1 ± 5,5 a</b>	<b>430 ± 55 b</b>	1,9 ± 2,6 <sup>ns</sup>	<b>612 ± 163**a</b>	<b>691 ± 168**a</b>
SFC	<b>5,18 ± 0,34**a</b>	<b>4,31 ± 0,36**a</b>	<b>-0,87 ± 0,27**b</b>	<b>1,20 ± 0,16 b</b>	<b>18,2 ± 5,8 ab</b>	<b>418 ± 58 ab</b>	2,2 ± 2,2 <sup>ns</sup>	<b>694 ± 153**b</b>	<b>809 ± 189**b</b>
Pr	< 0,0001	0,001	0,001	0,010	0,013	0,013	0,532	0,001	< 0,0001

**Nb** : **MG** : moyenne générale ; **Conv** : conventionnelle ; **0-10, 10-20, 20-30** : horizons ; **ns** : différence non significative ; **\*** : différence significative pour  $\alpha = 0,05$  ; **\*\*** : différence hautement significative pour  $\alpha = 0,01$  ; **a,b,c** : rang des moyennes selon le test de Dunn ; **Pr** : p-value calculée (test bilatéral) ; **SSD** : Sol ferrallitique rajeuni à structure dégradée ; **SPD** : sol ferrallitique rajeuni à structure peu dégradée ; **SFC** : sol ferrallitique concrétionné ; **P<sub>ret</sub>** : P rémanent ; **P<sub>ads</sub>** : P adsorbé

Le tableau 1 montre les moyennes  $\pm$  écart-types de tous les paramètres étudiés au laboratoire pour l'ensemble des échantillons et pour chaque système et horizon étudié ainsi que les résultats des tests statistiques. Les moyennes suivies d'une même lettre à l'intérieur d'une même colonne ne sont pas significativement différentes avec le test de comparaison multiple de Dunn couplé avec le test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

## **1.2. Acidité des sols**

### **1.2.1. Acidité actuelle : pH-eau**

Les échantillons analysés présentent une ambiance physico-chimique allant de fortement acide à légèrement acide. Leur pH-eau varie entre 4,44 et 6,38 avec une moyenne de 5,30. La comparaison des deux systèmes ne montre aucune différence significative. Le pH-eau varie entre 4,44 à 6,38 (médiane 5,32) sous SCV et entre 4,45 et 6,27 (médiane 5,27) sous culture conventionnelle avec une dispersion faible des valeurs autour de la moyenne. Leur coefficient de variation (Cv) respectif est de 7,2% et 6,1%.

Par contre, des différences hautement significatives ont été mises en évidence entre les trois horizons (Figure 17), avec une baisse de l'acidité avec la profondeur. Une gamme de variation de 4,55 à 5,82 (moyenne de 5,14) est observée pour 0-10 cm alors qu'elle est respectivement de 4,48 à 6,33 (moyenne de 5,28) et 4,44 à 6,38 (moyenne de 5,48) pour 10-20 et 20-30 cm. Leurs Cv respectifs, 6,1% , 5,8% et 6,4% révèlent une faible dispersion des valeurs observées. 32% des parcelles ont une forte acidité ( $\text{pH} < 5$ ) au niveau du 1<sup>er</sup> horizon tandis que 18% et 8% respectivement au niveau des deux horizons sous-jacents successifs.

Les sols ferrallitiques concrétionnés (SFC) sont plus acides que les sols ferrallitiques à structure dégradée (SSD) et à structure peu dégradée (SPD) qui, tous deux, forment un groupe homogène (Figure 18). Au niveau des SFC, les sols ont un pH-eau allant de 4,45 à 5,90 dont la valeur médiane est de 5,17 alors que ceux des deux autres groupes présentent une gamme de variation de 4,61 à 6,09 (médiane de 5,27) dans le cas de SSD et de 4,44 à 6,38 (médiane de 5,40). La variabilité des valeurs observées pour chaque groupe de sols est faible avec des Cv respectifs de 6,5%, 6,6% et 6,3%.

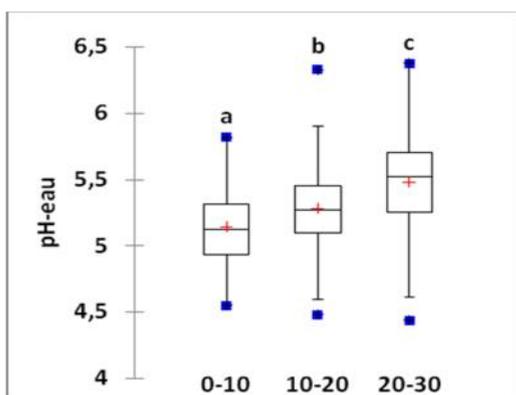


Figure 17: Variation du pH-eau par horizon de sol

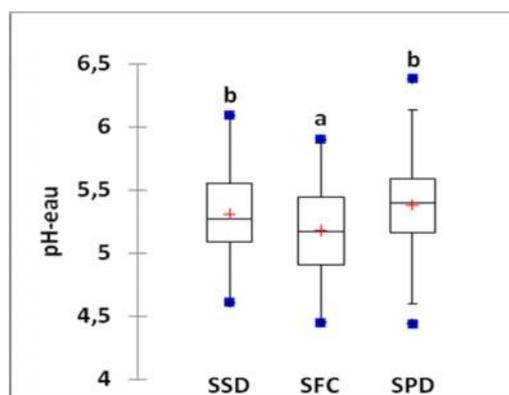


Figure 18: Variation du pH-eau par groupe de sol ferrallitique de la zone étudiée

### 1.2.2. Acidité potentielle : pH-KCl

Le pH-KCl des sols étudiés est compris dans la gamme d'acidité forte à satisfaisante en affichant des valeurs comprises entre 3,81 et 5,43. Une influence des modes de gestion est observée avec une différence significative des valeurs mesurées (Figure 19). Les parcelles en SCV, avec des pH-KCl allant de 3,85 à 5,40 (médiane de 4,20 et Cv de 8,0%), montrent une moyenne inférieure à celle des parcelles conduites en mode conventionnel, au niveau desquelles une variation de 3,81 à 5,43 (médiane de 4,36 et Cv de 8,2%) est constatée.

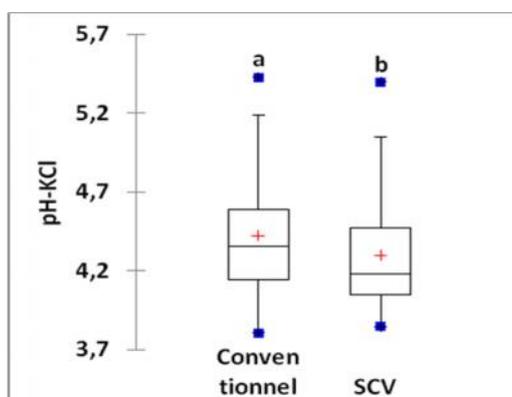


Figure 19 : Valeurs de pH-KCl observées au niveau des deux systèmes

Cette acidité potentielle varie verticalement dans les sols avec des moyennes croissantes au fur et à mesure que la profondeur augmente (Figure 20). Les Cv respectifs pour les trois horizons, de haut en bas, sont de 5,2%, 7,1% et 8,9%. Un étalement de pH-KCl de 3,85 à 4,76 est observé au niveau de la couche superficielle avec une valeur médiane de 4,15. Les deux horizons sous-jacents, en s'enfonçant vers la profondeur, ont des pH-KCl variant de 3,90 à 5,43 (médiane de 4,23) et 3,81 à 5,42 (médiane de 4,47).

L'acidité potentielle du groupe de sol SPD se distingue d'une manière significative par rapport à celle des deux autres groupes (Figure 21). Les parcelles dont les sols appartiennent

à ce groupe ont des pH-KCl comprises entre 3,93 et 5,40 (médiane de 4,35). Pour les deux autres groupes, la variation des pH-KCl est de 3,89 à 5,16 (médiane 4,21) pour les SSD et de 3,81 à 5,43 (médiane de 4,20) pour les SFC. Une faible dispersion des valeurs est observée au niveau des SFD (Cv de 6,9%) par rapport à celle des deux autres groupes (Cv de 8,4% pour SFC et 8,2% pour SPD).

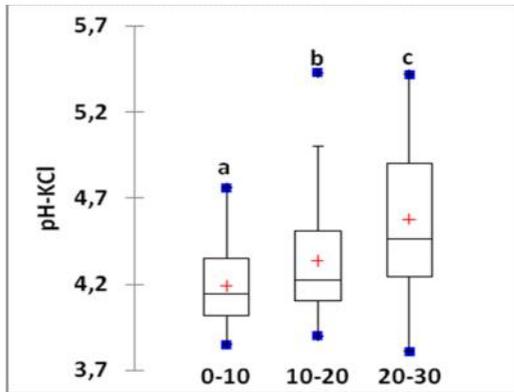


Figure 20: Variation du pH-KCl par horizon de sol

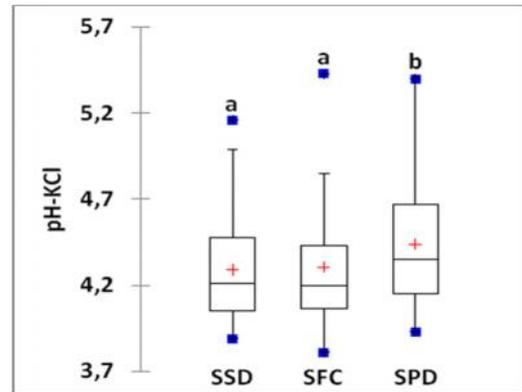


Figure 21: Variation du pH-KCl selon les groupes de sol

### 1.2.3. Ecart entre les deux pH : $\Delta pH$

Dans cette étude, tous les échantillons présentent une charge nette négative :  $\Delta pH < 0$  avec une étendue de -1,93 à -0,06. La différence constatée entre les deux modes de gestion de sols est hautement significative (Figure 22). Le système SCV au niveau duquel des valeurs de -1,93 à -0,19 (médiane de -1,00) sont observées, tend, donc, à augmenter la charge négative des sols. Toutes les valeurs observées sont plus groupées autour de la moyenne (Cv de -2,6%) que celles des parcelles en mode conventionnel (Cv de -3,1%) qui présentent une gamme de valeurs incluses entre -1,91 à -0,06 (médiane de -0,90).

Les trois couches de sol successives, de haut en bas, présentent respectivement des valeurs de -1,64 à -0,35, de -1,75 et -0,19 et de -1,91 et -0,06 avec respectivement une dispersion la plus élevée au niveau du 3<sup>ème</sup> horizon (Cv de -3,6%). Cependant, aucune différence significative n'est détectée entre les valeurs de ces trois horizons.

Enfin, les sols à SSD présentent un écart de pH qui se distingue nettement de ceux des deux autres groupes de sols (Figure 23). Ils affichent un étalement de  $\Delta pH$  de -1,46 à -0,24 (médiane -1,06) avec un Cv de -2,4%. Quant aux deux autres groupes, la variation est respectivement de -1,64 à -0,06 (médiane -0,87, Cv de -3,1%) et -1,93 à -0,32 (médiane -0,80, Cv de -2,9%) pour SFC et SPD.

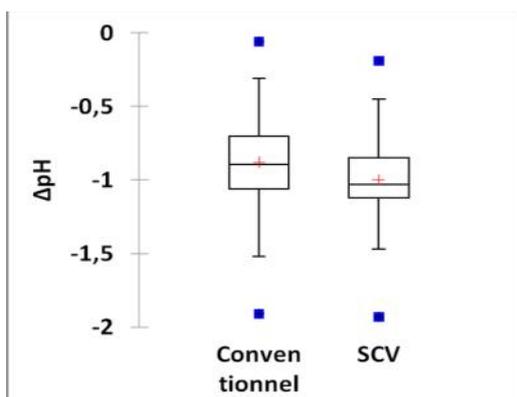


Figure 22: Variation du  $\Delta pH$  selon les deux modes de gestion de sol

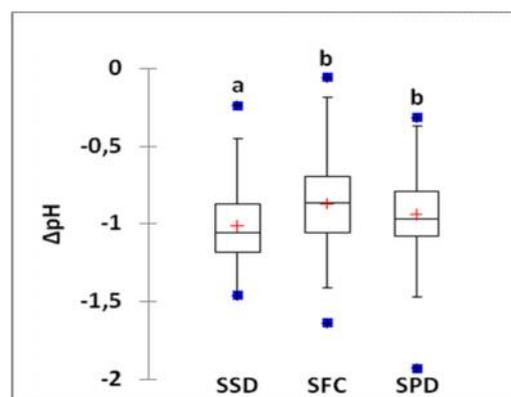


Figure 23: Valeurs de  $\Delta pH$  pour chaque groupe de sols ferrallitiques

### 1.3. Teneurs et formes du Phosphore

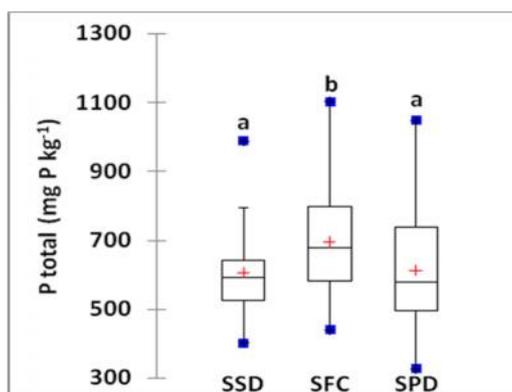
#### 1.3.1. Teneur en P total, densité apparente et stock en P des sols

##### 1.3.1.1. Teneur en P total

Les sols étudiés ont une teneur en P total comprise entre 327 et 1104 mg P kg<sup>-1</sup> avec des teneurs ne différant pas significativement entre les deux systèmes. Les teneurs mesurées au niveau de ces deux systèmes, variant de 327 à 1048 sous SCV et de 360 à 1104 sous conventionnel, montrent une distribution orientée vers les plus grandes valeurs. Le Cv est de 2,4% sous SCV et de 2,6% sous conventionnel. Les valeurs médianes respectives sont de 628 et 645 mg P kg<sup>-1</sup>.

Pareillement pour les deux horizons analysés, la différence observée est non significative bien que la moyenne de 0-10 cm soit légèrement supérieure à celle de 10-20 cm. Cependant, en unilatéral, cette différence s'avère significative avec une p-value égale à 0,036. Ce qui signifie que le P des sols peut présenter une tendance à l'accumulation plus en surface qu'en profondeur. Les valeurs du 1<sup>er</sup> horizon sont moins dispersées que celles du 2<sup>ème</sup> : Cv respectifs de 2,4% et de 2,5%. De plus, l'étendue des valeurs y est la plus faible : 343 à 1048 mg P kg<sup>-1</sup> (50% des parcelles ayant une teneur de moins de 640 mg P kg<sup>-1</sup>) contre 327 à 1104 mg P kg<sup>-1</sup> (50% des parcelles avec des teneurs inférieures à 588 mg P kg<sup>-1</sup>).

Les sols SFC présentent une teneur moyenne en P total largement supérieure à ceux des deux autres groupes de sols (Figure 24). Toutes les distributions pour les trois groupes sont orientées vers les grandes valeurs avec des Cv respectifs de 2,0% pour SSD, 2,2% pour SFC et 2,7% pour SPD. Leur gamme de variation de teneurs respective est de 402 à 989 mg P kg<sup>-1</sup>, 439 à 1104 mg P kg<sup>-1</sup> et 327 à 1048 mg P kg<sup>-1</sup>.



**Figure 24 : Distribution des teneurs en P total par groupe de sols**

### **1.3.1.2. Densités apparentes**

Dans l'ensemble, la densité apparente ( $D_a$ ) des sols s'étend entre 0,09 et 1,51 g cm<sup>-3</sup> avec une moyenne de 1,18 g cm<sup>-3</sup>. Aucune différence de valeurs n'est constatée entre les parcelles sous SCV et celles qui sont en mode conventionnel. De plus, les  $D_a$  observées au niveau des deux modes de gestion de sol présentent une dispersion comparable : Cv respectifs de 9,0% et 1,0%, étendue des valeurs de 0,90 à 1,50 g cm<sup>-3</sup> et de 0,90 à 1,53 g cm<sup>-3</sup> avec une valeur médiane identique (1,17 g cm<sup>-3</sup>).

En revanche, la différence observée entre les trois horizons est hautement significative avec une augmentation appréciable de la compacité des sols en profondeur (figure 25). Toutefois, les  $D_a$  de chaque horizon respectif présentent une dispersion à peu près la même : Cv respectifs de 9,5%, 8,9% et 9,0%. Pour le 1<sup>er</sup> horizon, les  $D_a$  s'évaluent entre 0,90 à 1,51 g cm<sup>-3</sup>, pour les 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup>, elles sont comprises respectivement entre 0,90 et 1,49 g cm<sup>-3</sup> et entre 0,94 et 1,53 g cm<sup>-3</sup>. La moitié des parcelles présente une  $D_a$  inférieure à 1,13 sur 0-10 cm, inférieure à 1,17 sur 10-20 cm et à 1,22 sur 20-30 cm.

Les sols SFC présentent une  $D_a$  élevée comparés aux deux autres groupes (Figure 26). Les sols à SSD forment un groupe intermédiaire entre les SFC et les SPD qui sont les moins compacts et dont la dispersion des valeurs est moindre par rapport à celle des deux groupes de sols qui présentent des Cv proches (9,6% pour SFC et 1,0% pour SPD). Les  $D_a$  minimales observées pour les trois groupes de sols sont presque identiques : 0,90 g cm<sup>-3</sup> pour SSD et 0,90 g cm<sup>-3</sup> pour les deux autres. Par contre, la  $D_a$  maximale pour SFC est supérieure à celle de SSD et SPD : 1,53 g cm<sup>-3</sup> pour le 1<sup>er</sup> contre 1,51 et 1,50 g cm<sup>-3</sup> pour le 2<sup>ème</sup> et le 3<sup>ème</sup>.

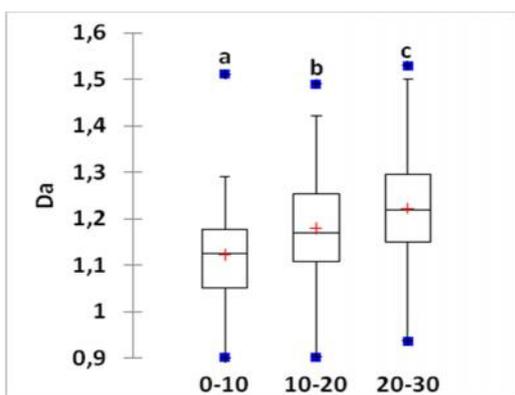


Figure 25: Variation des  $D_a$  pour chaque horizon de sol

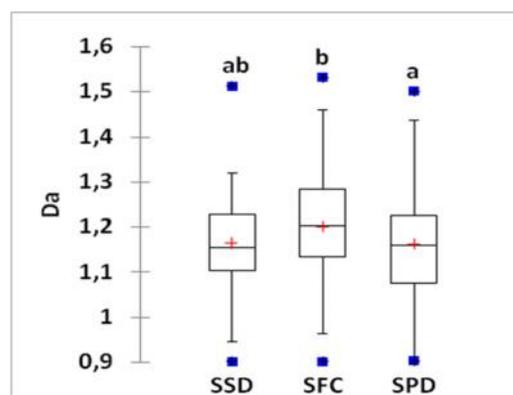


Figure 26: Variation des  $D_a$  des sols de chaque groupe

### 1.3.1.3. Stock en P des sols

Le stock en P total des sols étudiés sur les 20 premiers centimètres est compris entre 406 à 1453 kg P ha<sup>-1</sup>. Malgré que des fluctuations des valeurs soient observées entre les deux modes de gestion de sol, il n'y a aucune différence significative. Néanmoins, en test unilatéral, cette différence est significative puisque sa p-value est 0,026, signifiant que sous le mode conventionnel, le stock en P des sols peut être supérieur à celui des parcelles sous SCV. Pour le premier, le stock en P des sols varie de 406 à 1453 kg P ha<sup>-1</sup> (médiane de 714 kg P ha<sup>-1</sup>, Cv de 2,6%) tandis qu'il est compris entre 440 et 1101 kg P ha<sup>-1</sup> (médiane de 677 kg P ha<sup>-1</sup>, Cv de 2,2%) pour le second.

Les stocks en P des parcelles étudiées ne montrent aucune variabilité verticale significative non plus. La dispersion des valeurs du 1<sup>er</sup> horizon est plus faible que celle du 2<sup>ème</sup> horizon : Cv respectifs de 2,3% et 2,6%. Le stock en P de la moitié des parcelles n'excède pas 701 kg P ha<sup>-1</sup> pour l'horizon de surface et 678 kg P ha<sup>-1</sup> au niveau de l'horizon sous-jacent.

Par ailleurs, le stock de P observé a niveau des sols à SFC est plus élevé par rapport à ceux des deux autres groupes de sol (Figure 27). L'amplitude de variation des valeurs y est également la plus élevée avec des stocks compris entre 529 et 1453 kg P ha<sup>-1</sup> dont la valeur médiane est de 789 kg P ha<sup>-1</sup>. Les gammes de stock des deux autres groupes s'échelonnent respectivement entre 505 et 1095 kg P ha<sup>-1</sup> pour les SSD et entre 406 à 1168 kg P ha<sup>-1</sup> pour les SPD. Les SSD montrent une dispersion de valeurs la plus faible (Cv de 2,0%).

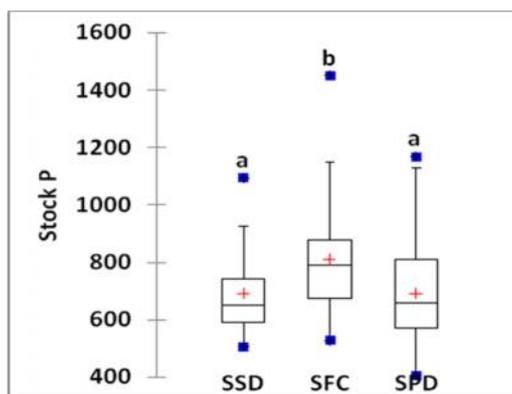


Figure 27 : Stock de P pour chaque groupe de sols

### 1.3.2. Potentiel de rétention en P

#### 1.3.2.1. Concentration à l'équilibre $P_{ret}$

Pour l'ensemble des échantillons, la concentration à l'équilibre  $P_{ret}$  entre la phase solide et la solution du sol s'échelonne entre 4,4 et 34,9 mg P L<sup>-1</sup> avec un Cv de 3,2% et une valeur médiane de 17,4 mg P L<sup>-1</sup>.

Une variation hautement significative est détectée d'un mode de gestion à un autre. Le système de culture SCV affiche des concentrations à l'équilibre qui se répartissent entre 8,28 et 34,9 mg P L<sup>-1</sup> et un Cv égal à 2,7%. Pour le système conventionnel, ces concentrations sont étalées entre 4,4 à 29,0 mg P L<sup>-1</sup> avec un Cv de 0,338 (Figure 28). Les concentrations  $P_{ret}$  sur 50% des parcelles en SCV sont inférieures à 19,6 mg P L<sup>-1</sup>, elles sont en dessous de 16,3 mg P L<sup>-1</sup> sur 50% de celles en mode conventionnel.

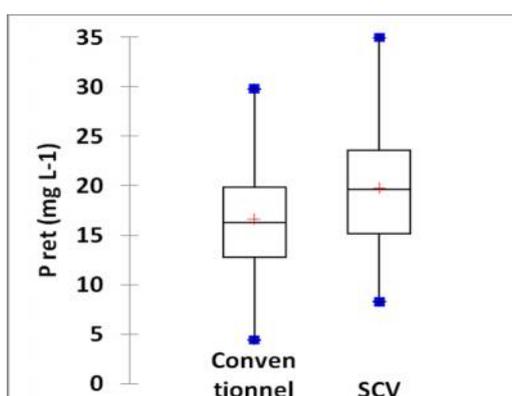


Figure 28: Concentration de P à l'équilibre pour chaque horizon de sol

L'horizon 0-10 cm présente des valeurs de  $P_{ret}$  réparties entre 7,4 et 35,0 mg P L<sup>-1</sup> contre une variation de 4,4 à 29,8 mg P L<sup>-1</sup> pour 10-20 cm (figure 29) avec une différence hautement significative. Les concentrations observées tendent vers les petites valeurs pour

le premier horizon et vers les grandes valeurs pour le second. Le Cv pour chaque horizon respectif est de 2,8% et 3,2% et la valeur médiane est de 20,3 et 15,2 mg P L<sup>-1</sup>.

Les différences de concentrations à l'équilibre sont significatives entre les SSD et les SPD (Figure 30). Les SPD présentent des moyennes de P<sub>ret</sub> la plus faible mais la gamme de variation y est la plus élevée : 4,4 à 31,2 contre 4,7 à 31,4 pour les SFC et 10,5 à 35,0 pour les SSD. Les SFD présentent la valeur médiane la plus élevée qui est de 21,3 contre 18,2 pour SFC et 16,4, la plus faible, pour SPD. La dispersion des valeurs présente une similitude pour les trois groupes des sols avec des Cv autour de 3,0%.

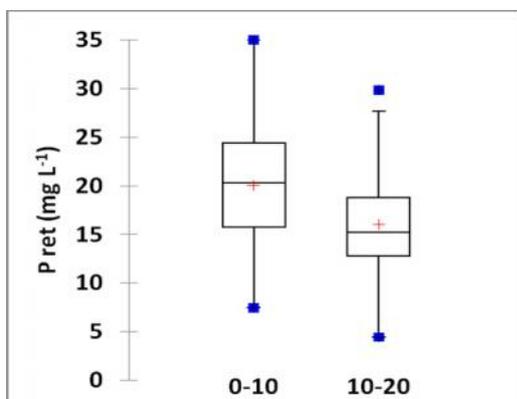


Figure 29: Concentration de P à l'équilibre pour chaque horizon de sol

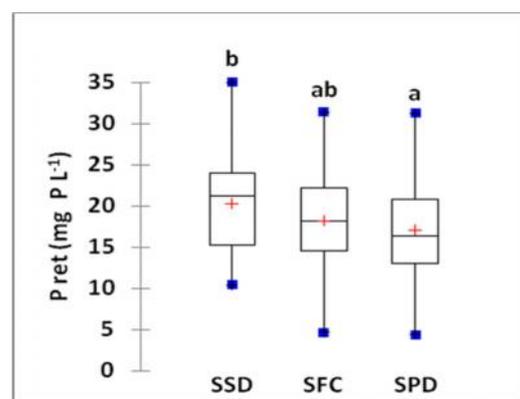
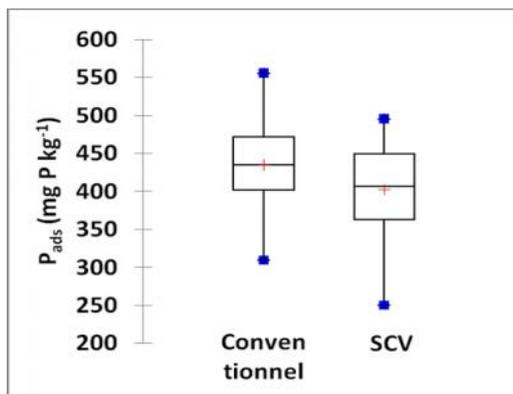


Figure 30 : Concentration à l'équilibre pour chaque groupe de sols

### 1.3.2.2. Concentration de P adsorbé (P<sub>ads</sub>)

La gamme de variation de P<sub>ads</sub> de tous les échantillons est de 250 à 556 mg P kg<sup>-1</sup> dont la moyenne est de 420 mg P kg<sup>-1</sup> et le Cv de 1,4%. Elle correspond à un taux d'adsorption de 42 à 93% dont la moyenne est de 70%.

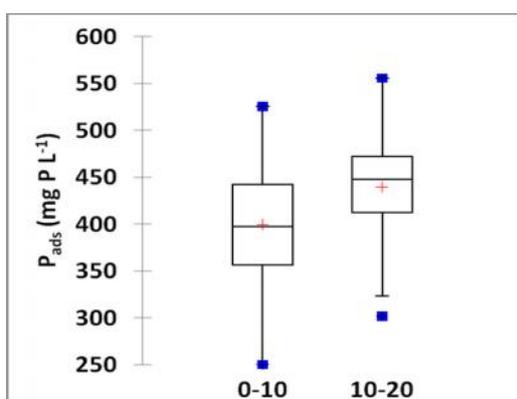
La capacité d'adsorption des particules des sols des parcelles en conventionnel surpasse nettement celle des sols sous SCV avec une amplitude de variation élevée : 302 à 556 mg P kg<sup>-1</sup> contre 250 à 517 mg P kg<sup>-1</sup> pour les SCV. La teneur moyenne de P<sub>ads</sub> de 403 mg P kg<sup>-1</sup> au niveau des parcelles sous SCV correspond à un taux d'adsorption de 67 % tandis que celle des parcelles en conventionnelle, qui est de 434 mg P kg<sup>-1</sup>, équivaut à un taux d'adsorption de 72% (Figure 31). Les valeurs présentent une dispersion modérée autour de la moyenne avec des Cv de 1,4% pour le SCV et 1,3% pour le mode conventionnel.



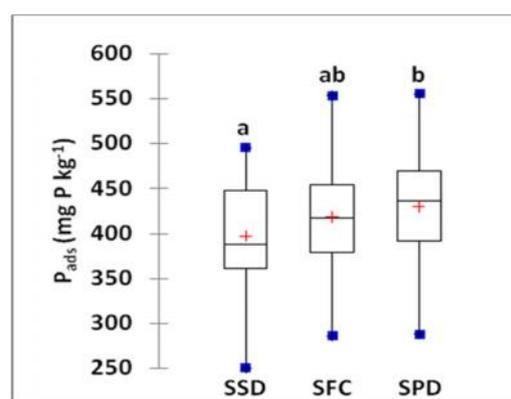
**Figure 31 : Variation de P adsorbé pour les deux systèmes**

L'adsorption du P est faible au niveau de l'horizon superficiel comparé à celle de l'horizon sous-jacent mais la dispersion des valeurs de concentrations adsorbées y est la plus élevée ( $C_v = 1,4\%$ ) (Figure 32). Les concentrations qui y sont adsorbées oscillent entre 250 et 526  $\text{mg P kg}^{-1}$ , soit un taux d'adsorption de 42 à 88%. En revanche, l'horizon 10-20 cm, avec un  $C_v$  de 1,2%, montre une variation de  $P_{\text{ads}}$  de 302 à 556  $\text{mg P kg}^{-1}$  correspondant à un taux d'adsorption de 50 à 93%.

Les sols SSD adsorbent moins le P que les SPD avec une amplitude des valeurs de  $P_{\text{ads}}$  la plus faible : 250 à 496  $\text{mg P kg}^{-1}$  contre 288 à 556  $\text{mg P kg}^{-1}$  pour le seconde groupe (Figure 33). Toutefois, les valeurs y sont les plus dispersées avec des  $C_v$  de 1,4%, 1,4% et 1,3% pour SFC et SPD. La capacité d'adsorption des sols SFC n'est pas éloignée de celles des deux autres groupes. Le taux d'adsorption moyen respectif est de 66%, 70% et 72% pour SSD, SPD et SFC.



**Figure 32 : Variation de P adsorbé selon les horizons de sols**



**Figure 33 : Variation de l'adsorption de P selon les groupes de sol**

### 1.3.3. Teneur en P disponible

La teneur en P disponible des sols étudiés varie entre 0 et 16,50 mg P kg<sup>-1</sup> avec une moyenne de 2,02 mg P kg<sup>-1</sup> avec une variation hautement significative suivant les modes de gestion de sols : la teneur moyenne est plus élevée dans les parcelles sous SCV (Figure 34). Ces dernières renferment des teneurs allant de 0,04 à 16,50 mg P kg<sup>-1</sup> avec une valeur médiane de 1,62 mg P kg<sup>-1</sup>. Par contre, les parcelles en conventionnelle ont des teneurs variant de 0 à 13,88 mg P kg<sup>-1</sup> et une valeur médiane de 0,92 mg P kg<sup>-1</sup>. Pour les deux systèmes, les teneurs observées présentent une dispersion élevée même si elles semblent plus homogènes en SCV qu'en conventionnel: Cv de 1,1% sous SCV et 1,3% sous conventionnel.

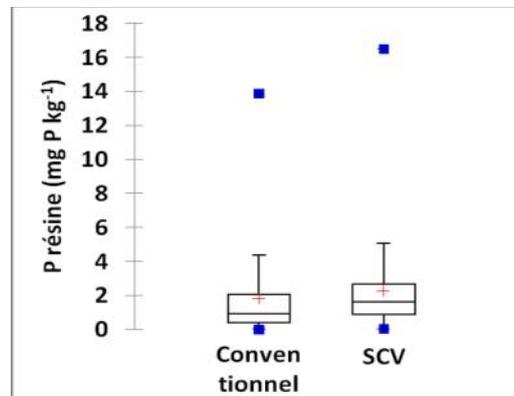
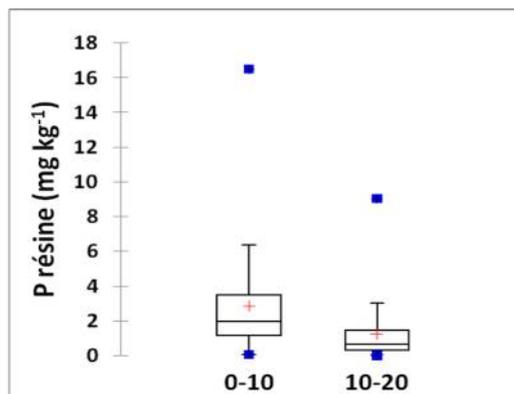


Figure 34 : Distribution de P disponible pour les deux systèmes

La teneur en P disponible présente une variation verticale dans les sols avec une forte diminution avec la profondeur (Figure 35). En surface, 0-10 cm, elle varie de 0,06 à 16,50 mg P kg<sup>-1</sup> avec un Cv de 9,8%, puis diminue de 0,00 à 9,04 mg P kg<sup>-1</sup> au niveau de 10-20 cm avec une forte dispersion par rapport au 1<sup>er</sup> horizon (Cv de 128,4%). Pour chaque horizon respectif, 50% des parcelles ont respectivement une teneur inférieure à 1,98 et à 0,67 mg P kg<sup>-1</sup>.



**Figure 35: Valeur de P disponible pour chaque horizon de sol**

Enfin, la teneur en P disponible des trois groupes de sols ne permet pas de les distinguer significativement entre eux. Néanmoins, les sols à SPD montrent les moyennes les plus faibles et la plus forte dispersion des teneurs observées (Cv de 135,0%) suivis par les sols à SSD (Cv de 104,0%). Les sols à SFC ont la moyenne la plus élevée avec une plus faible dispersion des teneurs observées (Cv de 102,0%).

#### **1.4. Corrélation entre les différents paramètres étudiés**

Le tableau 2 donne les corrélations entre les différents paramètres étudiés. Les valeurs en gras sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification  $\alpha = 5\%$ . Ainsi, des corrélations positives sont observées entre le pH-eau et le pH-KCl, entre le pH-eau et le P adsorbé, entre le pH-KCl et le P adsorbé, le  $\Delta pH$  et le P adsorbé, entre le P total et le P résine, et entre le P résine et la concentration à l'équilibre  $P_{ret}$ . Par contre, les corrélations négatives sont observées entre le pH-eau et le  $\Delta pH$ , entre les deux pH et la concentration  $C_e$ , entre le  $\Delta pH$  et  $C_e$ .

Toutes les corrélations, à l'exception de celle entre le pH-eau et le pH-KCl, entre le pH-eau et le  $\Delta pH$ , sont faibles. Toutefois, P résine présente une corrélation assez bonne avec  $P_{ret}$  et  $P_{ads}$ . Ceci indique que la variation de  $P_{ret}$  entraîne une variation dans le même sens de P résine et inversement pour celle de  $P_{ads}$ . La valeur -1 du coefficient de corrélation de Pearson entre  $P_{ads}$  et  $P_{ret}$  vient du fait que ces deux paramètres constituent deux façons de calculer une même valeur.

**Tableau 2 : Matrice de corrélation de Pearson**

<b>Variables</b>	<b>pH-eau</b>	<b>pH-KCl</b>	<b><math>\Delta</math>pH</b>	<b>P total</b>	<b>P<sub>ret</sub></b>	<b>P<sub>ads</sub></b>	<b>P résine</b>
<b>pH-eau</b>	<b>1</b>						
<b>pH-KCl</b>	<b>0,686</b>	<b>1</b>					
<b><math>\Delta</math>pH</b>	<b>-0,534</b>	<b>0,249</b>	<b>1</b>				
<b>P total</b>	<b>0,033</b>	<b>-0,012</b>	<b>-0,057</b>	<b>1</b>			
<b>P<sub>ret</sub></b>	<b>-0,152</b>	<b>-0,358</b>	<b>-0,214</b>	<b>0,113</b>	<b>1</b>		
<b>P<sub>ads</sub></b>	<b>0,152</b>	<b>0,358</b>	<b>0,214</b>	<b>-0,113</b>	<b>-1,000</b>	<b>1</b>	
<b>P résine</b>	<b>-0,069</b>	<b>-0,206</b>	<b>-0,147</b>	<b>0,410</b>	<b>0,446</b>	<b>-0,446</b>	<b>1</b>

## Chapitre 2. DISCUSSIONS

### 2.1. Densité apparente, P total et stock en P des sols étudiés

#### 2.1.1. Densité apparente

La Da d'un sol exprime sa structure et sa porosité, en particulier son degré d'agrégation et d'adhésion (Yemefack et al., 2004). Les Da de tous les échantillons étudiés sont comprises dans la gamme normale de variation des Da pour les horizons A des sols cultivés qui est de 0,9 à 1,8 g cm<sup>-3</sup> (Muhinda et al, 2009). De même, la moyenne de l'ensemble et celles des trois horizons étudiés peuvent être considérés comme faible selon la classification de Kauffman et al (1995). La Da moyenne observée, 1,18 g cm<sup>-3</sup>, est proche de celle obtenue par Razafimahatratra (2011) sur Ferralsols non cultivés mais inférieure à celle obtenue par Raharimalala (2013) sur ces mêmes sols, qui équivaut à 1,39 g cm<sup>-3</sup>.

Selon Yoro et Godo (1990), la valeur de la Da peut fournir un renseignement sur l'évolution physique d'un sol soumis à diverses techniques culturales. Pour cela, la moyenne faible observée pour l'ensemble des échantillons étudiés permet de signaler une bonne cohérence et une bonne individualisation de leurs agrégats (Yemefack et al, 2004).

Une variabilité verticale des Da a été observée, comme l'a montré aussi de Boissezon (1965) in Yoro et Godo (1990), avec des valeurs plus faibles en surface qu'en profondeur. Cette variation est liée à la variation de la teneur en MO qui décroît au fur et à mesure que la profondeur augmente (Dabin, 1980) étant donné que le rôle essentiel des MO, avec les particules argileuses, est d'agir comme liant des agrégats des sols (Muhinda et al, 2009), ce qui fait que les horizons sous-jacents sont plus compacts.

Les effets de chaque mode de gestion de sols n'ont pas pu être distingués dans cette étude. Cela peut être dû au fait que la plupart de ces sols en SCV ne sont pas couverts et présentent une couverture sensiblement égale à celle des parcelles en conventionnelle. Ce qui fait que les rôles des MO dans les SCV ne se sont pas bien exprimés. En outre, cet absence d'effet peut être du au fait que la pratique du SCV est relativement récente et que des effets n'ont pas pu être mis en évidence compte tenu de la variabilité des données...

En revanche, les Da peuvent varier selon les groupes de sols. Dans cette étude, les sols à SFC montrent une Da moyenne plus élevée par rapport au groupe des sols à SSD. En général, les Da élevées peuvent indiquer le tassement d'un sol dont l'une des causes

probables pour les sols cultivés est le processus de désargilisation des horizons superficiels du sol pendant la période de cultures vivrières (Yemefack et al, 2004). Entre autre, le fait que les SFC aient une  $D_a$  plus importante peut être dû à l'importance des concrétions ferrifères qui ont une  $D_p$  plus importante, le Fe étant un élément « lourd » comparativement à Si ou à Al. Les minéraux silicatés ont une  $D_p$  de 2,6, alors que les minéraux ferrifères ont une  $D_p > 3$  (Becquer, Comm. perso.).

### **2.1.2.P total et stock en P des sols étudiés**

La teneur moyenne en P total de l'ensemble des échantillons est comprise dans la gamme de valeurs donnée par Rabeharisoa (2004) pour les sols ferrallitiques cultivés : 20-3000 mg P kg<sup>-1</sup>. Toutefois, la moyenne obtenue est légèrement inférieure à celles des sols ferrallitiques désaturés malgaches qui est de 1300 mg P kg<sup>-1</sup> (Rabeharisoa, 2004). De même, elle se trouve en dessous des moyennes observées par Rajaonarison (2012) dans la petite région agricole d'Andranomanelatra qui sont de 728, 758 et 890 mg P kg<sup>-1</sup> respectivement au niveau de parcelles de haut, milieu et bas de pente. Par contre, elle dépasse largement celle observée par Raharimalala (2013) dans les sols ferrallitiques non cultivés de Madagascar dont la moyenne en P total est de 433,36 mg P kg<sup>-1</sup> (étendue de 144,88 à 973,18 mg P kg<sup>-1</sup>).

Comme la teneur en P total, le stock en P des sols étudiés se situe dans la gamme de variation du stock en P des sols ferrallitiques cultivés énoncée par Rabeharisoa (2004) qui est de 400 à 2000 kg P ha<sup>-1</sup>.

Les différences de valeurs peuvent venir de la nature des matériaux originels. En effet, il est bien connu que les roches mères, ainsi que les processus pédogénétiques et la texture des sols, influent sur la teneur totale du P des sols (Cross et Schlesinger, 1994 ; Lamontagne, 2009). D'une façon générale, les sols cultivés présentent une teneur en P total supérieure à ceux des sols non cultivés. Ce qui suppose un appauvrissement en P dans les sols étudiés, qui peut être dû soit à un bilan négatif dû à un apport faible ou inexistant de fertilisants, soit à une exportation importante hors parcelle par voie de ruissellement ou d'érosion (Fourrie et al., 2011 ; Pierzynski et al., 2000). Rappelons que la zone du Moyen Ouest est très vulnérable à l'érosion avec un coefficient d'érodibilité élevé égal à 4,1 (Hanitra, 2012) et que les pertes par érosion peuvent atteindre 6,6 kg P ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> en systèmes conventionnels et 0,13 kg P<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> en systèmes SCV (Razafindramanana, 2011)

Par ailleurs, les méthodes culturales (fertilisation, gestion des résidus, rotation culturale) jouent un rôle important dans la teneur en éléments nutritifs des sols. En cas d'absence de fertilisation ou en cas d'apport faible par rapport aux besoins des cultures, des bilans négatifs sont à craindre. Les résultats de Rajaonarison (2012), ont démontré que de nettes différences de teneur en P total sont observées entre les différentes catégories d'exploitation, lesquelles diffèrent selon leur mode de fertilisation. Les grandes exploitations qui ont reçu des fertilisants organiques et minéraux présentent de plus grande teneur en P totale, avec une moyenne de  $1111 \text{ mg P kg}^{-1}$ , que les exploitations plus petite de la même région agricole d'Antsampanimahazo, région des hautes Terres.

Dans cette étude, même si les effets des SCV sur la teneur en P total n'ont pas pu être mis en évidence, une tendance à un accroissement de cette teneur est constatée au niveau des sols conduits sous ce mode de gestion. L'explication de l'absence de différence significative peut être la forte variabilité des valeurs observées par rapport à celles des parcelles sous conventionnel. Par contre le stock en P dans les sols sous conventionnel est significativement supérieur à celui des sols sous SCV en test unilatéral mais ne l'est pas en test bilatéral. Ceci exprime également une tendance qui peut être liée à la Da légèrement supérieure à celle des sols sous SCV.

Enfin, les sols SFC présentent une teneur moyenne en P total supérieure à celle des deux autres groupes. Ce résultat confirme que les réserves des sols ferrallitiques rajeunis sont moins importantes que celles des autres groupes de sols (Bourgeat et Aubert, 1971).

## **2.2. Acidité des sols, $P_{\text{ret}}$ et P disponible**

### **2.2.1. Acidité des sols**

Les sols étudiés présentent une acidité relativement faible dans l'ensemble puisque seulement 32% d'entre eux ont des pH en dessous de 5 au niveau de l'horizon 0-10 cm (et aucun avec un  $\text{pH} < 4$ ), et 18% et 8% au niveau des horizons 10-20 cm et 20-30 cm, respectivement. Ceci peut s'expliquer par les origines pédogénétiques de ces sols mais également de la végétation préexistante qui peut avoir une influence sur l'acidité des sols (Aubert, 1959). Les pH-eau et pH-KCl augmentent avec la profondeur. Ceci coïncide avec les descriptions des caractéristiques des sols ferrallitiques données par Zebrowsky et Ratsimbazafy (1979).

En ce qui concerne les écarts entre le pH-eau et le pH-KCl, la moyenne observée pour toutes les parcelles, tous horizons confondus, est de - 0,94. Cette valeur est inférieure à celle obtenue par Kauffman et al (1995) sur des sols ferrallitiques des forêts tropicales humides, qui est de -0,7. Les valeurs de  $\Delta\text{pH}$  mesurées dans les sols étudiés indiquent d'une part que les charges négatives dominent dans ces sols, du fait principalement de la teneur en matière organique. Le  $\Delta\text{pH}$  moyen, en valeur absolue, plus faible au niveau des parcelles SCV que celui des parcelles sous conventionnel, pourrait s'expliquer par l'augmentation de la teneur en MO sous ce système. La teneur en oxydes de ces sols est réduite comparativement aux teneurs en argiles et MO, étant donné qu'une forte teneur en oxydes rapproche la valeur de  $\Delta\text{pH}$  de 0 (Ségalen, 1994) et donne même parfois des  $\Delta\text{pH}$  positifs comme le cas des sols ferrallitiques ferritiques de la Nouvelle Calédonie (Becquer et al, 2001.).

### **2.2.2.P rémanent ( $P_{\text{ret}}$ ) et P disponible (P résine)**

#### **2.2.2.1.P rémanent et P adsorbé**

Selon Alvarez et da Fonseca (1991), la concentration initiale de 50 à 60 mg P kg<sup>-1</sup> permet de déterminer la capacité d'adsorption maximale en P des sols. Ainsi, pour les sols étudiés cette capacité d'adsorption maximale varie de 250 à 556 mg P kg<sup>-1</sup> avec une moyenne de 420 mg P kg<sup>-1</sup> correspondant à des  $P_{\text{ret}}$  allant de 4,43 à 34,98 mg P L<sup>-1</sup>, avec une moyenne de 18,03 mg P L<sup>-1</sup>. Cette valeur se situe dans la gamme de valeurs obtenue par Ramarason et al (2013) qui est de 1,20 à 47,40 mg P L<sup>-1</sup> avec une moyenne de 23,00 mg P L<sup>-1</sup>.

Malgré la diminution de l'acidité vers la profondeur, la rétention du P des sols étudiés a présenté une tendance inverse : elle augmente avec la profondeur. Ceci explique la corrélation positive obtenue entre le P adsorbé et les deux pH, et donc la corrélation négative entre le P rémanent et les deux pH. Normalement, la baisse de pH du sol favorise la protonation des constituants à charges variables (Dubus, 1997b). Il devrait donc y avoir une rétention plus importante dans les horizons les plus acides (surface). Néanmoins, l'augmentation de l'adsorption en profondeur a déjà été observée dans d'autres groupes de sols ferrallitiques tels que des sols très riches en oxydes d'Al de Nouvelle-Calédonie, où l'explication a été la diminution du taux de MO au sein du profil (Becquer et al, 1997). Ainsi, dans cette étude, l'augmentation du pH semble favoriser la rétention du P. La présence d'acides organiques dans les horizons de surface, qui s'adsorbent sur les charges de surface

(Haynes et Mokolobate, 2001) contrebalancent l'effet du pH dans ces sols et limitent la sorption de P.

Hormis les variations de teneur en MO et de pH, la composition minéralogique peut jouer également un grand rôle dans les variations de rétention du P dans les sols étudiés. En effet, compte tenu de leur caractère amphotère, les oxydes de Fe et d'Al sont connus comme étant les principaux responsables de la rétention du P dans les sols ferrallitiques. Par ailleurs, il est également connu que les formes amorphes ont une capacité de rétention élevée par rapport aux formes cristallines (Fontes et Weed, 1996). Par conséquent, les analyses minéralogiques des échantillons et de leur teneur en oxyhydroxydes peuvent s'avérer nécessaires pour vérifier les rôles de ces derniers dans cette rétention d'autant plus que les teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  des sols varient suivant le matériau parental (Drouet, 2010).

En termes de pourcentage, le taux d'adsorption en P de ces sols varie de 42% à 93%. Parmi eux, 75% des sols ont un taux d'adsorption inférieure à 77%, ce qui montre que les sols ferrallitiques étudiés représentent en générale une capacité d'adsorption faible, comparée à celle de sols ferrallitiques riches en oxydes de Nouvelle Calédonie, dont le taux d'adsorption est supérieur à 75% (Becquer et al, 2001).

#### **2.2.2.2. P disponible**

Les teneurs en P disponible obtenues oscillent entre 0 et 16,50 mg P  $\text{kg}^{-1}$  avec une moyenne de 2,02 mg P  $\text{kg}^{-1}$ , soit moins de 1% du P total. Cette gamme de valeur observée est plus étendue que celle obtenue par Rajaonarison (2012) dans la région agricole d'Andranomanelatra qui est de 0,02 à 7,48 mg P  $\text{kg}^{-1}$ . De même, la moyenne obtenue dans cette zone toujours par le même auteur est légèrement en dessous de celle obtenue dans cette étude.

Selon Muhinda et al. (2009), la valeur minimale en P disponible de 20 mg  $\text{P}_2\text{O}_5$   $\text{kg}^{-1}$ , soit l'équivalent de 8,73 mg P  $\text{kg}^{-1}$ , est requise pour assurer une nutrition phosphatée appropriée de la plupart des plantes. Van Raij et al (1996) in Campos Bernardi et al (2012) donne une classification de la fertilité du sol suivant les valeurs de P résine des sols et suivant la catégorie de culture (tableau 3).

**Tableau 3 : Classification de la fertilité phosphatée des sols selon la valeur de P disponible**

Classification de la fertilité	P résine (mg P kg <sup>-1</sup> )			
	Sylviculture	Culture pérenne	Culture annuelle	Horticulture
Très basse	0-2	0-5	0-6	0-10
Basse	3-5	6-12	7-15	11-25
Moyenne	6-8	13-30	16-40	26-60
Elevée	9-16	31-60	41-80	61-120
Très élevée	>16	>60	>80	>120

*Adaptée de Campos Bernardi et al (2012)*

En se référant au tableau 3, seule une parcelle présente une fertilité phosphatée moyenne, la majorité présente une fertilité très basse. Ceci montre que l'alimentation phosphatée constitue un problème majeur au niveau de ces sols comme dans la plupart des sols ferrallitiques. Cette fertilité basse est liée à la capacité d'adsorption de P de ces sols. Ce problème est accentué par le faible apport de phosphates solubles en sols cultivés vu qu'à Madagascar la consommation en engrais complexe NPK demeure en dessous de 10 kg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> (Hanitra, 2012) alors qu'une quantité de 10 à 15 fois plus importante serait nécessaire pour une alimentation adéquate des cultures. La faiblesse des apports phosphatés provoque une migration du Pi vers des compartiments de moins en moins accessibles aux plantes. Il y a donc un risque de «vieillissement des réserves phosphatées» dans ces sols d'autant que ce vieillissement y est intense et rapide.

En outre, une corrélation positive même faible ( $r=0,410$ ) a été observée entre la teneur en P disponible des sols et leur teneur en P total, ce qui veut dire que l'augmentation de l'une des deux teneurs influe sur la valeur de l'autre. Ce résultat concorde avec celui de Rajaonarison (2012). De même, les teneurs en P disponible sont corrélées positivement avec les teneurs de  $P_{rét}$  ( $r=0,446$ ). Ceci s'explique par le fait que les quantités en solution dans le sol proviennent des fractions labiles susceptibles d'être mises en solution.

Toutefois, aucune corrélation significative n'a été observée entre le pH-eau et le P disponible. Donc, la variation du pH des sols n'a aucune influence sur les teneurs en P disponible des sols. Ainsi, dans les sols étudiés l'effet MO prédomine, d'une part, en

favorisant la désorption des Pi fixés sur les particules du sol (Dubus, 1997b), et d'autre part, en alimentant le pool alimentaire en P des sols. En effet, Chapuis-Lardy et Brossard (1996) ont observé au niveau des sols ferrallitiques brésiliens que plus de 50% du Po de l'horizon de surface est aisément extractible, et doit être considéré comme une source potentielle de Pi pour la solution du sol. En outre, une corrélation positive a été déjà observée entre la teneur en MO des sols ferrallitiques et leur teneur en P disponible (Eberhardt et al, 2008).

## **2.3. Validation des hypothèses**

### **2.3.1. Hypothèse 1 : « La fertilité phosphatée des sols ferrallitiques du Moyen Ouest de Madagascar est proche de celle des autres sols ferrallitiques d'autres zones de l'île »**

Bien que la teneur moyenne en P disponible des sols étudiés soit légèrement supérieure à celle obtenue dans la zone d'Andranomanelatra, elle demeure très basse selon la classification de Van Raij et al (1996). Ce qui signifie que les fertilités phosphatées des zones sont proches et également que la fertilité phosphatée de la zone étudiée ne diffère pas beaucoup de celle d'autres zones avec des sols ferrallitiques. Le P reste un des facteurs limitant la productivité de ces sols.

### **2.3.2. Hypothèse 2 : « Les modes de gestion influencent l'acidité des sols ainsi que les teneurs et le comportement du P dans les sols agricoles »**

A l'issue de cette étude, les effets significatifs des deux modes de gestion du sol ont été observés sur six des neuf paramètres étudiés à savoir pH-KCl,  $\Delta$ pH,  $P_{ret}$ ,  $P_{ads}$ , P résine et stock en P des sols. Les valeurs obtenues au niveau du pH-eau, de la Da et du P total ne les distingue pas l'un de l'autre même si une tendance à l'accroissement du P total peut être supposé au niveau du système SCV. Si le SCV diminue le pH-KCl et  $\Delta$ pH, il permet d'augmenter la disponibilité du P des sols en diminuant la quantité adsorbée et en augmentant la concentration à l'équilibre entre la phase solide et la solution dans ces sols même si leur stock moyen en P est inférieur au mode conventionnel. Cette hypothèse est donc en partie vérifiée dans notre cas.

### **2.3.3. Hypothèse 3 : « Les différences de fertilité phosphatée peuvent être significatives entre les différents groupes de sols de la zone du Moyen Ouest »**

Des différences significatives ont été observées pour huit des neuf paramètres

étudiés. L'unique paramètre qui ne présente pas d'effet significatif lié au type de sol est le P disponible. Les trois groupes de sol ferrallitique étudiés sont analogues quant à leur teneur en P disponible. Ceci signifie que le type de sol de la zone d'étude ne joue en rien sur la disponibilité du P dans les sols. Du point de vue ambiance physico-chimique et densité apparente, les sols à SPD présentent les meilleures conditions pour les cultures. En ce qui concerne la rétention en P, les sols à SSD retiennent moins que les deux autres groupes. Par contre, les teneurs et les stocks en P sont les plus élevés au niveau des sols à SFC. Ceci valide par conséquent cette troisième hypothèse.



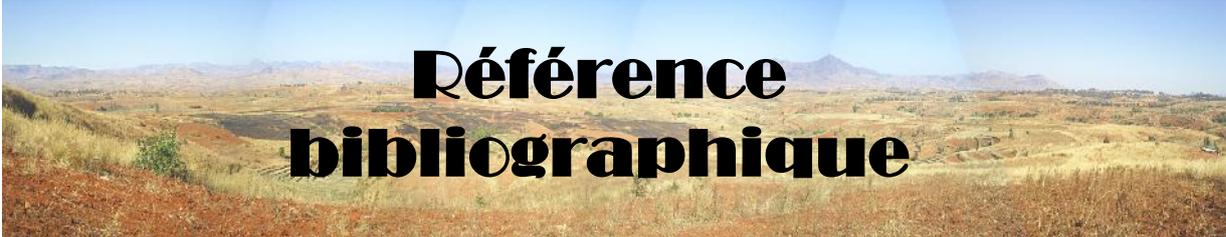
## CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Les résultats de cette étude sur les teneurs et la rétention du P des sols ferrallitiques d'une zone du Moyen Ouest de Madagascar révèlent une pauvreté de ces sols vis-à-vis de cet élément. Bien que la teneur en P total des sols semble élevée et que la quantité de P adsorbé par la plupart des sols se trouve dans une gamme moyenne pour des sols ferrallitiques, leur teneur en P disponible demeure faible.

Les explications sur la variabilité de l'adsorption et de la teneur en P disponible n'ont pas pu être discutées davantage vu que les données sur la minéralogie et les teneurs en oxyhydroxydes de ces sols n'ont pas pu être effectuées. En effet, la minéralogie des sols influence également la teneur en P disponible des sols (Eberhardt et al, 2008). Cet effet de la minéralogie explique probablement pour une large part la diminution de la teneur de  $P_{ret}$  et de la disponibilité du P (P résine) en profondeur ou les variations des valeurs de ces paramètres entre les divers sols de la zone d'étude.

Une observation majeure de cette étude porte sur les effets des deux modes de gestion des sols. Nous avons pu montrer un effet hautement significatif du SCV sur l'adsorption du P, comparativement au système conventionnel, qui se traduit par une amélioration notable de la disponibilité du P, même si elle reste limitée.

Cette étude ouvre de nouveaux horizons sur de nouvelles recherches afin d'élucider les problèmes de pauvreté chimique, notamment phosphatée, des sols ferrallitiques du Moyen Ouest de Madagascar. Cependant, les résultats de cette étude impliquent des mesures de redressement susceptibles d'être apportées au niveau de ces sols. Du fait du coût élevé en engrais phosphatés à Madagascar, les actions amélioratrices qui peuvent être apportées consistent en premier lieu à l'amélioration du caractère intrinsèque des sols par le biais de la correction de l'acidité. Ceci peut se faire soit par chaulage soit par l'accroissement de la teneur en MO de ces sols.



**Référence  
bibliographique**

## Référence bibliographique

- Achat, D., 2009.** Biodisponibilité du phosphore dans les sols Landais pour les peuplements forestiers de pin maritime. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1, Ecole doctorale Sciences et Environnements, spécialité : Ecologie évolutive, fonctionnelle et des communautés. 241 p + annexes
- Alvarez, V.H. et da Fonseca, D.M., 1991.** Definição de doses de fosforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 14, 49-55.
- 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, Université d'Antananarivo.
- Aubert, G., 1959.** Influence de la végétation sur le sol en zone tropicale humide et semi-humide *in* Influence de la végétation sur le sol : Influence de la végétation sur les processus de la pédogenèse. Collection de référence n°14289 ORSTOM : 11-22
- Aubert, G., 1965.** Classification des sols : Tableaux des Classes, Sous-classes, Groupes et Sous-groupes de Sols utilisés par la Section de Pédologie de ORSTOM. Cahiers ORSTOM, Série Pédologie, III (3), 269-288.
- Beaudin, J., 2006.** Revue de littérature : Mobilité du Phosphore, Version finale. Comité Ad hoc Mobilité du Phosphore CRAAQ. AAC, AFEQ, CRAAQ, IRDA, MAPAQ Canada. 111 p. + annexes.
- Beaudin, I., Michaud, A., Beudet, P., Giroux, M., 2008.** La mobilité du phosphore : du sol au cours d'eau. Fiche technique n°1. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. Publication EVC 14. 8p.
- Becquer, T. Bourdon, E., Petard, J., Moreau, R., Duwig, C., Herbillon, A.J., 2001.** Mineralogical, chemical and charge properties of Geric Ferralsols from New Caledonia. Geoderma, 103, 291–306
- Becquer, T., Duwig, C., Dubus, I., Bourdon, E., Nigote, W., Vincent, V., Bonzon, B., 1997.** Etude des risques de dégradation de la fertilité des sols et de pollution des lentilles d'eau douce. Note de synthèse de l'avenant 3. ORSTOM Nouméa, Conventions Sciences de la Vie, Agropédologie (43) 20 p.
- Bilong, P., 1992.** Caractères des sols ferrallitiques à plinthite et à pétroplinthite développés sur roches acides dans la zone forestière du sud du Cameroun : Comparaison avec les sols développés sur roches basiques. Cahier ORSTOM, série Pédologie, XXVII (2), 203-224
- Boissezon, P. de, 1970.** Étude du complexe absorbant des sols ferrallitiques forestiers de Côte d'Ivoire. Cahier ORSTOM, série Pédologie, VIII (4), 391-418
- Boissezon, P. de, 1973.** - Les matières organiques des sols ferrallitiques , *in Les sols ferrallitiques*, Tome 1 : 9-66, Paris, ORSTOM, I.D.T. 21, 146 p.
- Bolan, N.S., 1991.** A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. Plant and Soil, 134, 189-207

- Bolland, M.D.A., Allen, D.G. et Barrow, N.J., 2003.** Sorption of phosphorus by soils: how it is measured in Western Australia? Revision 2006. Department of Agriculture-Government of Western Australia, Chemistry Center, GRDC. Bulletin 4591. 31p.
- Boukemara, L., 2009.** Etude de l'Adsorption des ions Phosphate sur des oxy-hydroxydes, cas de l'hydroxyde de fer. Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Magister en Chimie. Université Mentouri de Constantine, Faculté des Sciences exactes, Département de chimie. 84 p + annexes
- Bourgeat, F., Aubert, G., 1971.** Les sols ferrallitiques à Madagascar, Collection Sciences de la terre, ORSTOM, Centre de Tananarive. 31 p + Annexes.
- Campos Bernardi, A. C. de, Oliveira, P. P. A., et Primavesi, O., 2012.** Soil Fertility of Tropical Intensively Managed Forage System for Grazing Cattle in Brazil *in Soil Fertility Improvement and Integrated Nutrient Management - A Global Perspective*, Dr. Joann Whalen (Ed.) 37-56
- Chapuis-Lardy, L., Brossard, M., 1996.** Réserve et stabilité biochimique du phosphore organique de sols ferrallitiques (Cerrados, Brésil). 7 p.
- Compaoré, E., Fardeau, J.C., Morel, J.L., Sedogo, M.P., Inera, 2001.** Le phosphore biodisponible des sols : une des clés de l'agriculture durable en Afrique de l'Ouest. Cahiers Agricultures, 10(2), 81-85.
- Cosgrove, D.J., 1967.** Metabolism of Organic Phosphates in Soil *In Soil Biochemistry*. Douglas McLaren, A & Peterson, G.H. Edition. Marcel Dekker Inc. New York, USA. Part I, Chapter 9: 216-228
- Cross, A.F. et Schlesinger, W.H., 1995.** A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. Geoderma, 64, 197-214.
- Dabin, B., 1980.** Les matières organiques dans les sols tropicaux normalement drainés. Cahier ORSTOM, série Pédologie, XVIII (3-4), 197-215.
- Dabin, B., 1985.** Les sols tropicaux acides. Cahier ORSTOM, série Pédologie, XXI (1), 7-19
- Djondo, M.-Y., 1995.** Propriétés d'échange ionique des sols ferrallitiques argileux de la vallée du Niari et sableux du plateau de Mbe-Bateke au congo : Application à la correction de leur acidité. Document ORSTOM Montpellier, 1995, n° 5. 258 p.
- DRMAC (Direction de la recherche/Ministère de l'Agriculture du Canada), 1976.** Glossaire des termes de la Science des sols. Publication 1459. 44 p.
- Drouet, T., 2010.** Pédologie. BING-F-302. 138 p. [Base de données en ligne]. Format PDF. Disponible sur <http://www.ulb.ac.be/sciences/lagev>. Consulté le 06.05.13
- Dubus, I., 1997a.** Étude au laboratoire de la rétention du phosphore dans les sols ferrallitiques allitiques de l'île de Maré. Conventions sciences de la vie, Agropédologie, n°40. ORSTOM/ L'institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération. 45p.
- Dubus, I., 1997b.** La rétention du phosphore dans les sols: principe d'étude, modélisation, mécanismes et compartiments du sol impliqués. Documents Scientifiques et techniques n° III3, Edition ORSTOM Centre Nouméa, Nouvelle Calédonie. 74p.

- Dubus, I. et Becquer, T., 2001.** Phosphorus sorption and desorption in oxide rich Ferralsols of New Caledonia. *Australian Journal of Soil Research*, 39, 403-414.
- Duchaufour, Ph., 1985.** La notion de processus élémentaire de pédogenèse définie par Gerassimov : ses différentes possibilités d'utilisation. *Science du sol* n° 196/2 - pp. 163-170 - Plaisir-France
- Dunne, E., Culleton, N., O'Donovan, G., Harrington, R., 2005.** Phosphorus retention and sorption by constructed wetland soils. End of project report RMIS 4649A, Teagasc Agriculture and Food Development Authority. Johnstown Castle Research Centre, Wexford. 44 p: 1-7.
- Eberhardt, D.N., Vendrame, P.R.S., Becquer, T. et Guimarães, M.F., 2008.** Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em latossolos sob pastagens no cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1009-1016
- Ehlers, K., 2010.** Composition and dynamics of the microbial phosphorus pool in a ferralsol. A dissertation submitted to the ETH Zürich for the degree of Doctor of Sciences. Justus-Liebig-Universität Giessen, Germany. 125 p.
- FAO, 2001.** Lecture notes on the major soils of the world. *World Soil Resources Reports* 94. Rome 2001. 334 p : 155-162.
- Fontes, M.P.F. & Weed, S.B., 1996.** Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and Mineralogy. *Geoderma*, 72, 37-51.
- Fourrie L. ; Butler F. ; Castillon P. ; Hanocq D. ; Fougère M. ; Levasseur P. ; Gascuel C. ; Dorioz J.M. ; Morel C. ; Raison C. ; Aubert C., 2011.** Le phosphore d'origine agricole : diagnostics et solutions pour limiter les transferts vers le milieu aquatique. *Collection Acta, Innovations Agronomiques* 17, p. 15-32.
- Frossard, E., Julien, P., Neyroud, J-A et Sinaj, S., 2004 :** Le phosphore dans les sols. État de la situation en Suisse. *Cahier de l'environnement* n° 368. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 180 p.
- Guppy, C.N., Menzies, N.W., Moody, P. W., Blamey, F.P.C., 2005.** Competition sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: review. *Australian Journal of Soil Research*, 43, 189-202
- Hanitra, V., 2012.** Rapport sur l'Etat de l'Environnement à Madagascar, Chapitre 4 : Sol, 129 p : 101-129. Madagascar.
- Harter, R.D., 2007.** Les sols Acides des Tropiques. *Echo Note Technique*. Université du New Hampshire, USA. 12 pages
- Haynes, R.J. et Mokolobate, M.S., 2001.** Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 59, 47-63.
- Hervieu, J., 1967.** Géographie des sols malgaches. Essai synthétique. *Cahier ORSTOM*, 44 p.
- Hinsinger, P., 2001.** Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil*, 237, 173-195
- Houmane, B., Gallali, T., Guillet, B., 1986.** Désorption du phosphore fixé sur des oxydes de fer. *Science du sol*, 2, 171-182.

- Husson, O, Charpentier, H., Raharison, T., Razanamparany, C., Moussa, N., Rasolomanjak, J., Michellon, R., Naudin, K., Rakotoarinivo, C., Rakotondramanana, Enjalric, F., Seguy, L., 2012.** Manuel pratique du semis direct à Madagascar. Volume IV : Les systèmes SCV à proposer, Climat de moyenne altitude (600 - 1100 m) avec longue saison sèche (> 6 mois) Lac Alaotra et Moyen-Ouest. Edition GSDM/CIRAD. 60 p.
- Hyland, C., Ketterings, Q., Dewing, D., Stockin, K., Czymmek, K., Albrecht, G., Geohring L., 2005.** Phosphorus basics – The Phosphorus Cycle. Agronomy Fact Sheet Series, n°12, Cornell University Cooperative Extension, College of Agriculture and Life Sciences, Department of Crop and Soil Sciences. 2 p.
- IRDA – CRAAQ, 2008.** Les sources, les formes et la gestion du phosphore en milieu agricole. Fiche technique n°2. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 12p.
- ISMA Ltd, 1990.** Guide sur la fertilisation phosphatée. Imprimerie J. Duculot-Gembloux. Belgique. 282p.
- Kauffman, J.H., Sombroek, W.G., et Mantel, S., 1995.** Soils of tropical rainforests : Characterization and major constraints of dominant soils. ISRIC. Working paper and Preprint (09), Netherlands, 20 p.
- Kuo, S., 1996.** **Phosphorus** in SSSA Book Series 5: Methods of Soils Analysis, Part 3 : Chemical Methods. Wisconsin, USA. Chapter 32: 869-919.
- Lamontagne, M.-H., 2009.** Relation entre les fractions biogéochimiques et la saturation du phosphore dans les sols, Maître ès sciences (M.Sc.) Université Laval, Maîtrise en microbiologie agricole. [Base de données en ligne]. Format World Wide Web. Disponible sur <http://theses.ulaval.ca/>. Consulté le 16.05.13
- MAEP-UPDR, 2003.** Monographie de la région de Vakinkaratra. 108 p + Annexe + Cartes.
- Mathieu, C. et Pieltain, F. 2003.** Analyse chimique des sols : Méthodes choisies. Edition Lavoisier. P. 1-20, 239-292
- Messiga, A.J.N.A., 2010.** Transferts du phosphore dans les sols de grandes cultures. Thèse présentée à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de doctorat en sols et environnement pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph. D.). Département des sols et de Génie agroalimentaire, Faculté des Sciences de L'Agriculture et de l'Alimentation, Université Laval Québec.
- Morel, C., 2002.** Caractérisation de la phytodisponibilité du phosphore du sol par la modélisation du transfert des ions phosphates entre le sol et la solution : Considérations théoriques et analyses du cycle du P et du comportement des plantes dans les parcelles de grandes cultures. Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches. INRA-Bordeaux- Institut National Polytechnique de Lorraine. 80 p.
- Moureaux, Cl., 1973.** Cours de microbiologie du sol. ORSTOM, 164 p.
- Muhinda, J.J.M., Nzeyimana, I., Bucagu,C. et Culot, M., 2009.** Caractérisation physique, chimique et microbiologique de trois sols acides tropicaux du Rwanda sous jachères naturelles et contraintes à leur productivité. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, 13 (4), 545-558.

- NZIC (New Zealand Institute of Chemistry), 2013.** Chemicals and Soils: Plant Nutrition, Lime, Acidity, Phosphate. 41 p. [Base de données en ligne]. Format Pdf. Disponible sur <http://nzic.org.nz/ChemProcesses/soils/>. Consulté le 15.05.13
- Pansu, M. et Gautheyrou, J., 2003.** L'analyse du sol : minéralogique, organique et minérale. Springer-Verlag France. 993 p.
- Pierzynski et al., 2000.** Methods of Phosphorus Analysis for soils, sediments, residuals, and water. Southern Cooperative Series, bulletin No. 396. Publication of SERA-IEG 17. 110 p: 1-69 p
- Provencher, M., 2003.** Évaluation spatiale de l'efficacité agronomique du LIOR dans la pomme de terre. Mémoire pour l'obtention de Maître ès sciences (M.Sc.), Maîtrise en sols et environnement, Département des sols et génie agroalimentaire, Faculté de l'agriculture et de l'alimentation Université Laval. [Base de données en ligne]. Format World Wide Web. Disponible sur <http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/21137/ch02.html>. Consulté le 01.03.13
- Qian, P., Schoenau, J.J. et Ziadi, N., 2006.** Ion Supply Rates Using Ion-Exchange Resins in *Soil Sampling and Methods of Analysis, Second Edition, Chapter 13*. Canadian Society of Soil Science. Edited by M.R. Carter and E.G. Gregorich. Printed by Taylor & Francis Group, LLC. 161-165
- 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, Département de Biologie et Ecologie végétales, Faculté des Sciences – Université d'Antananarivo. 185p + Listes des figures, des tableaux + Annexes.
- Raharimalala, N. D., 2013.** Evaluation du stock de carbone et de la teneur en phosphore total dans divers types de sols à Madagascar. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'études approfondies, Département des Eaux et Forêts, École Supérieure des Sciences Agronomiques - Université d'Antananarivo. 46 p + références et annexes
- Rajaonarison, A.H., 2012.** Caractérisation des propriétés chimiques des sols ferrallitiques dans le cadre du diagnostic agronomique des composantes de rendement du riz pluvial dans la zone d'Antsanimahazo (Hautes Terres de Madagascar). Mémoire en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Sciences Agronomiques, Université ASJA Antsirabe
- Ramaroson et al, 2013.** The potential of NIR and MIR spectroscopy to predict the P retention capacity of Malagasy and Brasilan uplands soils. 2 p.
- Randriamanantsoa L., 2013.** Effet d'apports de résidus de légumineuse et de fumier sur la dynamique du phosphore organique du sol dans un Ferralsol du Moyen Ouest de Madagascar. Thèse présentée à l'École Supérieure des Sciences Agronomiques d'Antananarivo en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques. 126 p + Annexes
- Rasaimbainarivo, J.H. et Ranaivoarivelo, N., 2004.** Profil fourrager, Madagascar. FAO. 24p.
- Razafimahatratra, H.M., 2011.** Sols malgaches et spectroscopie dans le moyen infrarouge : classification, caractérisation et sensibilité au climat. Thèse de Doctorat, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo. 201 p : 5-25p.

- Razafindramanana R. N. C., 2011.** Contrôle des pertes en terre, en Carbone et en nutriments par érosion hydrique sous Systèmes en Semis Direct sur Couverture Végétale permanente des Hautes-Terres Centrales Malgaches. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, Ecole Supérieure en Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo. 123 p + Références et annexes
- Riquier, J., 1966a.** La matière organique dans les sols ferrallitiques. Cahier ORSTOM, série Pédologie, IV (4), 33-37
- Riquier, J., 1966b.** Définition et classification des sols ferrallitiques de Madagascar, Cahier ORSTOM, série Pédologie, IV (4), 75-89.
- Roederer, P., 1971.** Les sols de Madagascar. Collection Sciences de la terre n°5, ORSTOM Centre de Tananarive. 56 p
- Saporta, G., 1978.** Théories et méthodes de la statistique. Edition Technip, Paris et Institut Français du Pétrole, France. 385 p.
- Scudiero, E., 2009.** The significance of resorption during anoxic mobilization of phosphorus. Tesi di Laurea specialistica, Scienze e tecnologia per l'ambiente ed il territorio, Università degli studi di Padova, Facoltà di Scienze MM.FF.NN. – Agraria. 78 p +Annexe : 1-36.
- Ségalen, P., 1969.** Contribution à la connaissance de la couleur des sols a sesquioxides de la zone intertropicale: sols jaunes et sols rouges. Avec la collaboration technique de Mme F. ROBIN. Cahier ORSTOM, série Pédologie, VII (2), 225-236. France
- Ségalen, P., 1994.** Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique, Tome 1, 2, 3. Institut Français De Recherche Scientifique Pour Le Développement En Coopération. Éditions de l'ORSTOM. Collection ÉTUDES et THESES
- Skogley, E.O., Dobermann, A., 1996.** Synthetic Ion-Exchange Resins: Soil and Environmental Studies. Journal of Environmental Quality, 25 (1), 13-24.
- Soltner, D., 2005.** Les bases de la production végétale, tome 1 : Le sol et son amélioration. 24<sup>ème</sup> édition, Collection Sciences et Techniques agricoles. Imprimerie Prouteau, Bressuire 79303. France. 472 p.
- Tessier, D., Bruand, A., Le Bissonnais, Y. et Dambrine, E., 1996.** Qualité chimique et physique des sols : Variabilité spatiale et évolution. Etude et Gestion des Sols, 3, 4, 1996, pages 229-244- Numéro Spécial. Forum « Le sol, un patrimoine menacé ? » Paris, 24 octobre 1996
- Thomas, G.W., 1996.** Soil pH and Soil Acidity *in* SSSA Book Series 5: Methods of Soils Analysis, Part 3 : Chemical Methods. Winsconsin, USA. Chapter 16: 475-490 p.
- Turner, B.L., 2006.** Organic phosphorus in Madagascan rice soils. Geoderma 136 (2006) 279–288.
- Van Raij, B., 1998.** Bioavailable tests: alternatives to standard soil extractions. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 36 (15 & 16), 1553-1570
- Yemefack, M., Nounamo, L., Njomgang, R; et Bilong, P., 2004.** Influence des pratiques agricoles sur la teneur en argile et autres propriétés agronomiques d'un sol ferrallitique au sud Cameroun. Tropicultura, 22 (1), 3-10

**Yoro, G., et Godo, G., 1990.** Les méthodes de mesure de la densité apparente Analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné. Cahiers ORSTOM, série. Pédologie. XXV (4),423-429

**Zebrowski, C., et Ratsimbazafy, C., 1979.** Carte pédologique de Madagascar 1/100.000 : Feuille Antsirabe. Note explicative n°83, ORSTOM. Paris. 104 p + planches



## Annexe 1 : Liste des parcelles de prélèvement

**Tableau 4 : Liste des parcelles de prélèvement**

N° LRI	nom agriculteur	Localité	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Toposéquence	Type de sol	système	Culture 2012-2013	organisme
42405-42409	R.Berthine	Vinany	46,48771	-19,62306	1040	plat	Ferrallitique	Conventionnel	Haricot	FOFIFA
42410-42414		Ankazomiriotra	46,55878	-19,66639	1168	légèrement en pente	Ferrallitique	SCV	Stylosanthès+ Riz pluvial	FAFIALA
42415-42419		Ankazomiriotra	46,56035	-19,65975	1175	plat	Ferrallitique	Conventionnel	Haricot	FOFIFA
42420-42424		Ankazomiriotra	46,54742	-19,65975	1159	plat	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial	FAFIALA
42425-42429		Vinany	46,46486	-19,60666	1032	plat	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial	FAFIALA
42430-42434		Vinany	46,4689	-19,61232	1026	plat	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial	FAFIALA
42435-42439		Vinany	46,4763	-19,6106	1064	plat	Ferrallitique	SCV	Stylosanthès (jachère)	FAFIALA
42440-42444		Vinany	46,47609	-19,61079	1057	plat	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial	FAFIALA
42445-42449		Ankazomiriotra	46,51278	-19,64516	1068	légèrement en pente	Ferrallitique	Conventionnel	Haricot	FOFIFA
42450-42454		Ankazomiriotra	46,51263	-19,64517	1067	légèrement en pente	Ferrallitique	SCV	Stylosanthès (jachère)	FAFIALA
42455-42459	R.Noeline	Inanantonana	46,61725	-19,64122	1317	plat	Ferrallitique	SCV	Stylosanthès (jachère)	FAFIALA
42460-42464	R.Noeline	Inanantonana	46,6176	-19,64251	1324	plat	Ferrallitique	SCV	Stylosanthès (jachère)	FAFIALA
42465-42469	Rasolofo Rakotoniaina	Inanantonana	46,61447	-19,64343	1302	plat	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial	FAFIALA
42469-42474		Inanantonana	46,62972	-19,64876	1337	plat	Ferrallitique	SCV	Stylo+Maïs	FAFIALA
72475-42479	Ramanjato	Vinany	46,45692	-19,6033	1015	plat	Ferrallitique	SCV	Stylosanthès (jachère)	FAFIALA
42480-42484	Razakaso bien Aimé	Vinany	46,45784	-19,60403	1006	en pente	Ferrallitique	SCV	Stylosanthès (jachère)	FAFIALA

N° LRI	nom agriculteur	Localité	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Toposéquence	Type de sol	système	Culture 2012-2013	organisme
42485-42489	Jean Roger	Vinany	46,46404	-19,61623	999	plat	Ferrallitique	SCV	Stylosanthès (jachère)	FAFIALA
42490-42494		Vinany	46,46396	-19,61576		plat	Ferrallitique	SCV	Stylosanthès (jachère)	FAFIALA
42495-42499	Razanadraibe Matilde	Inanantonana	46,63279	-19,69	1146	en pente	Ferrallitique	SCV	Stylosanthès (jachère)	FAFIALA
42500-42504	R.Noeline	Inanantonana	46,63461	-19,64203	1316	plat	Ferrallitique	SCV	Stylosanthès (jachère)	FAFIALA
42505-42509	Rakotomandroso Michel	Inanantonana	46,63355	-19,65465	1314	plat	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial	FAFIALA
42510-42514	Rasoafara M. Henriette	Inanantonana	46,63102	-19,65957	1291	plat	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial+Maïs	FAFIALA
42515-42519	R.Noeline	Inanantonana	46,62867	-19,66803	1239	légèrement en pente	Ferrallitique	SCV	Stylosanthès (jachère)	FAFIALA
42520-42524	Randrianony Léonard	Vinany	46,50122	-19,62475	1038	plat	Ferrallitique	SCV	Stylosanthès (jachère)	FAFIALA
42525-42529	Rakotondrasoa Victor	Vinany	46,50098	-19,62575	1039	légèrement en pente	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial	FAFIALA
42530-42534	R.Jeanette	Vinany	46,48575	-19,6136	1040	plat	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial	FAFIALA
42535-42539	Hantarilala Elysa	Vinany	46,47069	-19,61131	1041	plat	Ferrallitique	SCV	Stylosanthès (jachère)	FAFIALA
42540-42544	R.Grégoire	Vinany	46,48925	-19,62833	1036	plat	Ferrallitique	SCV	Stylosanthès (jachère)	FAFIALA
42545-42549		Ankazomiriotra	46,5373	-19,666	1128	plat	Ferrallitique	Conventionnel	Haricot	FOFIFA
42550-42554	R.Noeline	Inanantonana	46,6221	-19,68918	1171	plat	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial	FAFIALA
42555-42559		Ankazomiriotra	46,55919	-19,66825	1174	légèrement en pente	Ferrallitique	Conventionnel	Haricot	FOFIFA
42560-42564		Ankazomiriotra	46,5612	-19,6563	1183	en pente	Ferrallitique	Conventionnel	Haricot	FOFIFA
42565-42569		Ankazomiriotra	46,5608	-19,6562	1184	plat	Ferrallitique	Conventionnel	Haricot	FOFIFA
42570-42574		Ankazomiriotra	46,5372	-19,6676	1132	plat	Ferrallitique	Conventionnel	Haricot	FOFIFA
42575-42579		Ankazomiriotra	46,5381	-19,6756	1141	plat	Ferrallitique	Conventionnel	Haricot	FOFIFA

N° LRI	nom agriculteur	Localité	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Toposéquence	Type de sol	système	Culture 2012-2013	organisme
42580-42584		Vinany	46,48101	-19,6	1028	plat	Ferrallitique	SCV	Stylo+Maïs	FAFIALA
42585-42589		Vinany	46,48061	-19,60087	1025	plat	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial	FAFIALA
42590-42594		Vinany	46,48083	-19,60286	1038	plat	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial	FAFIALA
42595-42599	Raveloson Ernest	Vinany	46,46904	-19,60906	1015	plat	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial	FAFIALA
42600-42604	Andriamanana Faramalala	Ankazomiriotra	46,52069	-19,67214	1103	plat	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial+Maïs	FAFIALA
42605-42609	R.Louis	Ankazomiriotra	46,57457	-19,6941	1126	légèrement en pente	Ferrallitique	SCV	Stylosanthès (jachère)	FAFIALA
42610-42614	R.Fredson	Ankazomiriotra	46,55803	-19,68238	1158	plat	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial	FAFIALA
42615-42619	R.Perline	Ankazomiriotra	46,58884	-19,69271	1140	plat	Ferrallitique	SCV	Stylosanthès (jachère)	FAFIALA
42620-42624	Rakotondrafara J.sylvain	Ankazomiriotra	46,57366	-19,67472	1136	plat	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial	FAFIALA
42625-42629	R.Fredson	Ankazomiriotra	46,55055	-19,66527	1155	légèrement en pente	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial	FAFIALA
42630-42634	R.James	Ankazomiriotra	46,57841	-19,67492	1150	légèrement en pente	Ferrallitique	SCV	Stylo+Riz pluvial	FAFIALA
42635-42639	Rakotondrasoa Pierre	Vinany	46,45345	-19,57205	972	plat	Ferrallitique	SCV	Maïs + stylo	FAFIALA
42640-42644	Rakotomalala J.Claude	Vinany	46,46326	-19,56977	988	plat	Ferrallitique	Conventionnel	Maïs	Non suivi
42645-42649	Ratomponiony C.Rolland	Vinany	46,49909	-19,63907		légèrement en pente	Ferrallitique	SCV	Maïs + stylo	FAFIALA
42650-42654	Razafimahatratra Armand	Vinany	46,50153	-19,63858		plat	Ferrallitique	SCV	stylosanthes	FAFIALA
42655-42659		Vinany	46,47109	-19,57755	987	plat	Ferrallitique	SCV	maïs + arachide	FAFIALA
42660-42664		Vinany	46,47355	-19,58211	994	légèrement en pente	Ferrallitique	SCV	Maïs + stylo	FAFIALA

N° LRI	nom agriculteur	Localité	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Toposéquence	Type de sol	système	Culture 2012-2013	organisme
42665-42669		Vinany	46,47708	-19,58894	999	plat	Ferrallitique	Conventionnel	Riz	Non suivi
42670-42674		Vinany	46,47972	-19,59012	1006	plat	Ferrallitique	Conventionnel	maïs	Non suivi
42675-42679		Vinany	46,48251	-19,59523	1010	légèrement en pente	Ferrallitique	Conventionnel	Riz	Non suivi
42680-42684		Vinany	46,48415	-19,58591	994	légèrement en pente	Ferrallitique	Conventionnel	Riz	Non suivi
42685-42689		Vinany	46,48415	-19,58591		plat	Ferrallitique	Conventionnel	stylosanthès	FAFIALA
42690-42694		Inanantonana	46,5961	-19,60712	1224	légèrement en pente	Ferrallitique	Conventionnel	riz	Non suivi
42695-42699		Inanantonana	46,59635	-19,6097	1227	légèrement en pente	Ferrallitique	SCV	Maïs + stylo	FAFIALA
42700-42704		Inanantonana	46,59978	-19,60605	1216	plat	Ferrallitique	Conventionnel	Maïs + riz	Non suivi
42705-42709		Inanantonana	46,59986	-19,61264	1243	plat	Ferrallitique	Conventionnel	maïs	Non suivi
42710-42714		Fidirana	46,57899	-19,58247		plat	Ferrallitique	Conventionnel	riz	Non suivi
42715-42719		Fidirana	46,57211	-19,58788		légèrement en pente	Ferrallitique	Conventionnel	maïs	Non suivi
42720-42724		Ankazomiriotra	46,53633	-19,62821		plat	Ferrallitique	Conventionnel	riz	Non suivi
42725-42729		Ankazomiriotra	46,53877	-19,63187	1106	légèrement en pente	Ferrallitique	Conventionnel	riz	Non suivi
42730-42734		Ankazomiriotra	46,54931	-19,6479	1147	plat	Ferrallitique	Conventionnel	riz	Non suivi
42735-42739		Ankazomiriotra	46,55123	-19,65229	1161	plat	Ferrallitique	Conventionnel	maïs	Non suivi
42740-42744		Inanantonana	46,60405	-19,62092	1252	légèrement en pente	Ferrallitique	SCV	stylosanthès	FAFIALA
42745-40749		Inanantonana	46,61737	-19,63564		plat	Ferrallitique	Conventionnel	riz	Non suivi
42750-42754		Inanantonana	46,61358	-19,64625	1314	légèrement en pente	Ferrallitique	Conventionnel	riz	Non suivi
42755-42759		Ankazomiriotra	46,5372	-19,6439	1134	légèrement en pente	Ferrallitique	Conventionnel	riz	Non suivi

N° LRI	nom agriculteur	Localité	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Toposéquence	Type de sol	système	Culture 2012-2013	organisme
42760-42764	Razafimahatratra Martin	Ambohitromby (Vinany)	19,60242	46,49943	1003	Pente faible	Ferrallitique	SCV	Maïs + pois de terre	Riz sur résidus de stylo
42765-42769	Dieu Donné	Ambohitromby (Vinany)	19,60630	46,49724	1022	Pente faible	Ferrallitique	Conventionnel	riz	pois de terre
42770-42774	Inconnu	Ambohitromby (Vinany)	19,60821	46,49475	1028	Pente faible	Ferrallitique	Conventionnel	riz	pois de terre
42775-42779	Rakotozafy	Malazaimanga (Vohitrarivo)	19,57808	46,54545	1106	Pente faible	Ferrallitique	Conventionnel	riz	maïs
42780-42784	Rakotoarison Jean Baptiste	Vohitrarivo	19,57574	46,53180	1112	tanety plat	Ferrallitique	Conventionnel	riz	maïs
42785-42789	Randriamahenina	Vohitrarivo	19,58231	46,52742	1128	Pente faible	Ferrallitique	Conventionnel	Maïs	Arachide
42790-42794	Rakotoniaina Johnson	Ambatomainy (Vohitrarivo)	19,58413	46,53848	1125	pente moyenne	Ferrallitique	Conventionnel	Arachide	riz
42795-42799	Randrianjatovo Alfred	Malazaimanga (Vohitrarivo)	19,58046	46,54342	1101	plat	Ferrallitique	Conventionnel	riz	maïs + arachide
42800-42804	Randrianasolo	Ampasandaoka	19,60303	46,53494	1052	Pente faible	Ferrallitique	Conventionnel	maïs	soja
42805-42809	Ramahenina	Ampasandaoka	19,60386	46,53811	1061	Pente faible	Ferrallitique	Conventionnel	maïs + arachide	riz
42810-42814	Rakotonindrina Jean Jacques	Ambanampontsy	19,61729	46,53695	1071	Pente faible	Ferrallitique	Conventionnel	manioc	riz
42815-42819	Pery	Soamahamanina (Ankilahila)	19,63626	46,53426	1114	Pente faible	Ferrallitique	Conventionnel	maïs	riz
42820-42824	Rakotondrasahamitsiry	landratsay	19,67096	46,55935	1170	pente moyenne	Ferrallitique	Conventionnel	non cultivée	manioc
42825-42829	Rasolo Andriamanampisoa Richard	landratsaimahamasi na	19,66503	46,56238	1187	plat	Ferrallitique	Conventionnel	maïs	riz + arachide

N° LRI	nom agriculteur	Localité	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Toposéquence	Type de sol	système	Culture 2012-2013	organisme
42830-42834	Rakotondrabary Joseph	landratsaimahamasi na	19,66113	46,56697	1182	bas de tanety	Ferrallitique	Conventionnel	non cultivée	
42835-42839	Rasolomanana Rosette	Antanetibe	19,65901	46,56309	1191	tanety	Ferrallitique	SCV	maïs	
42840-42844	Philippe	Ankerana	19,65220	46,55954	1164	Pente faible	Ferrallitique	Conventionnel	riz	Arachide
42845-42849	Inconnu	Ankerana	19,65304	46,56617	1186	pente moyenne	Ferrallitique	Conventionnel	arachide	Arachide
42850-42854	José	Ambatobe (Inanantonana)	19,66157	46,60938	1315	pente moyenne	Ferrallitique	Conventionnel	maïs	riz
42855-42859	Inconnu	Beronono	19,62816	46,51464	1148	plat	Ferrallitique	Conventionnel	Maïs + Arachide	
42860-42864	Inconnu	Ambohipeno (Ankazomiriotra)	19,64137	46,51851	1115	Pente faible	Ferrallitique	Conventionnel	riz	
42865-42869	Claude	Malazaimanga (Vohitrarivo)	19,58837	46,55050	1116	plat	Ferrallitique	Conventionnel	riz	Arachide
42870-42874	Ingahy Nô	Ambohimasikely	19,59372	46,57322	1208	Pente faible	Ferrallitique	Conventionnel	Maïs + pois de terre	non cultivée
42875-42879	Régis	Ambohikandra (Ambohimasikely)	19,60230	46,57957	1228	plat	Ferrallitique	Conventionnel	maïs	maïs
42880-42884	Mme Jacqueline	Avarabato	19,63541	46,54812	1101	Pente faible	Ferrallitique	Conventionnel	riz	riz
42885-42889	Armand	Antanetikely	19,67424	46,58621	1159	Pente faible	Ferrallitique	Conventionnel	riz	manioc
42890-42894	Ingahy Bôny	Inanantonana	19,62786	46,61537	1304	plat	Ferrallitique	Conventionnel	riz	riz

N° LRI	nom agriculteur	Localité	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Toposéquence	Type de sol	système	Culture 2012-2013	organisme
42895-42899	Mr Maka	Inanantonana	19,64843	46,61603	1210	penne moyenne	Ferrallitique	Conventionnel	riz	Arachide
42900-42904	Inconnu	Antanety Sud	19,67983	46,62427	1174	Pente faible	Ferrallitique	Conventionnel	riz	riz

## Annexe 2 : Résultats des analyses effectuées au laboratoire de LRI

**Tableau 5 : Résultats des analyses effectuées au laboratoire**

N°LRI	Parcelle	Profondeur	pH-eau	pH-KCl	ΔpH	Da (g cm <sup>-3</sup> )	P total (mg kg <sup>-1</sup> )	Stock (kg P ha <sup>-1</sup> )	P <sub>ret</sub> (mg P L <sup>-1</sup> )	Pads (mg P kg <sup>-1</sup> )	P résine (mg P kg <sup>-1</sup> )
42405	P1	0-10	4,74	3,89	-0,85	1,15	525,579	606,6490446	21,8944	381,057	2,662
42406	P1	10-20	5,10	4,34	-0,76	1,16	475,520	553,675941	19,9773	400,227	1,629
42407	P1	20-30	5,13	4,38	-0,75	1,30					
42410	P2	0-10	5,32	4,52	-0,80	1,18	768,143	902,9026526	29,1458	308,542	2,796
42411	P2	10-20	5,15	4,21	-0,94	1,27	684,256	869,4116632	13,0593	469,408	0,482
42412	P2	20-30	5,23	4,31	-0,92	1,29					
42415	P3	0-10	4,64	3,98	-0,66	1,01	924,909	932,5545219	19,8106	401,894	7,633
42416	P3	10-20	4,79	3,96	-0,83	1,13	900,519	1017,341089	18,4770	415,230	6,277
42417	P3	20-30	4,45	3,81	-0,64	1,07					
42420	P4	0-10	4,81	3,85	-0,96	0,90	742,790	670,4707362	20,1440	398,560	3,697
42421	P4	10-20	4,84	3,92	-0,92	1,09	621,564	674,7417373	15,6431	443,569	2,113
42422	P4	20-30	5,13	4,16	-0,97	1,22					
42425	P5	0-10	5,10	4,05	-1,05	1,23	474,887	583,2240638	21,6443	383,557	2,051
42426	P5	10-20	5,12	4,27	-0,85	1,26	402,340	505,2700738	17,3935	426,066	0,609
42427	P5	20-30	5,31	4,15	-1,16	1,31					
42430	P6	0-10	4,79	3,89	-0,90	1,07	542,396	581,3807972	25,3951	346,050	2,167
42431	P6	10-20	5,31	4,10	-1,21	1,14	574,869	653,1543407	22,1444	378,556	1,205
42432	P6	20-30	5,66	4,30	-1,36	1,13					
42435	P7	0-10	5,08	3,98	-1,10	1,17	776,933	912,831058	12,7915	472,085	1,831
42436	P7	10-20	5,42	4,26	-1,16	1,12	706,898	789,9076446	14,6429	453,571	0,362
42437	P7	20-30	5,40	4,18	-1,22	1,27					
42440	P8	0-10	5,09	3,90	-1,19	1,03	796,591	816,8385351	21,2276	387,725	3,157
42441	P8	10-20	5,24	4,04	-1,20	1,20	752,622	902,3601199	16,2266	437,735	0,821
42442	P8	20-30	5,21	4,05	-1,16	1,23					
42445	P9	0-10	5,34	4,07	-1,27	1,06	601,694	639,3894559	23,3947	366,054	13,880

N°LRI	Parcelle	Profondeur	pH-eau	pH-KCl	$\Delta$ pH	Da (g cm <sup>-3</sup> )	P total (mg kg <sup>-1</sup> )	Stock (kg P ha <sup>-1</sup> )	P <sub>ret</sub> (mg P L <sup>-1</sup> )	Pads (mg P kg <sup>-1</sup> )	P résine (mg P kg <sup>-1</sup> )
42446	P9	10-20	5,20	4,06	-1,14	1,15	542,220	622,9308932	22,6445	373,555	1,612
42447	P9	20-30	6,27	4,36	-1,91	1,19					
42450	P10	0-10	5,69	4,22	-1,47	1,06	479,179	508,6730087	16,0599	439,402	1,313
42451	P10	10-20	5,60	4,59	-1,01	1,19	534,495	636,6244545	14,6429	453,571	0,178
42452	P10	20-30	5,94	4,83	-1,11	1,31					
42455	P11	0-10	4,79	4,13	-0,66	1,04	597,399	621,2900232	23,2280	367,721	2,104
42456	P11	10-20	4,60	4,11	-0,49	1,15	554,437	635,2346338	16,5600	434,401	1,818
42457	P11	20-30	4,99	4,14	-0,85	1,27					
42460	P12	0-10	4,99	4,07	-0,92	1,02	555,007	567,9091379	23,5614	364,387	2,308
42461	P12	10-20	4,92	4,09	-0,83	1,14	464,273	527,5131947	12,3925	476,076	1,246
42462	P12	20-30	5,05	4,12	-0,93	1,28					
42465	P13	0-10	4,63	3,94	-0,69	1,29	498,202	643,4138414	31,2296	287,705	1,996
42466	P13	10-20	4,48	3,94	-0,54	1,31	338,998	444,8056271	28,4790	315,210	1,471
42467	P13	20-30	4,44	4,03	-0,41	1,42					
42470	P14	0-10	5,26	4,28	-0,98	1,08	655,344	711,0215965	26,8954	331,047	16,501
42471	P14	10-20	5,40	4,34	-1,06	1,16	512,252	595,0828781	22,3945	376,056	1,070
42472	P14	20-30	5,62	4,66	-0,96	1,32					
42475	P15	0-10	5,75	4,49	-1,26	0,90	609,941	550,393639	34,9803	250,197	2,646
42476	P15	10-20	5,90	4,44	-1,46	1,10	566,317	625,4934956	27,8122	321,878	2,033
42477	P15	20-30	6,09	4,82	-1,27	1,15					
42480	P16	0-10	5,24	4,15	-1,09	1,02	567,220	577,9247967	29,6459	303,541	5,804
42481	P16	10-20	5,68	4,23	-1,45	1,22	586,390	712,6811911	16,6433	433,567	0,111
42482	P16	20-30	5,62	4,54	-1,08	1,27					
42485	P17	0-10	5,11	4,07	-1,04	1,06	611,986	647,3161777	26,6453	333,547	1,971
42486	P17	10-20	5,20	4,05	-1,15	1,05	620,865	650,4209193	22,4778	375,222	2,890
42487	P17	20-30	5,36	4,18	-1,18	1,09					
42490	P18	0-10	4,73	3,94	-0,79	1,25	599,343	746,7378424	23,8948	361,053	2,412
42491	P18	10-20	5,10	4,03	-1,07	1,17	510,717	597,292631	21,3109	386,891	1,370

N°LRI	Parcelle	Profondeur	pH-eau	pH-KCl	ΔpH	Da (g cm <sup>-3</sup> )	P total (mg kg <sup>-1</sup> )	Stock (kg P ha <sup>-1</sup> )	P <sub>ret</sub> (mg P L <sup>-1</sup> )	Pads (mg P kg <sup>-1</sup> )	P résine (mg P kg <sup>-1</sup> )
42492	P18	20-30	5,27	4,17	-1,10	1,21					
42495	P19	0-10	5,22	4,02	-1,20	1,43	342,548	489,2448237	24,5616	354,385	1,415
42496	P19	10-20	5,45	4,28	-1,17	1,49	326,503	486,8886965	17,3935	426,066	0,087
42497	P19	20-30	5,36	4,30	-1,06	1,50					
42500	P20	0-10	4,68	3,96	-0,72	1,18	606,518	713,3697934	21,4776	385,224	4,075
42501	P20	10-20	4,87	4,13	-0,74	1,17	464,839	545,2863773	19,7273	402,728	0,945
42502	P20	20-30	4,94	4,17	-0,77	1,22					
42505	P21	0-10	5,01	3,93	-1,08	1,07	491,750	524,1904612	20,4774	395,226	3,808
42506	P21	10-20	5,05	4,09	-0,96	1,27	441,930	560,4593755	13,9761	460,239	3,516
42507	P21	20-30	5,16	4,09	-1,07	1,22					
42510	P22	0-10	5,24	4,16	-1,08	1,09	652,647	710,3589193	20,9775	390,225	7,653
42511	P22	10-20	5,28	4,22	-1,06	1,18	503,397	595,689238	20,2274	397,727	1,008
42512	P22	20-30	5,42	4,25	-1,17	1,24					
42515	P23	0-10	5,01	4,03	-0,98	1,22	382,645	467,5787417	22,6445	373,555	0,967
42516	P23	10-20	5,23	4,20	-1,03	1,29	341,501	440,3835571	15,1430	448,570	0,588
42517	P23	20-30	6,13	4,22	-1,91	1,21					
42520	P24	0-10	5,35	4,40	-0,95	1,05	1 048,115	1100,52043	28,9791	310,209	1,838
42521	P24	10-20	6,33	4,58	-1,75	1,10	1 000,995	1101,094354	21,1442	388,558	3,035
42522	P24	20-30	6,38	5,02	-1,36	1,29					
42525	P25	0-10	4,95	4,23	-0,72	1,04	778,416	809,5521583	18,3937	416,064	1,362
42526	P25	10-20	5,27	4,66	-0,61	1,05	767,220	805,581015	11,8924	481,077	1,444
42527	P25	20-30	5,85	5,40	-0,45	1,08					
42530	P26	0-10	4,78	4,05	-0,73	1,10	708,484	777,8117854	24,4782	355,218	1,669
42531	P26	10-20	4,93	4,13	-0,80	1,16	599,228	692,2308681	14,6429	453,571	1,576
42532	P26	20-30	4,61	4,37	-0,24	1,28					
42535	P27	0-10	5,09	4,05	-1,04	1,06	644,808	682,188875	20,5608	394,393	2,367
42536	P27	10-20	4,95	4,04	-0,91	1,08	636,170	685,2916522	18,2270	417,731	0,356
42537	P27	20-30	5,77	4,71	-1,06	1,08					

N°LRI	Parcelle	Profondeur	pH-eau	pH-KCl	ΔpH	Da (g cm <sup>-3</sup> )	P total (mg kg <sup>-1</sup> )	Stock (kg P ha <sup>-1</sup> )	P <sub>ret</sub> (mg P L <sup>-1</sup> )	Pads (mg P kg <sup>-1</sup> )	P résine (mg P kg <sup>-1</sup> )
42540	P28	0-10	4,80	3,93	-0,87	1,13	617,766	695,4429278	25,4784	345,216	1,896
42541	P28	10-20	5,30	4,14	-1,16	1,18	483,181	571,3588392	15,5598	444,403	0,665
42542	P28	20-30	5,91	4,99	-0,92	1,27					
42545	P29	0-10	4,60	3,98	-0,62	1,14	577,573	655,6390761	25,9785	340,215	0,970
42546	P29	10-20	4,82	4,05	-0,77	1,24	578,725	719,6809801	22,1444	378,556	3,228
42547	P29	20-30	5,07	4,40	-0,67	1,33					
42550	P30	0-10	5,56	4,16	-1,40	1,08	645,033	695,973025	31,3963	286,038	7,127
42551	P30	10-20	5,20	3,90	-1,30	1,27	578,822	737,1402302	26,5620	334,381	2,536
42552	P30	20-30	5,22	4,00	-1,22	1,30					
42555	P31	0-10	4,88	4,23	-0,65	1,01	719,783	723,4256988	12,8092	471,908	0,934
42556	P31	10-20	5,45	4,59	-0,86	1,22	659,010	802,6454115	14,6429	453,571	0,789
42557	P31	20-30	5,86	4,80	-1,06	1,21					
42560	P32	0-10	4,56	3,96	-0,60	0,96	837,233	806,0453257	24,4782	355,218	3,407
42561	P32	10-20	4,85	4,10	-0,75	1,00	828,641	825,1904745	22,1444	378,556	1,447
42562	P32	20-30	5,22	4,42	-0,80	1,19					
42565	P33	0-10	4,74	4,12	-0,62	1,03	818,832	842,3118813	19,0735	409,265	7,252
42566	P33	10-20	4,75	4,09	-0,66	1,15	722,300	829,087648	17,1434	428,566	0,539
42567	P33	20-30	5,17	4,77	-0,40	1,22					
42570	P34	0-10	4,66	4,10	-0,56	1,02	831,412	845,8075124	29,0410	309,590	2,581
42571	P34	10-20	4,80	4,13	-0,67	1,19	712,839	850,2677403	27,6455	323,545	0,726
42572	P34	20-30	5,08	4,23	-0,85	1,24					
42575	P35	0-10	5,24	4,22	-1,02	1,17	763,249	892,0863776	25,1450	348,550	5,768
42576	P35	10-20	5,25	4,20	-1,05	1,30	590,013	764,8449608	19,8106	401,894	0,792
42577	P35	20-30	5,19	4,22	-0,97	1,27					
42580	P36	0-10	5,76	4,72	-1,04	0,98	795,894	777,7859994	14,1428	458,572	6,355
42581	P36	10-20	6,02	4,93	-1,09	1,01	790,445	799,4288281	14,0595	459,406	0,925
42582	P36	20-30	6,04	5,23	-0,81	1,06					
42585	P37	0-10	5,28	4,02	-1,26	1,23	674,001	826,7575448	23,4780	365,220	1,230

N°LRI	Parcelle	Profondeur	pH-eau	pH-KCl	ΔpH	Da (g cm <sup>-3</sup> )	P total (mg kg <sup>-1</sup> )	Stock (kg P ha <sup>-1</sup> )	P <sub>ret</sub> (mg P L <sup>-1</sup> )	Pads (mg P kg <sup>-1</sup> )	P résine (mg P kg <sup>-1</sup> )
42586	P37	10-20	5,41	4,29	-1,12	1,19	738,336	878,4759114	18,1436	418,564	3,510
42587	P37	20-30	5,98	5,00	-0,98	1,14					
42590	P38	0-10	5,60	4,18	-1,42	1,18	716,344	845,259637	25,8118	341,882	2,524
42591	P38	10-20	5,41	4,36	-1,05	1,24	632,716	785,504337	19,1438	408,562	1,816
42592	P38	20-30	5,82	4,78	-1,04	1,15					
42595	P39	0-10	4,81	4,11	-0,70	0,95	651,082	615,9898645	23,9316	360,684	1,533
42596	P39	10-20	4,93	4,09	-0,84	1,05	539,497	567,7766922	15,1430	448,570	0,323
42597	P39	20-30	5,53	4,48	-1,05	1,16					
42600	P40	0-10	4,80	3,98	-0,82	1,22	708,248	866,0048885	24,3115	356,885	2,215
42601	P40	10-20	5,08	4,01	-1,07	1,26	696,493	879,1351899	18,6437	413,563	0,851
42602	P40	20-30	4,92	4,09	-0,83	1,33					
42605	P41	0-10	5,52	4,44	-1,08	1,20	752,536	903,472215	23,9781	360,219	3,053
42606	P41	10-20	5,40	4,37	-1,03	1,38	641,417	887,199011	16,3099	436,901	0,650
42607	P41	20-30	5,52	4,77	-0,75	1,31					
42610	P42	0-10	4,78	4,10	-0,68	0,98	728,148	717,0260118	14,2262	457,739	8,417
42611	P42	10-20	5,12	4,15	-0,97	0,98	678,506	668,2425964	14,8930	451,071	5,102
42612	P42	20-30	5,36	4,23	-1,13	1,19					
42615	P43	0-10	5,03	4,07	-0,96	1,04	1 010,617	1047,849669	26,7287	332,714	7,929
42616	P43	10-20	5,09	4,01	-1,08	1,11	889,106	987,6501811	23,5966	364,034	7,936
42617	P43	20-30	5,40	4,26	-1,14	1,20					
42620	P44	0-10	5,06	4,01	-1,05	1,16	477,870	553,6561207	25,5230	344,770	0,911
42621	P44	10-20	4,76	4,06	-0,70	1,35	444,421	600,2570965	19,4923	405,077	0,197
42622	P44	20-30	5,31	4,19	-1,12	1,46					
42625	P45	0-10	4,94	4,01	-0,93	1,09	732,507	799,659135	22,5077	374,923	3,543
42626	P45	10-20	5,17	4,07	-1,10	1,28	685,573	875,8631355	15,5556	444,444	0,375
42627	P45	20-30	5,61	4,20	-1,41	1,29					
42630	P46	0-10	5,68	4,04	-1,64	1,10	742,811	819,1480567	20,4137	395,863	4,719
42631	P46	10-20	4,98	4,79	-0,19	1,16	749,118	869,5441727	15,6394	443,606	1,429

N°LRI	Parcelle	Profondeur	pH-eau	pH-KCl	$\Delta$ pH	Da (g cm <sup>-3</sup> )	P total (mg kg <sup>-1</sup> )	Stock (kg P ha <sup>-1</sup> )	P <sub>ret</sub> (mg P L <sup>-1</sup> )	Pads (mg P kg <sup>-1</sup> )	P résine (mg P kg <sup>-1</sup> )
42632	P46	20-30	5,05	3,98	-1,07	1,19					
42635	P47	0-10	4,97	3,94	-1,03	1,14	550,702	629,3656799	10,4462	495,538	1,100
42636	P47	10-20	5,11	4,05	-1,06	1,12	524,391	587,8361102	13,4616	465,384	1,748
42637	P47	20-30	5,42	4,85	-0,57	1,26					
42640	P48	0-10	5,82	4,53	-1,29	1,16	944,021	1092,962853	27,1145	328,855	8,408
42641	P48	10-20	5,55	4,37	-1,18	1,11	989,361	1094,972071	23,5966	364,034	9,042
42642	P48	20-30	5,68	4,26	-1,42	1,12					
42645	P49	0-10	5,22	4,24	-0,98	1,08	414,494	449,2432934	11,9539	480,461	0,707
42646	P49	10-20	5,58	4,94	-0,64	1,21	545,875	660,4649599	16,4770	435,230	0,280
42647	P49	20-30	5,70	4,98	-0,72	1,27					
42650	P50	0-10	5,13	4,02	-1,11	1,19	580,320	690,9722447	18,4872	415,128	1,253
42651	P50	10-20	5,08	4,13	-0,95	1,19	569,389	679,493135	15,1368	448,632	0,040
42652	P50	20-30	5,42	4,48	-0,94	1,29					
42655	P51	0-10	5,12	4,13	-0,99	1,10	627,383	689,6246827	12,6240	473,760	0,637
42656	P51	10-20	5,43	4,47	-0,96	1,14	583,065	662,1445556	13,2941	467,059	0,141
42657	P51	20-30	5,79	4,99	-0,80	1,15					
42660	P52	0-10	5,41	4,39	-1,02	1,06	551,446	586,4324286	17,9009	420,991	0,998
42661	P52	10-20	5,73	4,85	-0,88	1,14	513,718	585,888046	13,3778	466,222	0,176
42662	P52	20-30	5,91	5,18	-0,73	1,15					
42665	P53	0-10	5,11	4,27	-0,84	1,14	554,495	630,3482947	13,0428	469,572	0,062
42666	P53	10-20	5,42	4,78	-0,64	1,14	579,109	659,5357711	10,1112	498,888	0,072
42667	P53	20-30	5,87	5,29	-0,58	1,19					
42670	P54	0-10	5,30	4,15	-1,15	1,25	531,379	664,4281775	15,4718	445,282	0,622
42671	P54	10-20	5,62	4,61	-1,01	1,26	507,981	642,177759	14,9693	450,307	0,093
42672	P54	20-30	5,42	4,92	-0,50	1,22					
42675	P55	0-10	5,14	4,26	-0,88	1,41	659,053	926,7817608	24,5179	354,821	3,480
42676	P55	10-20	5,33	4,42	-0,91	1,36	636,208	863,9117282	15,1368	448,632	0,614
42677	P55	20-30	5,60	4,40	-1,20	1,29					

N°LRI	Parcelle	Profondeur	pH-eau	pH-KCl	ΔpH	Da (g cm <sup>-3</sup> )	P total (mg kg <sup>-1</sup> )	Stock (kg P ha <sup>-1</sup> )	P <sub>ret</sub> (mg P L <sup>-1</sup> )	Pads (mg P kg <sup>-1</sup> )	P résine (mg P kg <sup>-1</sup> )
42680	P56	0-10	5,47	4,55	-0,92	1,12	530,212	593,3750198	14,2154	457,846	1,334
42681	P56	10-20	5,61	4,68	-0,93	1,12	461,051	517,1989433	11,5351	484,649	0,512
42682	P56	20-30	5,61	5,16	-0,45	1,24					
42685	P57	0-10	5,57	4,51	-1,06	1,26	492,313	622,1841139	23,2615	367,385	2,863
42686	P57	10-20	5,48	4,49	-0,99	1,16	464,080	538,4053539	19,8274	401,726	0,968
42687	P57	20-30	5,82	5,07	-0,75	1,17					
42690	P58	0-10	5,07	4,24	-0,83	1,20	507,793	610,180821	18,8222	411,778	1,986
42691	P58	10-20	5,32	4,39	-0,93	1,18	462,729	546,0581527	12,9590	470,410	0,357
42692	P58	20-30	5,40	4,53	-0,87	1,29					
42695	P59	0-10	5,59	4,47	-1,12	1,02	765,384	781,8852546	18,9898	410,102	3,764
42696	P59	10-20	5,32	4,26	-1,06	1,08	543,163	587,8964484	12,3727	476,273	0,672
42697	P59	20-30	5,47	4,43	-1,04	1,21					
42700	P60	0-10	5,77	4,65	-1,12	1,17	492,585	577,9374173	26,3606	336,394	3,658
42701	P60	10-20	5,49	4,59	-0,90	1,25	408,187	511,4985861	18,4034	415,966	0,911
42702	P60	20-30	5,58	4,71	-0,87	1,30					
42705	P61	0-10	5,45	4,30	-1,15	1,16	753,914	873,345108	16,5607	434,393	1,044
42706	P61	10-20	5,47	4,40	-1,07	1,19	686,182	817,7484928	11,2838	487,162	0,394
42707	P61	20-30	5,55	4,83	-0,72	1,05					
42710	P62	0-10	4,96	3,98	-0,98	1,13	360,410	406,0356284	13,9642	460,358	1,983
42711	P62	10-20	5,36	4,26	-1,10	1,13	442,419	499,9595872	10,8650	491,350	0,203
42712	P62	20-30	5,60	4,75	-0,85	1,21					
42715	P63	0-10	5,77	4,35	-1,42	0,93	670,922	620,7899236	13,2103	467,897	0,955
42716	P63	10-20	5,62	4,64	-0,98	1,02	759,916	776,6783645	7,3590	526,410	0,070
42717	P63	20-30	5,72	5,19	-0,53	1,01					
42720	P64	0-10	5,46	4,40	-1,06	1,05	637,937	671,5910492	17,0633	429,367	0,852
42721	P64	10-20	5,56	4,43	-1,13	1,28	877,779	1125,754927	16,7282	432,718	0,537
42722	P64	20-30	5,60	4,67	-0,93	1,15					
42725	P65	0-10	5,47	4,49	-0,98	1,13	573,762	646,1597554	15,2206	447,794	0,142

N°LRI	Parcelle	Profondeur	pH-eau	pH-KCl	ΔpH	Da (g cm <sup>-3</sup> )	P total (mg kg <sup>-1</sup> )	Stock (kg P ha <sup>-1</sup> )	P <sub>ret</sub> (mg P L <sup>-1</sup> )	Pads (mg P kg <sup>-1</sup> )	P résine (mg P kg <sup>-1</sup> )
42726	P65	10-20	5,74	5,43	-0,31	1,23	552,604	677,2029165	11,2838	487,162	0,066
42727	P65	20-30	5,90	5,35	-0,55	1,14					
42730	P66	0-10	4,55	3,86	-0,69	1,15	642,625	740,1461006	20,4974	395,026	1,915
42731	P66	10-20	4,76	3,92	-0,84	1,24	598,547	743,2712129	18,0684	419,316	1,302
42732	P66	20-30	5,44	4,27	-1,17	1,28					
42735	P67	0-10	5,15	4,14	-1,01	1,14	1 005,569	1142,795105	27,7008	322,992	7,459
42736	P67	10-20	5,23	4,12	-1,11	1,32	1 103,724	1452,526417	25,4393	345,607	4,589
42737	P67	20-30	5,44	4,40	-1,04	1,27					
42740	P68	0-10	5,02	4,04	-0,98	1,19	415,203	493,0387798	15,8906	441,094	1,536
42741	P68	10-20	5,36	4,21	-1,15	1,16	505,155	583,6754077	13,0428	469,572	0,721
42742	P68	20-30	5,59	4,80	-0,79	1,14					
42745	P69	0-10	5,26	4,21	-1,05	1,05	559,008	584,6016248	16,4770	435,230	2,181
42746	P69	10-20	5,09	4,20	-0,89	1,21	540,367	653,5936498	12,7078	472,922	0,438
42747	P69	20-30	5,41	4,36	-1,05	1,25					
42750	P70	0-10	5,07	4,10	-0,97	1,23	548,240	672,0702345	18,9898	410,102	1,530
42751	P70	10-20	5,21	4,14	-1,07	1,28	563,392	722,7237965	12,0377	479,623	0,296
42752	P70	20-30	5,07	4,10	-0,97	1,43					
42755	P71	0-10	4,95	4,00	-0,95	1,26	958,497	1208,454112	18,9898	410,102	6,155
42756	P71	10-20	5,35	4,19	-1,16	1,31	880,366	1151,617319	12,7915	472,085	0,168
42757	P71	20-30	5,73	4,45	-1,28	1,36					
42760	P72	0-10	5,25	4,35	-0,90	1,15	690,431	796,2108253	22,0889	379,111	0,224
42761	P72	10-20	6,02	4,68	-1,34	1,20	603,776	723,2792435	13,6291	463,709	0,141
42762	P72	20-30	5,55	4,90	-0,65	1,19					
42765	P73	0-10	5,73	4,53	-1,20	1,51	613,390	927,7596838	26,6119	333,881	5,044
42766	P73	10-20	5,35	4,21	-1,14	1,29	496,968	643,4408233	21,5026	384,974	0,395
42767	P73	20-30	5,55	4,48	-1,07	1,03					
42770	P74	0-10	4,83	4,15	-0,68	1,22	581,315	707,8808188	18,9898	410,102	0,699
42771	P74	10-20	5,26	4,32	-0,94	1,32	472,908	623,8791868	12,7915	472,085	0,000

N°LRI	Parcelle	Profondeur	pH-eau	pH-KCl	ΔpH	Da (g cm <sup>-3</sup> )	P total (mg kg <sup>-1</sup> )	Stock (kg P ha <sup>-1</sup> )	P <sub>ret</sub> (mg P L <sup>-1</sup> )	Pads (mg P kg <sup>-1</sup> )	P résine (mg P kg <sup>-1</sup> )
42772	P74	20-30	5,45	4,44	-1,01	1,30					
42775	P75	0-10	5,16	4,41	-0,75	1,10	575,356	630,9123564	17,3146	426,854	1,241
42776	P75	10-20	5,60	4,92	-0,68	1,07	618,884	662,0182757	11,9539	480,461	0,448
42777	P75	20-30	5,69	5,30	-0,39	1,02					
42780	P76	0-10	4,72	4,02	-0,70	1,07	528,329	565,5219306	12,5402	474,598	1,184
42781	P76	10-20	5,21	4,21	-1,00	1,09	468,306	511,0884644	13,7129	462,871	0,745
42782	P76	20-30	5,26	4,87	-0,39	1,18					
42785	P77	0-10	5,48	3,96	-1,52	1,11	463,735	514,3189997	22,2564	377,436	0,798
42786	P77	10-20	5,28	4,16	-1,12	1,16	407,742	474,6446061	16,5607	434,393	0,000
42787	P77	20-30	5,57	4,65	-0,92	1,30					
42790	P78	0-10	5,31	4,51	-0,80	1,04	628,656	651,8128802	19,3248	406,752	0,958
42791	P78	10-20	5,40	4,68	-0,72	1,01	485,414	492,6316524	13,5454	464,546	0,370
42792	P78	20-30	5,80	5,00	-0,80	1,11					
42795	P79	0-10	5,26	4,19	-1,07	0,95	892,002	847,5810965	15,0530	449,470	4,174
42796	P79	10-20	5,26	4,21	-1,05	0,93	930,722	869,0388331	12,6240	473,760	2,900
42797	P79	20-30	5,49	4,25	-1,24	0,95					
42800	P80	0-10	5,02	4,02	-1,00	1,16	731,057	849,1772068	21,8376	381,624	2,270
42801	P80	10-20	5,48	4,16	-1,32	1,13	620,218	698,2200198	20,4137	395,863	0,742
42802	P80	20-30	5,57	4,70	-0,87	1,17					
42805	P81	0-10	5,28	4,26	-1,02	1,17	758,726	889,6439146	13,6291	463,709	1,931
42806	P81	10-20	5,56	4,65	-0,91	1,13	669,340	753,7563814	12,7078	472,922	0,161
42807	P81	20-30	5,75	5,05	-0,70	1,16					
42810	P82	0-10	5,23	4,44	-0,79	1,15	887,916	1021,462404	15,8069	441,931	1,375
42811	P82	10-20	5,49	4,29	-1,20	1,31	1 060,041	1386,167504	9,7880	502,120	0,356
42812	P82	20-30	5,38	4,36	-1,02	1,31					
42815	P83	0-10	5,09	4,03	-1,06	1,16	516,222	599,4681672	22,3402	376,598	1,462
42816	P83	10-20	5,22	4,47	-0,75	1,17	602,028	707,1272538	16,6445	433,555	1,313
42817	P83	20-30	5,79	5,06	-0,73	1,30					

N°LRI	Parcelle	Profondeur	pH-eau	pH-KCl	ΔpH	Da (g cm <sup>-3</sup> )	P total (mg kg <sup>-1</sup> )	Stock (kg P ha <sup>-1</sup> )	P <sub>ret</sub> (mg P L <sup>-1</sup> )	Pads (mg P kg <sup>-1</sup> )	P résine (mg P kg <sup>-1</sup> )
42820	P84	0-10	4,80	4,04	-0,76	1,21	598,804	727,1109287	15,4418	445,582	0,737
42821	P84	10-20	4,98	4,14	-0,84	1,42	584,601	831,6885684	12,7078	472,922	2,058
42822	P84	20-30	5,36	4,42	-0,94	1,41					
42825	P85	0-10	4,88	3,98	-0,90	1,08	855,889	922,1817244	16,0700	439,300	0,522
42826	P85	10-20	5,13	4,13	-1,00	1,20	816,848	981,210611	17,9009	420,991	0,512
42827	P85	20-30	5,15	4,41	-0,74	1,36					
42830	P86	0-10	5,30	4,46	-0,84	1,38	653,591	898,8865104	24,6017	353,983	3,196
42831	P86	10-20	5,40	4,18	-1,22	1,23	632,221	777,7706483	13,7966	462,034	1,307
42832	P86	20-30	5,52	4,28	-1,24	1,30					
42835	P87	0-10	5,17	4,22	-0,95	1,15	911,413	1051,374428	13,6291	463,709	1,995
42836	P87	10-20	5,60	4,74	-0,86	1,07	790,003	842,2684623	8,2804	517,196	2,146
42837	P87	20-30	5,85	5,38	-0,47	1,06					
42840	P88	0-10	5,23	4,13	-1,10	1,20	439,435	528,7680611	18,4034	415,966	1,387
42841	P88	10-20	5,35	4,24	-1,11	1,33	556,268	739,2370059	17,8171	421,829	0,181
42842	P88	20-30	5,52	4,12	-1,40	1,30					
42845	P89	0-10	5,04	4,17	-0,87	1,16	547,645	633,6781038	18,7385	412,615	0,897
42846	P89	10-20	5,06	4,70	-0,36	1,32	483,585	639,3530926	14,5505	454,495	0,128
42847	P89	20-30	4,91	4,58	-0,33	1,53					
42850	P90	0-10	4,75	4,04	-0,71	1,07	683,580	730,3345652	17,2308	427,692	2,098
42851	P90	10-20	4,92	4,09	-0,83	1,11	747,119	826,7411369	15,2206	447,794	0,878
42852	P90	20-30	5,11	4,23	-0,88	1,15					
42855	P91	0-10	5,22	4,61	-0,61	1,06	821,298	873,0847318	12,7915	472,085	4,361
42856	P91	10-20	5,27	4,01	-1,26	1,13	853,319	963,9275276	29,7948	302,052	2,766
42857	P91	20-30	5,18	3,98	-1,20	1,19					
42860	P92	0-10	5,59	4,42	-1,17	1,14	496,901	565,3572475	19,4086	405,914	0,283
42861	P92	10-20	5,72	5,35	-0,37	1,11	567,800	627,6528249	13,9642	460,358	0,398
42862	P92	20-30	5,59	5,27	-0,32	1,17					
42865	P93	0-10	4,95	4,14	-0,81	0,99	811,636	805,5801103	7,7778	522,222	1,538

N°LRI	Parcelle	Profondeur	pH-eau	pH-KCl	ΔpH	Da (g cm <sup>-3</sup> )	P total (mg kg <sup>-1</sup> )	Stock (kg P ha <sup>-1</sup> )	P <sub>ret</sub> (mg P L <sup>-1</sup> )	Pads (mg P kg <sup>-1</sup> )	P résine (mg P kg <sup>-1</sup> )
42866	P93	10-20	5,26	4,33	-0,93	0,90	740,032	668,1999973	6,5633	534,367	0,270
42867	P93	20-30	5,74	5,06	-0,68	0,94					
42870	P94	0-10	5,10	4,75	-0,35	0,96	810,945	781,4868435	12,7078	472,922	1,261
42871	P94	10-20	5,43	4,80	-0,63	1,07	766,525	821,046655	12,2052	477,948	0,569
42872	P94	20-30	5,69	5,03	-0,66	1,06					
42875	P95	0-10	5,18	4,16	-1,02	1,04	788,433	823,5276695	7,9034	520,966	1,353
42876	P95	10-20	5,46	4,55	-0,91	1,02	649,132	660,5942475	4,4274	555,726	0,212
42877	P95	20-30	5,69	5,07	-0,62	1,10					
42880	P96	0-10	5,48	4,76	-0,72	1,18	680,931	805,4250324	18,8222	411,778	1,545
42881	P96	10-20	5,61	5,00	-0,61	1,10	590,528	650,6018484	11,5470	484,530	0,582
42882	P96	20-30	5,87	5,35	-0,52	1,14					
42885	P97	0-10	5,18	4,50	-0,68	1,12	486,129	544,0375809	7,4428	525,572	0,182
42886	P97	10-20	5,40	4,85	-0,55	1,09	600,145	655,1816967	4,6787	553,213	0,027
42887	P97	20-30	5,48	5,42	-0,06	1,18					
42890	P98	0-10	4,90	4,19	-0,71	1,22	528,082	645,4844577	9,6624	503,376	0,725
42891	P98	10-20	5,15	4,20	-0,95	1,25	551,760	691,2959868	5,8513	541,487	0,106
42892	P98	20-30	5,52	4,35	-1,17	1,31					
42895	P99	0-10	5,41	4,55	-0,86	1,17	380,831	445,1589862	14,1317	458,683	0,257
42896	P99	10-20	5,17	4,50	-0,67	1,25	414,817	519,9854426	5,6419	543,581	0,000
42897	P99	20-30	4,90	4,58	-0,32	1,24					
42898	P100	0-10	5,26	4,15	-1,11	1,18	954,589	1129,978414	22,2564	377,436	8,222
42901	P100	10-20	5,13	4,07	-1,06	1,33	878,850	1168,254498	16,9795	430,205	3,199
42902	P100	20-30	5,39	4,25	-1,14	1,44					

### Annexe 3 : Photos de quelques matériels utilisés au laboratoire



Figure 37 : Balance de précision



Figure 38 : Micropipettes



Figure 39 : Etuve pour la détermination de l'humidité



Figure 40 : Etuve pour séchage des matériels



Figure 41 : Agitateur va-et-vient



Figure 42 : Agitateur vortex



Figure 43 : pH-mètre



Figure 44 : Distillateur



Figure 45 : Hotte



Figure 46 : Bloc chauffant



Figure 47 : Spectrophotomètre



Figure 48 : Cuve en verre rinçable pour la lecture au bleu de Murphy et Riley



Figure 49 : Cuve jetable pour la lecture au vert de malachite