

TABLE DES MATIERES

DOCUMENT 1 : ACTIVITES PEDAGOGIQUES ET PARCOURS SCIENTIFIQUE

I. CIVILITE	2
II. CARRIERE	2
III. FORMATIONS ET DIPLOMES	2
IV. ENSEIGNEMENTS THEORIQUES DISPENSES	3
V. ENCADREMENT D'ETUDIANTS	3
V.1. Thèse de doctorat	3
V.2. Diplômes d'Etudes Approfondies (DEA)	3
V.3. Mémoire de Master 2	4
V. 4. Mémoires d'ingénieurs	4
VI. PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS	7
VI.1. Mémoires	7
VI.2. Publications dans des revues à comité de lecture	7
VI.3. Publications dans des revues sans comité de lecture	8
VI.4. Communications Posters dans des congrès internationaux	8
VI.5. Communications orales aux colloques et séminaires internationaux	9
VI.6. Participations aux colloques et séminaires nationaux et régionaux	10
VII. DIRECTION DE PROJETS DE RECHERCHE	11
VII.1. Projet BIRD	11
VII.2. Projet EGALE	11
VII.3. Projet FIHAVANA	11
VIII. PARTICIPATION A DES PROJETS DE RECHERCHES	12
VIII.1. Projet UVED	12
VIII.2. Projet PARMi	12
IX. ORGANISATION DE MANIFESTATIONS SCIENTIFIQUES ET ANIMATIONS SCIENTIFIQUES	13
IX.1. AFA 2014	13
IX.2. AGRICONFERENCE	13
IX.3. Congrès scientifique international sur la sécurité alimentaire et l'agriculture	13
IX.4. Membre du conseil de l'Ecole Doctorale A2E (Agriculture, Elevage et Environnement)	13
IX.5. Membre du comité de thèses :	13

DOCUMENT 2 : SYNTHÈSE DES TRAVAUX DE RECHERCHE

BREF RAPPEL DES PRINCIPALES ÉTAPES DE LA CARRIÈRE SCIENTIFIQUE	15
RESUME	17
ABSTRACT	18
INTRODUCTION GÉNÉRALE	19
SYNTHÈSE DE MES TRAVAUX ET PRINCIPAUX RESULTATS SCIENTIFIQUES (PÉRIODE 2009-2016), PERSPECTIVES DE RECHERCHES POUR LES ANNÉES À VENIR	21
I. Etat de connaissance sur la disponibilité du phosphore dans les sols ferrallitiques de Madagascar et les facteurs déterminants	21
I.1. Les sols ferrallitiques de Madagascar	21
I.2. La disponibilité du phosphore	22
I.2.1. Les ions phosphates en solution	22
I.2.2. Le phosphore contenu dans la phase solide du sol	23
I.3. Les différentes approches d'appréciation de la quantité de phosphore biodisponible dans les sols	24
I.3.1. Les extractions chimiques	25
I.3.2. Evaluation biogéochimique de la biodisponibilité	27
II. L'effet des systèmes de culture sur la disponibilité du phosphore dans les sols ferrallitiques de Madagascar	31
II.1. Introduction.	31
II.2. Matériels et méthodes.	32
II.2.1. Dispositif étudié	32
II.2.2. Les traitements	33
II.2.3. Les échantillons de sol	34
II.2.4. Méthodes analytiques	35
II.2.5. Analyses statistiques des données	37
II.3. Résultats	38
II.3.1. Caractéristiques physico-chimiques des terres analysées (0-20 cm)	38
II.3.2. L'effet des différents traitements sur le pH de sol	39
II.3.3. L'effet des différents traitements sur la matière organique de sol	40
II.3.4. L'effet de la matière organique sur le pH du sol	40
II.3.5. L'effet des différents traitements sur la concentration des ions phosphates (Cp) dans la solution du sol	41
II.3.6. Corrélation entre le pH du sol et la concentration des ions phosphates (Cp) dans la solution du sol	43

II.3.7. Schéma récapitulatif de l'effet des différents traitements sur la concentration des ions phosphates _____	44
II.4. Discussions _____	44
II.4.1. L'effet de la fertilisation sur le pH de sol _____	44
II.4.2. L'effet de la matière organique sur le pH de sol _____	45
II.4.3. L'effet du pH de sol sur la concentration des ions phosphates (Cp) dans le sol _____	46
II.4.4. L'effet de la fertilisation sur la concentration des ions phosphates (Cp) dans le sol _____	46
II.4.5. L'effet de système de culture sur la concentration des ions phosphates (Cp) dans le sol _____	46
II.5. Conclusion _____	49
III. La fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques de Madagascar : effets des engrais biologiques phosphatés _____	50
III. 1. Introduction _____	50
III. 2. Matériel et méthodes _____	51
III. 2.1. Présentation du site d'étude _____	51
III. 2.2. Les engrais biologiques testés et le matériel végétal _____	51
III. 2.3. Estimation de rendement des cultures _____	54
III. 2.4. Analyses statistiques des données _____	55
III. 3. Résultats _____	56
III. 4. Discussions _____	59
III. 4.1. Effet de la fertilisation biologique et phosphatée sur les rendements _____	59
III. 4.2. Effet des doses d'engrais phosphatés apportées sur les rendements _____	60
III. 5. Conclusion _____	61
IV. Perspectives (projet de recherche) _____	62
IV.1. Pratiques agricoles améliorantes de la disponibilité des phosphores dans les sols ferrallitiques de Madagascar _____	62
IV.2. Les engrais phosphatés qui pourraient améliorer la productivité et respecter l'environnement face aux problèmes de changements climatiques _____	64
IV.3. Modélisation de la biodisponibilité des phosphores en utilisant les engrais phosphatés biologiques sur les sols ferrallitiques _____	65
CONCLUSION GENERALE _____	67
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES _____	69

DOCUMENT 3 : PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES

I. Publications dans des revues à comité de lecture _____ 78

1.1. Rabeharisoa L., Randriamanantsoa L., ANDRIAMANIRAKA H., Morel C., 2009. Use of ³²P to calibrate and simulate dynamics of plant-available phosphorus in cultivated Malagasy soils. Soils Newsletter, Vol. 32, N°1, July 2009 : 05-07. _____ 79

1.2. ANDRIAMANIRAKA H., Rabeharisoa L., Michellon R., Moussa N., Morel C., 2010. Influence de différents systèmes de culture sur la productivité de sols cultivés des Hautes Terres de Madagascar et conséquences pour le bilan de phosphore. Etude et Gestion des Sols, 17, 2, 2010.83

1.3. ANDRIAMANIRAKA H., Rakotoson T., Rasoamanana A., Zafindrabenja A. A., Razafindramanana N. C., Ramanankaja L., Andriampenomanana S. V., Falinirina M. V., 2015. Effet des engrais biologiques phosphatés sur le rendement des cultures légumières sur des sols ferrallitiques à Madagascar : concombres, oignons et petits pois. AFRIQUE SCIENCE 11(5) (2015) 306 – 316 _____ 96

1.4. Razafindramananana N. C., Rakotoalibera M. H., Remamy R. R. N., ANDRIAMANIRAKA H., Douzet J. M., 2015. Effets des systèmes en semis direct sur l'érosion hydrique et les rendements des cultures pluviales sur les Hautes Terres centrales malgaches. AFRIQUE SCIENCE 11(5) (2015) 227 – 240. _____ 108

II. Publications dans des revues sans comité de lecture _____ 123

2.1. ANDRIAMANIRAKA H., Rabeharisoa L., Michellon R., Moussa N., Morel C., 2008. Bilan des apports et des exportations de phosphore dans des sols Malgaches cultivés selon deux systèmes de culture, l'un avec semis direct sur couvert végétal et l'autre avec labour. Terre malgache (26, sp) : 61-63. _____ 124

III. Communications Posters dans des congrès internationaux _____ 128

3.1. Morel C., ANDRIAMANIRAKA H., Castillon P., Denoroy P., Ericson L., Hanocq D., Kvarnström E., Michellon R., Moussa N., Plénet D., Rabeharisoa L., 2009. Predicting soil phosphorus availability to plants in cropped soils. L'Europe de la fertilisation 3-4 février 2009, Rennes, France. _____ 129

3.2. ANDRIAMANIRAKA H., Andriampenomanana S. V., Falinirina M. V., Rasoamanana A., 2013. Détermination d'une dose efficiente de l'engrais biologique phosphaté Guanotsar pour une meilleure productivité dans la culture de concombre. 11^{èmes} Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse au Palais des Congrès du Futuroscope à Poitiers, 20 et 21 novembre 2013, Poitiers, France. _____ 131

3.3. Falinirina M. V., Masse D., ANDRIAMANIRAKA H., Rabeharisoa L., 2013. Effets de la quantité et de la qualité de l'apport de résidus organiques sur la minéralisation du carbone et de l'azote organique dans les ferralsols. 11^{èmes} Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse au Palais des Congrès du Futuroscope à Poitiers, 20 et 21 novembre 2013, Poitiers, France. _____ 133

3.4. Falinirina M. V., ANDRIAMANIRAKA H., Rabeharisoa L., Razaivaovoloniaina D., Razafintsalama V., Randriamandratonirina N., Masse D., 2014. Amélioration de la qualité chimique des sols de tanety mis en culture par apport des matières organiques exogènes. 2nd international conference and immersion program, SAPREJ 28 April - 3 May 2014, Antananarivo, MADAGASCAR. _____ 135

3.5. ANDRIAMANIRAKA H., ANDRIAMPENOMANANA S. V., FALINIRINA M. V., NASOLONJANAHARY T. H., 2014. Comparaison d'effets des différents types d'engrais biologiques

phosphates sur une culture légumière pratiquée sur un sol ferrallitique. Journées d'Étude des Sols (JES) 2014, 01 au 03 juillet 2014, Chambéry, France.	137
3.6. ANDRIAMANIRAKA H., RABEHARISOA L., MICHELLON R., MOUSSA N. et MOREL C., 2014. The effect of the cropping systems with direct seeding on permanent soil cover (systems scv) on the phosphate ions in the solution of soil in the grounds cultivate and on the crop yield highland of Madagascar. International conference "Agroecology For Africa- AFA 2014" in Antananarivo, 03 - 07 November 2014, Antananarivo, Madagascar.	139
3.7. Razafindramanana N. C., Randrianandrasana R. P., ANDRIAMANIRAKA H., Scopel E. 2016. Effet à court terme du semis direct sur le rendement du riz pluvial. Congrès scientifique international sur la sécurité alimentaire et l'agriculture dans les Pays de l'Océan Indien de Madagascar et Comores, à Toamasina du 26 au 28 mai 2016.	141
IV. Communications orales AUX COLLOQUES ET SEMINAIRES internationaux	143
4.1. ANDRIAMANIRAKA H., Rabeharisoa L., Michellon R., Moussa N., Morel C., 2007. Bilan des apports et des exportations de phosphore dans des sols Malgaches cultivés selon deux systèmes de culture, l'un avec semis direct sur couvert végétal et l'autre avec labour. Séminaire International : Les sols tropicaux en semis-direct sous couvertures végétales. 03 décembre 2007, Antananarivo, Madagascar.	144
4.2. Falinirina M. V., Rabeharisoa L., ANDRIAMANIRAKA H., Masse D., 2013. Identification des moyens d'amélioration des sols pour augmenter la production alimentaire dans l'agriculture urbaine. Colloque international biodiversité et changement climatique, 10 et 11 décembre 2013, Antananarivo, MADAGASCAR.	148
4.3. Fanjaniaina M.L., Salgado P., Tillard E., Delarivière J., Ramahandry F., Razafimanantsoa M.-P., Razafimahatratra H., ANDRIAMANIRAKA H., Rabeharisoa L., Becquer T. 2014. First attempt using Near Infrared Reflectance Spectroscopy to evaluate the element content of flag leaf rice in Malagasy farm level. Conférence AfA 2014, Agroecology for Africa, 3-7/11/2014, Antananarivo, Madagascar.	153
4.4. Raminoarison M. A., Marikindrianjafimpahizato A. J., Rabeson R., Rakotoarisoa N. M., ANDRIAMANIRAKA H., Razafimahatratra H. M . 2016. Réponses de la variété de riz NERICA-L36 aux différentes formes d'engrais azotes. Congrès scientifique international sur la sécurité alimentaire et l'agriculture dans les Pays de l'Océan Indien de Madagascar et Comores, à Toamasina Madagascar. du 26 au 28 mai 2016.	159
V. Participations aux colloques et séminaires nationaux et régionaux	166
5.1. ANDRIAMANIRAKA H., Rabeharisoa L., 2008. L'effet du système de culture semis direct sous couverture végétale (SCV) sur les ions phosphates dans la solution des sols cultivés de Haute Terre de Madagascar. (Académie Malgache).	167
5.2. Falinirina M. V., Masse D., Rabeharisoa L., ANDRIAMANIRAKA H., 2012. Amélioration de la productivité de maïs sur tanety avec l'apport des matières organiques de qualité. Forum de la recherche. 10, 11, 12 juillet 2012 Antananarivo Madagascar.	187
5.3. ANDRIAMANIRAKA H., Andriampenomanana S. V., Falinirina M. V., Rakotoson L. T., 2012. Fertilisation optimum pour une meilleure productivité d'une légumineuse avec des engrais biologiques phosphatés : Expérimentation réalisée avec le Petit pois « Pisum sativum ». Forum de la recherche. 10, 11, 12 juillet 2012 Antananarivo Madagascar.	189

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Les espèces ioniques de l'acide orthophosphorique (H_3PO_4) en fonction de pH de la solution 23
- Figure 2 : Représentation schématique du cycle du phosphore dans un écosystème, fertilisé et cultivé. _____ 24
- Figure 3 : Gauche : Régression linéaire ($y=0.005 + 0.995x$, 54 observations, $r^2=0.97$) entre la composition isotopique du P prélevé par une culture et la composition isotopique des ions P en solution d'une suspension de sol (1g/10ml). Droite : Régression linéaire ($y=5.1 + 0.95x$, 54 observations, $r^2=0.98$) entre la valeur L et la valeur E _____ 30
- Figure 4 : pH eau du sol d'Andranomanelatra en fonction de système de culture adopté : semis direct sur couverture végétale (SCV) ou labour et le niveau de fertilisation utilisé : F1 ou F2 ____ 39
- Figure 5 : Concentration en carbone total dissous dans le sol d'Andranomanelatra en fonction de système de culture adopté et le niveau de fertilisation utilisé _____ 40
- Figure 6 : Corrélation entre le carbone total dissous et le pH du sol d'Andranomanelatra _____ 41
- Figure 7 : Concentration en ions phosphates dans la solution du sol d'Andranomanelatra en fonction de système de culture adopté et le niveau de fertilisation utilisé _____ 42
- Figure 8 : Corrélation entre le pH et la concentration des ions phosphates dans la solution du sol d'Andranomanelatra _____ 43
- Figure 9 : Schéma récapitulatif de l'effet des différents traitements sur la concentration des ions phosphates dans le sol d'Andranomanelatra _____ 44
- Figure 10 : Réponse de la culture du concombre au traitement Guanotsar à doses croissantes 200 $kg.ha^{-1}$, 400 $kg.ha^{-1}$, et 600 $kg.ha^{-1}$ _____ 56
- Figure 11 : Réponse de la culture d'oignon au traitement Guanobarren à doses croissantes 200 $kg.ha^{-1}$, 400 $kg.ha^{-1}$, et 600 $kg.ha^{-1}$ _____ 57
- Figure 12 : Réponse de la culture de petit pois aux traitements Guanotsar à doses croissantes 200 $kg.ha^{-1}$, 400 $kg.ha^{-1}$, et 600 $kg.ha^{-1}$ _____ 58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Différentes méthodes d'analyse de phosphore assimilable (Zemoura, 2005)	26
Tableau 2 : Les quantités (kg ha^{-1}) apportées de phosphore (P) pour les niveaux de fertilisation F1 et F2 dans le dispositif d'Andranomanelatra	34
Tableau 3 : Itinéraires culturaux pour un maïs implanté dans une couverture vive (desmodium, trèfle, cassia), sur une couverture morte (résidu de soja) et sur labour (source : TAFA, 2001)	34
Tableau 4 : Caractéristiques physico-chimiques du sol d'Andranomanelatra sur la profondeur de labour (0-20 cm) pour les quatre traitements (Lb_F1, Lb_F2, SCV_F1 et SCV_F2)	38
Tableau 5 : Comparaison entre le P total dissous, la Cp obtenue par la méthode chromatographie ionique (CI) et la Cp obtenue par colorimétrie (n=3)	41
Tableau 6 : Caractéristiques des engrais utilisés	52
Tableau 7 : Fertilisants et matériel végétal	52

LISTE DES ABREVIATIONS

AFNOR	: Association Française des Normalisations
Al	: Aluminium
AUF	: Agence Universitaire de la Francophonie
BIRD	: Biodiversity Integration and Rural Development
Ca	: Calcium
CEC	: Capacité d'Echange Cationique
Cl	: Chromatographie Ionique
CIRAD	: Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CO	: Carbone Organique
Cp	: Concentration des ions phosphates dans la solution de sol
ESSA	: Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
F1	: Niveau de fertilisation avec des fumiers
F2	: Niveau de fertilisation avec des fumiers, des engrais minéraux, et des chaulages
Fe	: Fer
GM	: Guanobarren
GT	: Guanotsar
INRA	: Institut National de la Recherche Agronomique
K	: Potassium
KCl	: Chlorure de potassium
Kg	: Kilogramme
L	: Litre
Lb	: Système Labour
mg	: Milligramme
MO	: Matière organique
N	: Azote
P	: Phosphore
PARMI	: Promoting Agroecology demands innovation in education
PCN	: Point de Charge Nulle
Pr	: Ions phosphates diffusibles
Pw	: Quantité d'ions phosphates dans la solution du sol
SCV	: Système de culture sous couvert végétal
SD	: Seuil de détection
SQ	: Seuil de quantification
TAFA	: Tany sy Fampandrosoana (Terre et Développement)
TCEM	: Transfert sol-plante et Cycle des Eléments Minéraux dans les écosystèmes cultivés
UMR	: Unité Mixte de Recherche
UVED	: Université Virtuelle Environnement et Développement durable

**DOCUMENT 1 : ACTIVITES PEDAGOGIQUES ET PARCOURS
SCIENTIFIQUE**

CURRICULUM VITAE



I. CIVILITE

Nom et prénoms : ANDRIAMANIRAKA Jaona Harilala

Date de naissance : 04 février 1973

Situation matrimoniale : marié

Adresse : Lot II F 74 D bis A Andraisoro Antananarivo 101 Madagascar

Nationalité : Malagasy

Contact : jharilala@gmail.com

+261 33 12 812 39 ou +261 34 15 980 17

Mention « Agriculture Tropicale et Développement Durable »

Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques

Université d'Antananarivo

II. CARRIERE

- **2003-2011** : Enseignant-Chercheur vacataire à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques au Département « Agriculture »
- **2011 jusqu'à ce jour** : Enseignant-Chercheur permanent à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques au Département « Agriculture »
- **2013 – 2016** : Chef du Département « Agriculture » à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
- **2016 jusqu'à ce jour** : Responsable de la Mention « Agriculture Tropicale et Développement Durable » (AT2D)

III. FORMATIONS ET DIPLOMES

ANNEE	ETABLISSEMENT D'ETUDES	DIPLOMES OBTENUS
2009	INRA Bordeaux France- ESSA Antananarivo Madagascar	Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques
2004	Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA) Université d'Antananarivo	DEA en Agro-Management
2002	Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux Belgique	Diplôme d'Etudes Spécialisées (DES) en Science de l'Environnement : Gestion des Risques Naturels
1997	Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA) Université d'Antananarivo	Ingénieur en Agronomie Option « Agriculture »
1992	Lycée Rahevivelo Ramamonjy Fianarantsoa	Baccalauréat série C et D

IV. ENSEIGNEMENTS THEORIQUES DISPENSES

- Cours sur les Sciences du sol pour les étudiants en Master 2 de la Mention Agriculture Tropicale et Développement Durable de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques : 2 crédits (30 heures)
- Cours sur la dégradation-protection-réhabilitation des agrosystèmes pour les étudiants en Master 2 de la Mention Agriculture Tropicale et Développement Durable de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques : 1 crédit (15 heures)
- Cours sur l'Agriculture biologique pour les étudiants en Master 2 de la Mention Agriculture Tropicale et Développement Durable de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques : 2 crédits (30 heures)
- Cours sur la télédétection pour les étudiants en Master 1 de la Mention Agriculture Tropicale et Développement Durable de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques : 2 crédits (30 heures)
- Cours sur le système d'information géographique (SIG) pour les étudiants en Master 1 de la Mention Agriculture Tropicale et Développement Durable de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques : 2 crédits (30 heures)

V. ENCADREMENT D'ETUDIANTS

V.1. Thèse de doctorat

Nombre : 01

1. **RAHANTALALAO S. H. R., (en cours).** Déterminants physico-chimiques de la phytodisponibilité du phosphore des sols malgaches. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.

V.2. Diplômes d'Etudes Approfondies (DEA)

Nombre : 02

1. **HERINDRANOVONA A., 2011.** Analyse des réalisations des activités en lutte antiacridienne et leurs impacts sur la situation acridienne : Cas du criquet migrateur malagasy dans son aire grégarigène du sud de Madagascar au cours de la campagne antiacridienne 2009-2010. Mémoire de DEA de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.

2. **RAKOTOSON L. T., 2013.** Rentabilité des engrais minéraux sur la riziculture au Lac Alaotra. Mémoire de DEA de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.

V.3. Mémoire de Master 2

Nombre : 03

1. **RAZAFIHARIMIANDO F. B., 2015.** Etude de l'efficacité de l'engrais foliaire Mavin sur riz en vue d'augmentation du rendement à Analavory, Région Itasy. Mémoire de Master 2 de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
2. **RAHOLIMBOAHANGY S., 2015.** Approche de la fertilisation du riz irrigué/innondé dans la plaine d'Ambohibary Sambaina, Région Vakinankaratra. Mémoire de Master 2 de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
3. **FANOMEZANA R. A., 2016.** Effet de la qualité des matières organiques fraîches sur le priming effect en fonction du type de sol. Mémoire de Master 2 de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.

V. 4. Mémoires d'ingénieurs

Nombre : 23

1. **RABEZANAHARY S. H., 2004.** Etude du bilan hydrique sous différents systèmes de culture labour et SCV. Mémoire d'ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
2. **RABARIJOHN R. H., 2005.** Possibilité de Développement de la Riziculture dans la Région Amoron'i Mania. Mémoire d'ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
3. **RASOLONIAINA M. B., 2005.** Caractérisation des impacts de différents systèmes de culture en semis direct sur couverture végétale sur la réduction de ruissellements et érosions. Mémoire d'ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
4. **ANDRIASATARINTSOA D., 2006.** Contribution à la mise en place d'une Agriculture respectueuse de l'environnement dans les zones périphériques du parc national Andasibe Mantadia : Cas de la forêt déclassée de Sahanody. Mémoire d'ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
5. **RANDRIAMANANANDRO A., 2009.** Effets du Triple superphosphate et du fumier chez le riz pluvial dans un système de culture continu : cas d'un ferralsol à Laniera. Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.

6. **FANJANIAINA M.L., 2009.** Effet du guano et du triple superphosphate sur le rendement du riz pluvial et sur la phytodisponibilité du phosphore de sol. Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
7. **RANDRIANAIVONIRINA J., 2009.** Effet du fumier et du triple superphosphate sur la fertilité phosphatée de « tanety » chez le riz pluvial après une légumineuse. Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
8. **RAKOTOLALAO O., 2009.** Evolution de l'efficacité d'un engrais phosphaté dans les sols ferrallitiques de « tanety » sur un essai de longue durée. Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
9. **RAKOTOSON T., 2009.** Effets de l'utilisation du fumier de ferme et du superphosphate triple sur la fertilité phosphatée des sols ferrallitiques sous culture de riz pluvial. Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
10. **RAZAFIMAHATRARA H., 2009.** Comparaison des différentes formes et doses d'apport de phosphore et effet de la légumineuse sur la mise à disposition du phosphore dans un ferralsole de Tanety, Cas de *Vigna subterranea*. Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
11. **RAVOAVISON N., 2010.** Combinaison de la télédétection satellitaire et modèle agro-économique pour la détermination de dommage et intérêt hors site d'érosion : Cas Région Itasy. Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
12. **RAKOTOSON L. T., 2011.** Expérimentation agronomique sur la culture de Petit Pois « *Pisum sativum* » : variété et fertilisation (Cas d'Anevoka). Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
13. **RASOAMANANA A., 2012.** Essai variétal de concombre avec une fertilisation à doses croissantes de Guanotsar à Anevoka-Andasibe dans la région d'Alaotra Mangoro. Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
14. **RARIVOARINORO H. M., 2012.** Comparaison des différents types de fertilisants à base de guanomad sur la culture de courgette : cas d'Anevoka. Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.

15. **ZAFINDRABENJA A. A., 2012.** Expérimentation agronomique sur la fertilisation de la culture d'oignon « *Allium cepa* » (Cas d'Anevoka). Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
16. **RAJAONARIVELO S. Y., 2012.** Tests de performance des variétés hybrides de maïs Pannar dans les régions de Vakinakaratra et de Bongolava. Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
17. **MAHATSINDRY R. S., 2012.** Effet de la dose croissante de Guanoferti-N sur la croissance et la production des légumes à feuilles : Pak-choy (*Brassica rapa* var. *Chinensis*) et Wom-bok (*Brassica rapa* var. *Pekinensis*). Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
18. **NASOLONJANAHARY T. H., 2013.** Expérimentation agronomique sur l'étude des effets des différents types de fertilisant Guano sur le Haricot vert « *Phaseolus vulgaris* L. » à Anevoka, cas de la variété « Monel ». Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
19. **ANDRIATAHIANA T. E., 2013.** Essai agronomique de comparaison entre variété locale et introduite de Laitue « *Lactuca sativa* » par fertilisation biologique Guano dans la région Anevoka-Andasibe. Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
20. **RAHOBIHARISON L. M. N., 2014.** Etude des effets de la dose et du fractionnement de l'apport de lombricompost sur la tomate : « ACE VF 55 » à Ambanitsena. Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
21. **RASOAMANANA M. N., 2014.** Etude de faisabilité de la mise en place d'un système de garantie participatif pour les produits biologiques dans la Région Vakinankaratra. Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
22. **RAKOTONJANAHARY S. A., 2014.** Caractérisation des effets des systèmes de cultures en semis direct sur couverture végétale permanente sur le contrôle des adventices au Lac Alaotra. Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
23. **RAZAFINDRAKOTO L. F., 2015.** Cinétique de minéralisation du guanomad en milieu liquide avec des activateurs. Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.

VI. PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

VI.1. Mémoires

Nombre : 04

1. **ANDRIAMANIRAKA H., 1997.** Mise en place d'un observatoire de la filière coton dans le Sud-Ouest de Madagascar, Mémoire d'Ingénieur en Agronomie, 92 pages.
2. **ANDRIAMANIRAKA H., 2002.** La place du système de culture semis direct sur couverture végétale dans la protection de l'environnement en zone tropicale : cas du Sud Ouest de Madagascar, Mémoire de DES, 55 pages.
3. **ANDRIAMANIRAKA H., 2004.** Modélisation de la dynamique du phosphore organique dans des sols ferrallitiques sous système de culture semis direct, Mémoire de DEA, 23 pages.
4. **ANDRIAMANIRAKA 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, 186 pages.

VI.2. Publications dans des revues à comité de lecture

Nombre : 04

1. Rabeharisoa L., Randriamanantsoa L., **ANDRIAMANIRAKA H.**, Morel C., **2009.** Use of ^{32}P to calibrate and simulate dynamics of plant-available phosphorus in cultivated Malagasy soils. *Soils Newsletter*, Vol. 32, N°1, July 2009 : 05-07.
2. **ANDRIAMANIRAKA H.**, Rabeharisoa L., Michellon R., Moussa N., Morel C., **2010.** Influence de différents systèmes de culture sur la productivité de sols cultivés des Hautes Terres de Madagascar et conséquences pour le bilan de phosphore. *Etude et Gestion des Sols*, 17, 2, 2010.
3. **ANDRIAMANIRAKA H.**, Rakotoson T., Rasoamanana A., Zafindrabenja A. A., Razafindramananana N. C., Ramanankaja L., Andriampenomanana S. V., Falinirina M. V., **2015.** Effet des engrais biologiques phosphatés sur le rendement des cultures légumières sur des sols ferrallitiques à Madagascar : concombres, oignons et petits pois. *AFRIQUE SCIENCE* 11(5) (2015) 306 - 316.
4. Razafindramananana N. C., Rakotoalibera M. H., Remamy R. R. N., **ANDRIAMANIRAKA H.**, Douzet J. M., **2015.** Effets des systèmes en semis direct sur l'érosion hydrique et les rendements des cultures pluviales sur les Hautes Terres centrales malgaches. *AFRIQUE SCIENCE* 11(5) (2015) 227 – 240.

VI.3. Publications dans des revues sans comité de lecture

Nombre : 01

1. **ANDRIAMANIRAKA H.**, Rabeharisoa L., Michellon R., Moussa N., Morel C., **2008**. Bilan du phosphore dans des Ferralsols malgaches cultivés selon deux systèmes de culture, l'un avec semis direct sous couvert végétal et l'autre avec labour. Terre malgache (26, sp) : 61-63.

VI.4. Communications Posters dans des congrès internationaux

Nombre : 07

1. Morel C., **ANDRAMANIRAKA H.**, Castillon P., Denoroy P., Ericson L., Hanocq D., Kvarnström E., Michellon R., Moussa N., Plénet D., Rabeharisoa L., **2009**. Predicting soil phosphorus availability to plants in cropped soils. L'Europe de la fertilisation 3-4 février 2009, Rennes, France.
2. **ANDRIAMANIRAKA H.**, Andriampenomanana S. V., Falinirina M. V., Rasoamanana A., **2013**. Détermination d'une dose efficiente de l'engrais biologique phosphaté Guanotsar pour une meilleure productivité dans la culture de concombre. 11^{èmes} Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse au Palais des Congrès du Futuroscope à Poitiers, 20 et 21 novembre 2013, Poitiers, France.

Source :

http://www.comifer.asso.fr/images/pdf/11emes_rencontres/Interventions/Posters/23%20-%20Harilala%20ANDRIAMANIRAKA/Poster%20Harilala%20ANDRIAMANIRAKA.pdf

3. Falinirina M. V., Masse D., **ANDRIAMANIRAKA H.**, Rabeharisoa L., **2013**. Effets de la quantité et de la qualité de l'apport de résidus organiques sur la minéralisation du carbone et de l'azote organique dans les ferralsols. 11^{èmes} Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse au Palais des Congrès du Futuroscope à Poitiers, 20 et 21 novembre 2013, Poitiers, France.

Source :

http://www.comifer.asso.fr/images/pdf/11emes_rencontres/Interventions/Posters/33%20-%20Virginie%20FALINIRINA/Poster%20Virginie%20FALINIRINA.pdf

4. Falinirina M. V., **ANDRIAMANIRAKA H.**, Rabeharisoa L., Razaivaovololoniaina D., Razafintsalama V., Randriamandratonirina N., Masse D., **2014**. Amélioration de la qualité chimique des sols de tanety mis en culture par apport des matières organiques exogènes. 2nd international conference and immersion program, SAPREJ 28 April - 3 May 2014, Antananarivo, MADAGASCAR.

Source:

<http://saprej2014madagascar.webs.com/saprej2014LIST%20OF%20ABSTRACTS.pdf>

5. **ANDRIAMANIRAKA H.**, Andriampenomanana S. V., Falinirina M. V., Nasolonjanahary T. H., **2014**. Comparaison d'effets des différents types d'engrais biologiques phosphates sur une culture légumière pratiquée sur un sol ferrallitique. Journées d'Étude des Sols (JES) 2014, 01 au 03 juillet 2014, Chambéry, France.

Source :

<http://jes2014.univ-savoie.fr/images/document/Actes-JES-2014-Session8&9.pdf>

6. **ANDRIAMANIRAKA H.**, Rabeharisoa L., Michellon R., Moussa N. et Morel C., **2014**. The effect of the cropping systems with direct seeding on permanent soil cover (systems SCV) on the phosphate ions in the solution of soil in the grounds cultivate and on the crop yield highland of Madagascar. International conference "Agroecology For Africa- AFA 2014" in Antananarivo, 03 - 07 November 2014, Antananarivo, Madagascar.

Source :

http://www.cirad.mg/conference/AfA-2014/call-for-abstracts-and-pape/full-papers/?dl_page=2

7. Razafindramanana N. C., Randrianandrasana R. P., **ANDRIAMANIRAKA H.**, Scopel E. **2016**. Effet à court terme du semis direct sur le rendement du riz pluvial. Congrès scientifique international sur la sécurité alimentaire et l'agriculture dans les Pays de l'Océan Indien de Madagascar et Comores, à Toamasina du 26 au 28 mai 2016.

Source : En cours de mise en ligne

VI.5. Communications orales aux colloques et séminaires internationaux

Nombre : 04

- **ANDRIAMANIRAKA H.**, Rabeharisoa L., Michellon R., Moussa N., Morel C., **2007**. Bilan des apports et des exportations de phosphore dans des sols Malgaches cultivés selon deux systèmes de culture, l'un avec semis direct sur couvert végétal et l'autre avec labour. Séminaire International : Les sols tropicaux en semis-direct sous couvertures végétales. 03 décembre 2007, Antananarivo, Madagascar.
- Falinirina M. V., Rabeharisoa L., **ANDRIAMANIRAKA H.**, Masse D., **2013**. Identification des moyens d'amélioration des sols pour augmenter la production alimentaire dans l'agriculture urbaine. Colloque international biodiversité et changement climatique, 10 et 11 décembre 2013, Antananarivo, MADAGASCAR.

Source :

Acte du colloque page 179-182.

- Fanjaniaina M.L., Salgado P., Tillard E., Delarivière J., Ramahandry F., Razafimanantsoa M.-P., Razafimahatratra H., **ANDRIAMANIRAKA H.**, Rabeharisoa L., Becquer T. **2014**. First attempt using Near Infrared Reflectance Spectroscopy to evaluate the element content of flag leaf rice in Malagasy farm level. Conférence AfA 2014, Agroecology for Africa, 3-7 November 2014, Antananarivo, Madagascar.

Source :

http://www.cirad.mg/conference/AfA-2014/call-for-abstracts-and-pape/full-papers/?dl_page=2

- Raminoarison M. A., Marikindrianjafimpahizato A. J., Rabeson R., Rakotoarisoa N. M., **ANDRIAMANIRAKA H.**, Razafimahatratra H. M. . 2016. Réponses de la variété de riz NERICA-L36 aux différentes formes d'engrais azotes. Congrès scientifique international sur la sécurité alimentaire et l'agriculture dans les Pays de l'Océan Indien de Madagascar et Comores, à Toamasina Madagascar. du 26 au 28 mai 2016.

Source : En cours de mise en ligne

VI.6. Participations aux colloques et séminaires nationaux et régionaux

Nombre : 03

1. **ANDRIAMANIRAKA H.**, Rabeharisoa L., **2008**. L'effet du système de culture semis direct sous couverture végétale (SCV) sur les ions phosphates dans la solution des sols cultivés de Haute Terre de Madagascar. (Académie Malgache).
2. Falinirina M. V., Masse D., Rabeharisoa L., **ANDRIAMANIRAKA H.**, **2012**. Amélioration de la productivité de maïs sur tanety avec l'apport des matières organiques de qualité. Forum de la recherche. 10, 11, 12 juillet 2012 Antananarivo Madagascar.
3. **ANDRIAMANIRAKA H.**, Andriampenomanana S. V., Falinirina M. V., Rakotoson L. T., **2012**. Fertilisation optimum pour une meilleure productivité d'une légumineuse avec des engrais biologiques phosphatés : Expérimentation réalisée avec le Petit pois « *Pisum sativum* ». Forum de la recherche. 10, 11, 12 juillet 2012 Antananarivo Madagascar.

VII. DIRECTION DE PROJETS DE RECHERCHE

VII.1. Projet BIRD

Octobre 2009 - Décembre 2013 : Essai agronomique sur l'utilisation des différents types d'engrais biologiques phosphatés sur des cultures maraichères dans les zones périphériques de la forêt de Maromizaha. Budget : 56 000 Euros. C'est un projet BIRD financé par l'Union Européenne et en collaboration avec l'Université de Turin Italie et en partenariat technique avec la société Guanomad.

Les objectifs de ce projet étaient de tester l'efficacité et l'efficience des différents types d'engrais biologiques phosphatés sur les cultures pratiquées par les paysans riverains de la forêt de Maromizaha et de valoriser les espèces et variétés autochtones en utilisant les engrais biologiques phosphatés pour le respect de l'environnement.

VII.2. Projet EGALÉ

Octobre 2013 - Avril 2017 : Amélioration de l'EFFICACITE, de la GESTION, de la VISIBILITE et de l'IMPACT de la Coopération EU – ACP dans le domaine de l'Enseignement Supérieur et de la recherche. L'objectif du projet est de renforcer les compétences INSTITUTIONNELLES et ACADÉMIQUES et L'INTÉGRATION RÉGIONALE en matière D'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR et DE RECHERCHE à travers le développement de réseaux institutionnels. Ce projet EGALÉ s'inscrit dans le cadre de la collaboration des différents partenaires universitaires, entre autre : Université de Turin, Université de Comores, Université de Toamasina, Université d'Antananarivo avec la participation de l'ENS et l'ESSA dont je suis le coordinateur local. Le domaine d'intervention est l'Agriculture et la sécurité alimentaire.

VII.3. Projet FIHAVANA

Janvier 2015 - Janvier 2017 : Promotion de la culture maraichère autour des aires protégées d'Andasibe. L'objectif du projet est d'aider les paysans riverains des aires protégées sur la promotion de la culture maraichère pour qu'ils ne détruisent plus la forêt. Ce projet s'inscrit dans le cadre de la collaboration des différents partenaires, entre autre : l'Université de Turin (Département Agronomie), l'Université d'Antananarivo (Département Agriculture de l'ESSA dont je suis le coordinateur technique local) et le GERP. Le domaine d'intervention est l'Agriculture et l'environnement.

VIII. PARTICIPATION A DES PROJETS DE RECHERCHES

VIII.1. Projet UVED

2013-2014 : PROCESSUS ÉCOLOGIQUES ET SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES DES SOLS

A travers des modules de formations, les objectifs principaux du projet sont de développer les connaissances sur les processus écologiques des sols et de montrer comment ces processus peuvent être mobilisés pour fournir des services écosystémiques. Ce projet s'inscrit dans la valorisation de résultats de recherches pour l'enseignement d'un projet pluridisciplinaire sur les processus écologiques et les processus d'innovation en Agriculture de Conservation (projet ANR PEPITES). Il permettra de prolonger les activités de création de ressources pédagogiques numériques initiées dans le cadre du projet et de valoriser les compétences des enseignants chercheurs impliqués dans le projet (16 EC de SupAgro, ISARA, AgroParisTech, IRD et Université d'Antananarivo dont la faculté des sciences et l'ESSA).

VIII.2. Projet PARMi

2014-2016 : Projet PARMi « *Promoting Agroecology demands innovation in education* »

L'agroécologie, fondée sur la conception de systèmes innovant valorisant les fonctionnalités écologiques des agrosystèmes, constitue une réponse aux enjeux de l'agriculture à travers le monde : produire et fournir des services écosystémiques dans un contexte de moindre disponibilité des intrants et d'accroissement des incertitudes (changement climatique etc.). Un des principaux freins à la transition agroécologique est la construction et la transmission de connaissances sur les processus écologiques, sur les raisonnements et les pratiques permettant de les mobiliser en situation agricole en fonction du contexte local. Les objectifs du projet PARMi sont :

- de construire une offre de formation numérique en agroécologie fondée sur une forte interdisciplinarité (agronomie, écologie, sciences économiques et sociales, sciences biologiques) et sur l'intégration de connaissances scientifiques, techniques et opérationnelles ;
- d'utiliser ces ressources numériques dans 5 situations au Nord et au Sud : (i) une école chercheur internationale, des formations de Master et d'école doctorale (ii) à Montpellier SupAgro et (iii) à l'Université d'Antananarivo, (iv) des formations de l'enseignement technique agricole (v) un MOOC destiné à un large public.

Ces situations d'usage des ressources numériques sont conçues pour être des lieux de création de nouvelles ressources et de partenariat N-S, permettant ainsi de renforcer le dispositif de co-construction des ressources et la mutualisation des connaissances.

Le projet, qui commence en octobre 2014 pour une durée de 2 ans, rassemble 7 unités de recherche travaillant sur l'agroécologie, 3 Départements de Montpellier SupAgro et 3

partenaires de l'Université d'Antananarivo. Il s'appuie sur les compétences en ingénierie pédagogique et e-learning de l'équipe TICE de Montpellier SupAgro. Il est coordonné par Stéphane de Tourdonnet (agronome) avec l'aide de Marie-Laure Navas (écologue), Lala Harivelo Ravaomanarivo (entomologiste), Tantely Razafimbelo-Andriamifidy (science du sol), Harilala Andriamaniraka (Science du sol), Aurélie Javelle (anthropologue) et Sarah Clerquin (ingénieure pédagogique).

IX. ORGANISATION DE MANIFESTATIONS SCIENTIFIQUES ET ANIMATIONS SCIENTIFIQUES

IX.1. AFA 2014

- 2014 : Membre du comité d'organisation du Séminaire Internationale AFA 2014 « **Agroecology and Sustainability of Tropical Rainfed Cropping Systems** », qui s'est déroulé à Antananarivo (Hotel Panorama) du 03 au 07 novembre 2014.

IX.2. AGRICONFERENCE

- Depuis 2014 : Organisateur des séminaires mensuels (AGRICONFERENCE) sur des différents thèmes (agrobusiness, politique agricole, le développement rural avec le secteur privé,...) au sein de la Mention Agriculture Tropicale et Développement Durable (AT2D) de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques.

IX.3. Congrès scientifique international sur la sécurité alimentaire et l'agriculture

- Mai 2016 : Membre du comité d'organisation et scientifique du Congrès scientifique international sur la sécurité alimentaire et l'agriculture dans les Pays de l'Océan Indien de Madagascar et Comores, qui s'est déroulé à Toamasina du 26 au 28 mai 2016.

IX.4. Membre du conseil de l'Ecole Doctorale A2E (Agriculture, Elevage et Environnement

IX.5. Membre du comité de thèses :

- Kanto RAZANAMALALA : Priming effect : vers un outil de gestion de la fertilité des sols cultivés à Madagascar.
- Marie Lucia FANJANIAINA : Caractérisation des flux de biomasses et des nutriments pour quantifier le transfert de fertilité dans les exploitations agricoles malgaches. Cas de la région Vakinankaratra.
- Harimenja RAZAFINTSALAMA : Développement de la culture du haricot dans le Moyen Ouest malgache. Effets des apports de phosphore et de l'inoculation par des Rhizobia.

DOCUMENT 2 : SYNTHÈSE DES TRAVAUX DE RECHERCHES

BREF RAPPEL DES PRINCIPALES ETAPES DE LA CARRIERE SCIENTIFIQUE

J'ai débuté ma carrière d'Enseignant-chercheur à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA). En effet depuis 2003, j'ai commencé à donner des cours au sein du Département Agriculture en tant qu'Enseignant vacataire.

En 2004, j'ai fait mon DEA à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA) au département Agro-management sur le thème : « Modélisation de la dynamique du phosphore organique dans des sols ferrallitiques sous système de culture semis direct » sous l'encadrement de Professeur Ramanarivo Sylvain et Professeur Rabeharisoa Lilia.

En 2006, j'ai initié ma thèse de doctorat, grâce à l'obtention d'une bourse de l'Agence Universitaire pour la Francophonie (AUF), qui s'intitule « Etude et modélisation de la biodisponibilité du phosphore dans un sol cultivé de Madagascar en fonction des pratiques culturales », avec l'UMR TCEM de l'INRA Bordeaux. Cette thèse a été encadrée par Professeur Lilia Rabeharisoa, Directrice du Laboratoire des Radio-isotopes (LRI) de l'Université d'Antananarivo et en même temps Enseignant-Chercheur de l'ESSA et Docteur HDR Christian MOREL de l'UMR TCEM de l'INRA Bordeaux.

Ma thèse est le fruit de la collaboration de longue date qui s'est établie entre l'UMR TCEM de l'INRA Bordeaux et le LRI. Cette thèse a été effectuée sur les dispositifs agronomiques expérimentaux de l'ONG Tafa à Antsirabe, mais aussi en très forte collaboration avec l'unité de recherche en partenariat (URP) Scrid, qui regroupe le Cirad, l'Université d'Antananarivo et le Fofifa.

Depuis ma soutenance en juin 2009, à part l'enseignement j'ai continué mes activités de recherche dans le cadre des différents projets que j'ai menés avec les étudiants et les collègues de l'ESSA, le sujet de l'étude a été et est toujours axé sur le phosphore et les problématiques des sols ferrallitiques à Madagascar.

Depuis 2011, j'ai été recruté comme Enseignant-Chercheur permanent au Département Agriculture de l'ESSA et j'ai ainsi continué mes activités d'enseignement et de travaux de recherches sur ce thème « phosphore et sols ferrallitiques ». J'ai également continué mes travaux de recherche sur les aspects plutôt biologiques qui sont respectueux de l'environnement face aux problèmes de changement climatique qui est devenu un sujet incontournable actuellement. Ces travaux ont été menés avec l'Université de Turin en Italie dans le cadre du Projet BIRD et la société GUANOMAD fournisseur des engrais biologiques phosphatés.

Concernant les enseignements, j'ai dispensé des cours de Sciences du Sol, d'Agriculture biologique et de Dégradation des sols et environnement au sein du Département Agriculture. J'ai également encadré plusieurs mémoires d'ingénieurs, de DEA et de Master relatifs aux thématiques de phosphore et des problématiques des sols ferrallitiques de Madagascar. Actuellement, j'encadre une thèse de doctorat avec Professeur Lilia Rabeharisoa.

Depuis 2013, je suis Chef de Département « Agriculture » de l'ESSA, et je coordonne plusieurs projets de formation et de recherche en partenariat avec l'Université de Turin en Italie (Projet EGALE) et l'Université SupAgro de Montpellier (Projet UVED et projet PARMi).

Depuis 2016, je suis Responsable de la Mention « Agriculture Tropicale et Développement Durable » de l'ESSA, et la coordination des différents projets de formation et de recherche en partenariat avec l'Université de Turin en Italie (Projet EGALE) et l'Université SupAgro de Montpellier (Projet UVED et projet PARMi) continue toujours.

RESUME

La connaissance de la biodisponibilité du phosphore dans le sol pour les plantes représente un grand intérêt agronomique dans le but de l'amélioration de la production agricole. Par contre, cette amélioration occasionne toujours des problèmes sur l'environnement surtout par l'intensification de l'agriculture. Ainsi, l'utilisation des engrais biologiques s'avère indispensable pour concilier l'amélioration de la production et la protection de l'environnement. Durant notre recherche, nous étions amenés à chercher les facteurs déterminants qui pourraient améliorer cette biodisponibilité de phosphore et les types d'engrais biologiques phosphatés qui seraient considérés comme solution réconciliant de la production et de l'environnement.

Ainsi, pour la première partie, nous avons utilisé le dispositif d'Andranomanelatra dans lequel les effets des systèmes de culture sur la biodisponibilité du phosphore dans le sol ont été étudiés. Deux facteurs sont étudiés dans cette pratique culturale : le mode de gestion des sols (système en labour conventionnel et système en SCV avec couverture morte) et la fertilisation (organique : fumier de ferme et mixte : fumier de ferme et engrais minéraux avec amendement calcique). Pour la deuxième partie, nous avons testé l'efficacité des engrais biologiques phosphatés dans des conditions où les sols sont acides et ont une teneur faible en phosphore, une étude a été conduite avec des cultures légumières sur un sol ferrallitique dans un dispositif à bloc de Fisher comportant 3 répétitions. Le site d'expérimentation est situé à Anevoka, sur la côte Est de Madagascar. Deux types d'engrais phosphatés tels que le Guanotsar et le Guanobarren à dose croissante $200 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, $400 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ et $600 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ associés chacun avec $5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de compost de déchet urbain de la ville ont été comparés au témoin absolu et au témoin compost de déchet urbain.

Les résultats montrent que pour les ions phosphates dans la solution du sol, le niveau de concentration est très faible, au voisinage du seuil de détection ($0,003 \text{ mg P L}^{-1}$) dans le système labour avec une fertilisation organique seulement. Pour le système SCV avec fertilisation mixte et dolomie, la concentration des ions phosphates en solution peut aller jusqu'à $0,024 \text{ mg P L}^{-1}$. Ces différences s'expliquent par la modification des propriétés physico-chimiques du sol suite aux apports des matières organiques par les couvertures du SCV, des engrais minéraux et de la dolomie.

Quant à l'étude des différents types d'engrais biologiques phosphatés, nous avons pu voir que les cultures sur la parcelle témoin sans aucun apport donnent des rendements plus faibles, suivi par celles sur les parcelles témoin compost de déchet urbain. Les cultures issues des traitements d'engrais phosphatés Guanotsar et Guanobarren à dose plus faible donnent des rendements plus élevés. Les rendements obtenus sont inversement proportionnels à la dose d'engrais phosphatés apportée. L'association des engrais phosphatés avec le compost de déchet urbain augmente l'activité microbienne, par conséquent, la dose significativement forte d'engrais phosphatés diminue le rendement par l'immobilisation microbienne de P de l'engrais.

Mots-clés : *Biodisponibilité, pratiques culturales, Guanotsar, Guanobarren, dose d'apport.*

ABSTRACT

The knowledge of the bioavailability of phosphorus in the soil for plants is a major agricultural interest with the aim of improving agricultural production. On the other side, this improvement still causes problems especially for the environment by the intensification of agriculture. Thus, the use of organic fertilizer is essential to conciliate the improvement of production and environmental protection. During our research, we were asked to find the determining factors that could improve the bioavailability of phosphorus and types of biological phosphate fertilizer that would be considered reconciling solution of production and the environment.

So for the first part, we used the Andranomanelatra device in which the effects of cropping systems on the bioavailability of phosphorus in the soil were studied. Two factors are discussed in this cultivation practice: Soil Management mode (conventional tillage system and system SCV with litter) and fertilizer (organic: farmyard manure and mixed: farmyard manure and mineral fertilizers with liming). For the second part, we tested the effectiveness of biological phosphate fertilizer in conditions where soils are acidic with low phosphorus level, a study was conducted with vegetable crops on an Oxisol in a block device Fisher with 3 repetitions. The test site is located at Anevoka on the east coast of Madagascar. Two types of phosphate fertilizers such as Guanotsar and Guanobarren with increasing dose 200 kg.ha⁻¹, 400 kg.ha⁻¹ and 600 kg.ha⁻¹ each associated with 5 t ha⁻¹ of urban waste compost of the city were compared to absolute control and urban waste compost as a witness. The results show that for the phosphate ions in the soil solution, the concentration level is very low, near the detection limit (0.003 mg P L⁻¹) in the tillage system with organic fertilization only. For the SCV system with mixed fertilization and dolomite, the concentration of phosphate ions in solution may be up to 0.024 mg P L⁻¹. These differences are explained by the change of physicochemical properties of soil following the contributions of organic matter from the covers of the SCV, mineral fertilizer and dolomite.

As for the study of different types of biological phosphate fertilizer, we could see that the cultures on the control plot without any input gives lower yields, followed by those on the control plots of urban waste compost. Crops grown with phosphatic fertilizer treatments and Guanotsar Guanobarren in lower dose give higher yields. The yields are inversely proportional to the given dose of phosphatic fertilizer. The combination of phosphate fertilizer with urban waste compost increases microbial activity, therefore, the significantly high phosphate fertilizer dose reduces the yield by the microbial immobilization of P from fertilizer.

Keywords : *Bioavailability, cultural practices, Guanotsar, Guanobarren, contribution dose.*

INTRODUCTION GENERALE

La faible production agricole à Madagascar est liée à la mauvaise qualité des sols (Arrivets, 1998). Selon les travaux de Roederer (1971), Madagascar possède plusieurs types de sols : sols ferrallitiques, sols ferrugineux tropicaux, sols hydromorphes,... Comme dans d'autres pays tropicaux (Balibino et *al.*, 2002), ce sont les sols ferrallitiques qui dominent la surface totale car ils occupent environ 65% de la superficie de l'île. Les sols ferrallitiques sont des sols argileux riches en fer et en aluminium sous forme hydratée qui se développent normalement sous forêt en climat chaud et humide, à partir de roches différentes (granite, gneiss, micaschistes, basalte, grès, alluvions anciennes,...) engendrant ainsi divers types de sols.

Les sols ferrallitiques malgaches, notamment sur les Hautes Terres, sont caractérisés par une forte proportion de kaolinite et de gibbsite, et en outre la présence d'aluminium échangeable pouvant atteindre le seuil de toxicité pour la plante. Ces sols ferrallitiques sont généralement acides avec des degrés de fertilité variables ; mais dénudés, ils sont très sensibles à l'érosion et à la dégradation. Protégés de l'érosion et mis en valeur par l'apport de fumier, d'engrais ou d'amendement, ils peuvent être favorables à certaines cultures qui sont variables selon les régions (maïs, arachide, manioc, canne à sucre, bananier, ...).

Ainsi on peut constater que dans l'ensemble, à l'exception de quelques sols volcaniques récents très limités, les sols deviennent très facilement érodables et pauvres en éléments nutritifs notamment le phosphore qui joue un rôle important dans la production agricole.

Pour la plante, le phosphore constitue l'un des trois éléments majeurs indispensables à son alimentation et un facteur qui peut sérieusement limiter la production agricole, surtout dans les sols ferrallitiques. En effet, l'acidité du sol ne rend pas disponible le phosphore dans le sol pour les plantes. Par ailleurs, certaines formes du phosphore sont difficilement accessibles aux plantes. Dans des sols acides de tropique fortement érodés, selon l'étude faite par Owusu-Bennoah et *al.*, (2000) sur les sols de Ghana, le niveau de fertilité de P est très bas, ce qui se traduit par la basse concentration de P en solution, P échangeable et une capacité élevée de la fixation de P. A Madagascar, le sol contient une forte quantité de phosphore total (300 à 1200 mg P kg⁻¹) mais est déficient en P biodisponible avec des teneurs inférieures à 10 mg P kg⁻¹ avec l'extraction Olsen (Rabeharisoa, 2004). Ce cas de Madagascar est comme dans d'autres types de sols acides. L'estimation du phosphore biodisponible pour la plante constitue alors un outil utile pour raisonner la fertilisation phosphatée des cultures pour améliorer la production agricole (Fardeau, 1993).

L'importance du phosphore dans la fertilisation des cultures peut être estimée à partir de son effet sur le rendement de la plante qui peut se manifester par le développement des organes de la plante (Andrianjaka et *al.*, 1986 ; Andriamaniraka et al, 2013 ; 2014 ; 2015).

A cet effet, mes principaux questionnements de recherche sont les suivantes :

- Quels sont les facteurs déterminants qui peuvent influencer la disponibilité du phosphore dans les sols ferrallitiques malgaches?
- Comment doit-on mener la fertilisation phosphatée pour qu'elle soit efficace pour la plante et que l'environnement soit respecté?

Pour répondre à ces questions, il a fallu mener des expérimentations en milieu contrôlé et en milieu paysan sur l'utilisation des différents systèmes de cultures et des différents types d'engrais phosphatés biologiques.

Cela nous amène à proposer les hypothèses de recherches suivantes :

- La disponibilité du phosphore dans les sols ferrallitiques de Madagascar varie selon les systèmes de culture adoptés,
- L'utilisation des engrais phosphatés biologiques améliore non seulement la production mais aussi l'environnement.

Ainsi, mes travaux de recherches (période 2009-2016) se divisent essentiellement en deux parties :

- La première partie consiste à étudier la disponibilité du phosphore dans les sols ferrallitiques de Madagascar et identifier les systèmes qui pourraient être considérés comme facteurs déterminants,
- La deuxième partie consiste à étudier les différents engrais biologiques phosphatés dans la perspective d'une meilleure fertilisation phosphatée tout en respectant l'environnement.

SYNTHESE DE MES TRAVAUX ET PRINCIPAUX RESULTATS SCIENTIFIQUES (PERIODE 2009-2016), PERSPECTIVES DE RECHERCHES POUR LES ANNEES A VENIR

I. ETAT DE CONNAISSANCE SUR LA DISPONIBILITE DU PHOSPHORE DANS LES SOLS FERRALLITIQUES DE MADAGASCAR ET LES FACTEURS DETERMINANTS

I.1. Les sols ferrallitiques de Madagascar

Jusqu'à maintenant, les sols ferrallitiques occupent le 2/3 de l'île de Madagascar. Ils couvrent les côtes Est et les Hautes terres du centre de l'île ce qui correspond à une zone climatique bien déterminée à pluviosité et à température assez fortes (Riquier, 1966). Ces sols ferrallitiques de Madagascar, notamment sur les Hautes terres, sont caractérisés par une forte proportion de kaolinite et de gibbsite, et en outre la présence d'aluminium échangeable pouvant atteindre le seuil de toxicité pour la plante.

Actuellement, l'encombrement des bas-fonds contraint les paysans à l'exploitation d'autres terroirs tels que les collines des Hautes Terres ou « tanety » pour élargir la surface agricole exploitée (Rakotoson, 2009). Les sols des collines malgaches sont constitués essentiellement de sols ferrallitiques. Pourtant ce type de sol présente de problème au niveau de son fonctionnement et de sa structure avec une teneur faible de phosphore biodisponible dans le sol. Ces sols ferrallitiques sont généralement acides avec des degrés de fertilité variables ; mais dénudés, ils sont très sensibles à l'érosion et à la dégradation. Protégés de l'érosion et mis en valeur par l'apport de fumier, d'engrais ou d'amendement, ils peuvent être favorables à certaines cultures qui sont variables selon les régions (maïs, arachide, manioc, canne à sucre, bananier).

Ainsi on peut constater que dans l'ensemble, à l'exception de quelques sols volcaniques récents très limités, les sols deviennent très facilement érodables et pauvres en éléments nutritifs notamment le phosphore qui joue un rôle important dans la production agricole. Pour la plante, le phosphore constitue l'un des trois éléments majeurs indispensables à son alimentation et un facteur qui peut sérieusement limiter la production agricole, surtout dans les sols ferrallitiques (Andrianjaka, 1984 ; Andriamaniraka, 2009). En effet, l'acidité du sol ne rend pas disponible le phosphore dans le sol pour les plantes. Par ailleurs, certaines formes du phosphore sont difficilement accessibles aux plantes. Dans des sols acides de tropique fortement érodés, selon les études faites par Andrianjaka et Fardeau (1986) sur le phosphore assimilable et le pouvoir fixateur du sol à Madagascar (cas des sols de Mahitsy et Alaotra) et Owusu-Bennoah et *al.*, (2000) sur les sols de Ghana, le niveau de fertilité de P est très bas, ce qui se traduit par la basse concentration de P en solution, P échangeable et une capacité élevée de la fixation de P. A Madagascar, le sol contient une forte quantité de phosphore total (300 à 1200 mg P kg⁻¹) mais est déficient en P biodisponible avec des teneurs inférieures à 10 mg P kg⁻¹ avec l'extraction Olsen (Rabeharisoa, 2004 ; Andriamaniraka, 2009). Ce cas de Madagascar est comme dans d'autres types de sols acides.

L'estimation du phosphore biodisponible pour la plante constitue alors un outil utile pour raisonner la fertilisation phosphatée des cultures pour améliorer la production agricole (Fardeau, 1993).

I.2. La disponibilité du phosphore

Le concept de biodisponibilité est largement utilisé. Cependant, il est rarement rigoureusement défini et il est souvent utilisé en lieu et place de disponibilité chimique. Dans le domaine des sciences du sol, la biodisponibilité peut être donc définie comme la potentialité d'un élément d'être transféré du sol jusque dans un organisme vivant considéré. Selon Hinsinger et *al.* (2004), pour un sol donné, la fraction biodisponible d'un élément peut considérablement varier selon l'organisme, y compris parmi des êtres vivants proches tels que les végétaux supérieurs.

Concernant le phosphore selon Vanden Bossche (1999), la biodisponibilité de cet élément est déterminée par la contribution d'un compartiment du phosphore du sol à l'alimentation de la plante tout en tenant compte des différentes interactions. La biodisponibilité du phosphore dépend donc potentiellement d'un grand nombre de réactions physico-chimiques et biologiques capables de libérer des ions phosphates dans la solution à partir des compartiments minéral, organique et microbien du sol.

Dans les sols ferrallitiques de Madagascar, le phosphore est présent dans les terres cultivées avec des teneurs très variées comprises entre 20 et 3000 mg kg⁻¹ de P total (Selon Rabeharisoa en 1985, pour les sols ferrallitiques fortement désaturés, cette teneur peut atteindre 1200 mg kg⁻¹) dans les couches labourées, ce qui représente environ entre 400 à 2000 kg P par ha si on considère qu'en moyenne la densité apparente du sol sur 0-20 cm est de 0.75 à 1.33 g cm⁻³.

Le phosphore se présente donc sous les formes suivantes dans le sol :

- phosphate dissous dans la solution du sol sous forme d'anions orthophosphates (PO₄³⁻, HPO₄²⁻, H₂PO₄⁻) en très faible concentration, de l'ordre de 0.08 à 2.31mg P L⁻¹ (Morel et al., 2000) ;
- phosphore labile plus ou moins rapidement biodisponible adsorbé sur phase solide du sol (argiles et matière organique)
- phosphore non labile très peu biodisponible contenu dans les minéraux et les précipités organiques du sol.
- Composés organiques phosphatés

La fraction biodisponible du P du sol a pour origine les ions P dissous et les groupements P de la phase solide du sol susceptibles de passer en solution.

I.2.1. Les ions phosphates en solution

Le P dissous peut être sous forme d'espèces ioniques libres ou complexées, minérales et organiques. En effet, d'autres formes dissoutes portant un groupement phosphate

pourraient être liées à d'autres molécules dissoutes, sous formes de complexes ou chélates, ou autres composés organiques dont le phosphate ne serait disponible pour la plante qu'après passage dans la solution au niveau de la rhizosphère (Hocking et *al.*, 1999).

Compte tenu du pH de la solution de sol, généralement compris entre 4.5 et 8.2, les espèces ioniques sont principalement H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} qui peuvent former des complexes avec des cations et des molécules organiques. Des composés organiques contenant du P et des polyphosphates ont également été identifiés en solution (Morel, 2002).

Les plantes prélèvent les ions phosphates dissous dans la solution du sol. La concentration des ions P dans la solution du sol varie selon les types de sols et les pratiques culturales. Dans les sols d'exploitation d'élevage intensif à forts excédents structurels, elle peut atteindre jusqu'à 4 à 5 mg P L^{-1} , mais généralement elle est comprise entre 0,05 et 2 mg P L^{-1} (Morel et *al.*, 1997). Les ions P de la solution ne présentent qu'environ 1% du phosphore total prélevé par la plante (Morel, 2002).

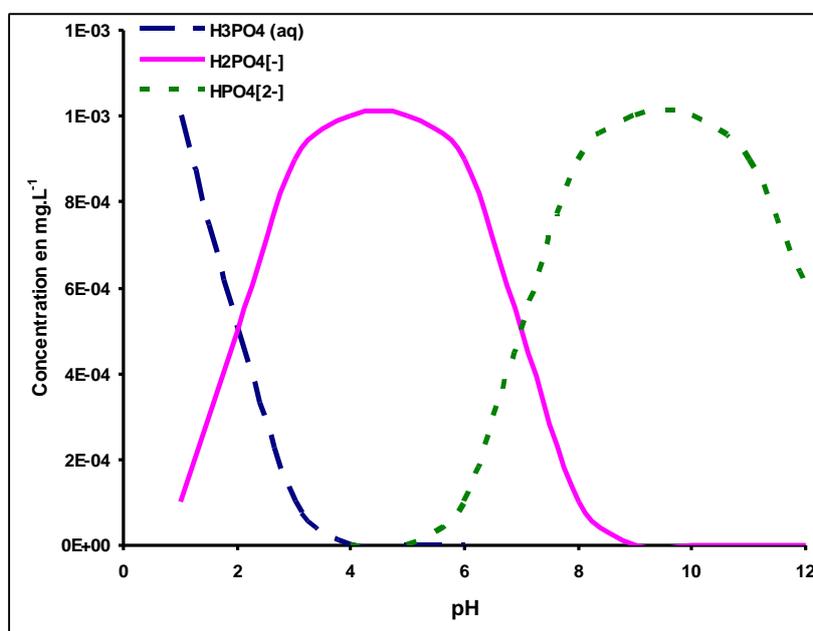


Figure 1 : Les espèces ioniques de l'acide orthophosphorique (H_3PO_4) en fonction de pH de la solution

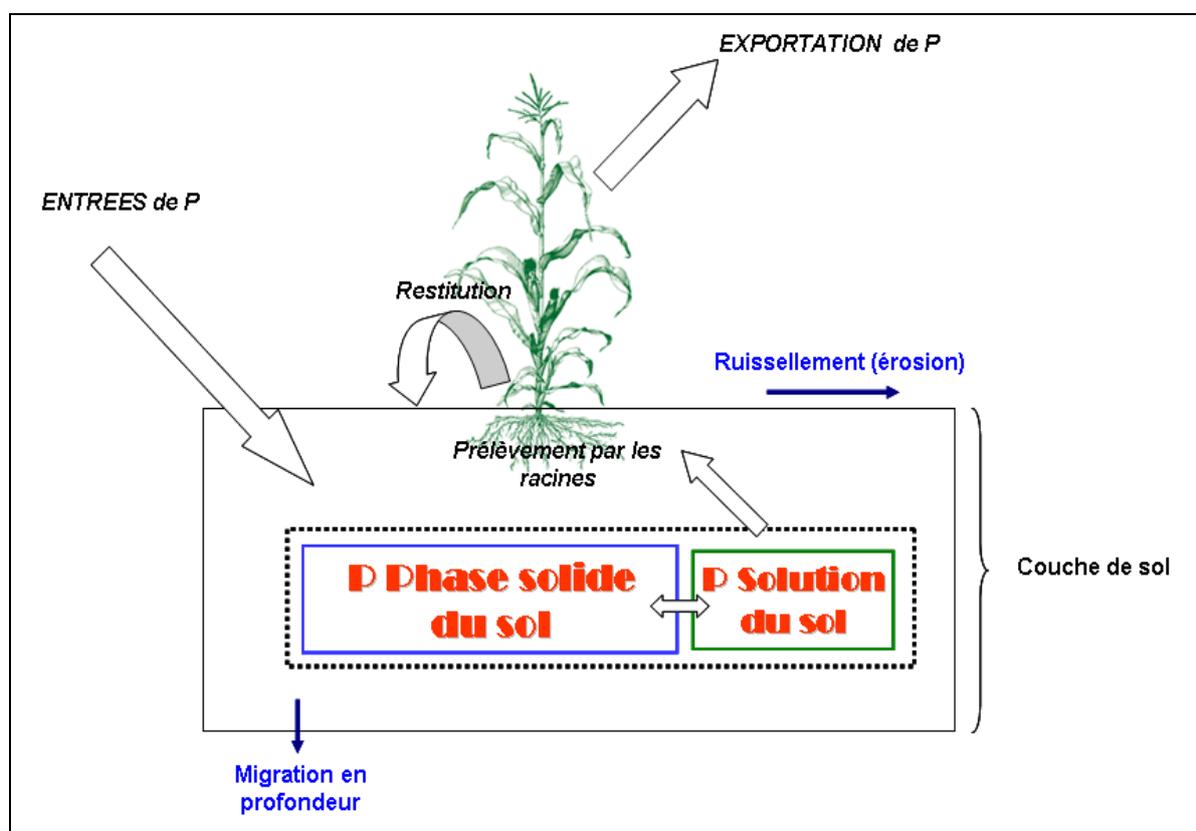
I.2.2. Le phosphore contenu dans la phase solide du sol

- Le phosphore inorganique du sol

La disponibilité du phosphore minérale dans le sol dépend des éléments auxquels il est associé. Les recherches ont permis de déterminer que le niveau d'aluminium (Al) et de fer (Fe) des sols était un bon indicateur pour estimer cette disponibilité (ou la capacité de fixation en phosphore des sols). Plus l'aluminium est élevé, moins le phosphore minéral sera disponible (Rabeharisoa, 1985).

- **Le phosphore contenu dans les produits organiques**

Les phosphores organiques du sol peuvent être sources des ions phosphates biodisponibles dans la solution du sol après la minéralisation. Ils peuvent être obtenus par l'apport des fumiers ou par les résidus des récoltes et qui peuvent être estimés à environ $0.2 \text{ mg P kg}^{-1} \text{ an}^{-1}$. La vitesse de décomposition des résidus organiques décroît lorsque le rapport C/N augmente (Friessen et *al.*, 1997). Le devenir du P est étroitement lié à celui de l'azote des résidus. Presque 80% du P des résidus a été minéralisé avant le début de la période de prélèvement de P par la culture. Durant la période de prélèvement de P par la culture, seuls quelques pourcents du P restant sont minéralisés ce qui ne représente que quelques centaines de grammes de P.



Source : Morel, 2002

Figure 2 : Représentation schématique du cycle du phosphore dans un écosystème, fertilisé et cultivé.

I.3. Les différentes approches d'appréciation de la quantité de phosphore biodisponible dans les sols

Dans le choix des méthodes, trois tendances principales se dégagent : la première, la plus ancienne et la plus simple, a pour but d'extraire par dissolution plus ou moins sélective à l'aide de solutions conventionnelles les composés phosphores contenus dans le sol (Dabin, 1967) ; la deuxième utilise toujours des solutions conventionnelles mais procède à un

fractionnement des diverses formes minérales du phosphore, à savoir le phosphore soluble, puis le phosphore lié à l'aluminium, puis au fer, au calcium et enfin au phosphore résiduel, créant ainsi une notion de compartiments susceptibles de représenter l'ensemble des formes du phosphore biodisponible ; et la troisième se propose de caractériser le phosphore biodisponible en termes de cinétique de transfert entre phase solide et phase liquide en tenant compte du temps comme variable importante des facteurs de biodisponibilité (Fardeau et Marini, 1969 ; Fardeau et Guiraud, 1972 ; Fardeau et Conesa, 1994 ; Morel et *al.*, 2000).

I.3.1. Les extractions chimiques

En analyse de routine, la fraction biodisponible de phosphore est quantifiée par des extractions chimiques (Fardeau et *al.*, 1988 ; Roche, 1983). Cette approche est particulièrement délicate car on tente d'extraire par des agents chimiques les formes présumées biodisponibles et combinées dans le sol sous de multiples aspects. Depuis plus d'un siècle, les chercheurs ont proposé plusieurs réactifs d'extraction et divers modes opératoires sans pouvoir retenir une seule méthode universelle satisfaisante dans une large majorité de cas (Espiau, 1994).

▪ Les différentes méthodes utilisées pour l'extraction chimique

Devant la multiplicité des méthodes (Tableau 1), comme pour la plupart des analyses chimiques du sol, le choix sera surtout fait en fonction des propriétés du sol à analyser (sol calcaire, sol à pH neutre ou acide).

Dans la quasi-totalité des méthodes par extraction, le dosage du phosphore est basé sur la formation et la réduction d'un complexe de l'acide orthophosphorique et de l'acide molybdique. La réduction du phosphomolybdate s'accompagne d'une coloration bleue dont l'intensité est proportionnelle à la quantité de phosphomolybdate réduit et par conséquent à la quantité de phosphore présent dans le milieu considéré.

Dans l'extraction, le rôle des facteurs physiques tels que la durée de contact terre/solution d'extraction, le genre et le degré d'agitation mécanique et la température d'extraction est extrêmement important. Étant donné que tous ces facteurs sont susceptibles de donner lieu à des variations du taux de phosphore extrait, il faut absolument que le procédé d'extraction soit rigoureusement normalisé. Ceci est également valable pour le procédé utilisant le fractionnement par phase successive (Mathieu et *al.*, 2003).

Suivant la méthode utilisée, les valeurs (quantité de P extrait) varient significativement. Ces différences s'expliquent par la spéciation du phosphore dissous.

Il est évident donc que ces différentes méthodes vont donner des résultats différents pour un même type de sol voire même pour un même échantillon.

Tableau 1 : Différentes méthodes d'analyse de phosphore assimilable (Zemoura, 2005)

Méthode	Type de sol	Réactifs	P extrait
Dyer (1894)	Sol avec calcaire total inférieur à 20g/kg	Acide citrique monohydraté : 20g/l m/V=1/5 Durée d'agitation : 16heures	Phosphore lié au calcium et aluminium, dosage par spectrométrie d'absorption moléculaire à 825 nm du complexe phosphomolibdique réduit à chaud par l'acide ascorbique en milieu sulfurique.
Bray n°2 (1945)	Sols acides (pH = 5,5)	Fluorure d'ammonium 0,03N en milieu acide chlorhydrique 0,1N	Phosphore lié à l'aluminium et au calcium, mesuré par analyse spectrométrie sur un appareil à flux continu, de la couleur bleue à 660 nm du complexe phosphomolibdique réduit à chaud par l'acide ascorbique.
Olsen (1954)	Sols tempérés, pH déterminé (8,5)	Bicarbonate de sodium 0,5N, m/V=1/20	Phosphore lié au calcium-aluminium et fer, mesuré par analyse spectrométrie sur un appareil à flux continu, de la couleur bleue à 660 nm du complexe phosphomolibdique réduit à chaud par l'acide ascorbique.
Joret-Hébert (1955)	Tous les types de sols, pH>6,8	Oxalate d'ammonium 0,1N m/V=1/25 Durée d'agitation : 2heures à 20°C	Phosphore lié au calcium et aluminium, mesuré par analyse spectrométrie sur un appareil à flux continu, de la couleur bleue à 660 nm du complexe phosphomolibdique réduit à chaud par l'acide ascorbique.
Chang et Jackson (1957)		Succession de traitements avec : Chlorure d'ammonium, Fluorure d'ammonium, Soude, Acide sulfurique, Citrates de sodium	Les différentes formes de P dans le sol : P les plus solubles, P lié à l'Al (P-Al), au Fe (P-Fe), au Ca (P-Ca), Le P lié aux hydroxydes de Fe et d'Al.
Olsen modifiée Dabin (1976)	Sols tropicaux acides, mais peut s'appliquer à tous les types de sols	Bicarbonate de sodium 0,5N et de fluorure d'ammonium 0,5N, m/V=1/50	Phosphore lié au calcium et aluminium, mesuré par analyse spectrométrie sur un appareil à flux continu, de la couleur bleue à 660 nm du complexe phosphomolibdique réduit à chaud par l'acide ascorbique.

A Madagascar dans les années 60-70, la méthode Olsen modifiée Dabin était utilisée pour étudier le phosphore dit assimilable du sol. Mais certains résultats obtenus en pots de culture effectués en conditions standardisées n'étaient pas vraiment pertinents, par rapport à ceux obtenus par d'autres approches (Morel et Fardeau, 1987). Une des méthodes qui est encore utilisée aujourd'hui à Madagascar pour caractériser le phosphore assimilable dans un sol est l'extraction Olsen (extraction de 1 g de terre par 20 ml de bicarbonate de sodium 0,5 M à pH de 8,5 pendant 30 minutes).

▪ **Les avantages et limites de ces extractions chimiques**

Sur le plan technique, les extractions chimiques sont plus faciles à manipuler et permettent d'obtenir des résultats rapidement, de façon reproductible au niveau expérimentation au laboratoire. Mais cette méthode ne reflète pas la réalité par rapport au fonctionnement du système sol-solution-plante. Fardeau et al. (1988b) montrent que les réactifs extractants moyennement agressifs comme le NaHCO_3 0.5M ou agressifs comme l'acide citrique 2%, n'extraient pas tout le Pi assimilable et extraient du Pi non assimilable. Ce travail démontre, qu'étant donné les multiples réactions se déroulant dans le sol, il est illusoire de chercher le réactif chimique idéal qui permettra dans toutes les situations d'extraire tout le P assimilable et rien que lui.

Donc la question qui se pose : comment peut-on trouver un réactif susceptible de reproduire le mieux possible l'action d'extraction des racines, et convenable pour tous les types de sols ? et ceci d'autant plus depuis que l'on sait à présent combien la dynamique de cet élément dans le sol est complexe.

L'interprétation des données analytiques issues des extractions repose, non sur des approches mécanistes, mais sur des corrélations établies entre des rendements, ou des rendements relatifs, et les quantités extraites, ce qui imposerait de n'utiliser ces corrélations que dans des situations proches de celle où elles ont été établies.

La prévision d'une quantité de phosphore biodisponible à partir d'une extraction chimique est donc peu fiable et peu précise. Malgré le nombre important réalisé pendant plusieurs décennies, la qualité de l'évaluation de la biodisponibilité reste peu concluante, alors que les recommandations agronomiques sont toujours basées sur les résultats de cette méthode.

I.3.2. Evaluation biogéochimique de la biodisponibilité

En analyse approfondie, la fraction biodisponible est caractérisée en utilisant les méthodes des sorption-désorptions et des traçages et dilution isotopique des ions phosphates (Fardeau, 1981).

Ces méthodes simulent l'action des racines du végétal. Le phosphore se présente dans la solution du sol sous forme anionique. On sait en outre qu'il se déplace très lentement vers les racines par diffusion : la racine absorbe tout le phosphore ionique en solution dans un volume de sol correspondant au volume du chevelu racinaire.

▪ **Méthode de sorption-désorption**

Elle consiste à déterminer la variation de la concentration des ions phosphates dans la solution et la quantité nette associée d'ions phosphates transférés entre les phases solides et solution du sol. Dans ce cas, on apporte de P à doses croissantes dans la suspension de sol et deux phénomènes peuvent se produire au niveau du système : soit une sorption soit une désorption. (Sorption : passage d'une quantité d'ions phosphates de la solution vers la phase solide du sol, Désorption: passage d'ions phosphates de la phase solide vers la solution)

Dans cette méthode, la variation de la dynamique des ions phosphate à l'interface solide-solution dépend de la concentration des ions phosphates dans la solution.

La variation (ΔP_{sd}) de la quantité d'ions P transférés à l'interface solide-solution du sol par sorption-désorption (Morel, 2002; Schneider et al. 2003) est calculée au moyen de la relation suivante :

$$\Delta P_{sd} = Pw_i - Pw_f = (Cp_i - Cp_f) * V/M$$

Où

Pw_i (mg P kg⁻¹) est la quantité d'ions phosphates dans la solution de la suspension de sol avant apport de P ;

Pw_f (mg P kg⁻¹) est la quantité d'ions phosphates dans la solution de la suspension de sol après la période de sorption – désorption ;

Cp_i (mg de P L⁻¹) : concentration initiale des ions phosphates dans la solution du sol ;

Cp_f (mg de P L⁻¹) : concentration finale des ions phosphates dans la solution du sol ;

V/M : rapport volume sur masse de la suspension du sol.

Lorsqu'il y a sorption, la valeur de ΔP_{sd} est positive et en cas de désorption la valeur de ΔP_{sd} est négative. La valeur de la concentration pour laquelle ΔP_{sd} est nulle correspond à la concentration d'équilibre de l'échantillon de sol pour les conditions opératoires utilisées.

▪ **Méthode par traçage et dilution isotopique**

Le traçage isotopique est une méthode de choix pour quantifier et comparer l'origine du prélèvement d'un élément donné du sol par différentes espèces qu'elles soient ou non mycorhizées (Bolan, 1991 ; Morel et Plenchette, 1994). Cette méthode, initiée par Barbier dès 1971 puis développée ensuite par Fardeau et Morel, utilise les ions phosphates ³²PO₄ et ³³PO₄. La technique de traçage isotopique repose sur l'hypothèse que les isotopes d'une même espèce chimique (ici ³¹Pi, ³²Pi et ³³Pi) ont un comportement identique à l'égard des processus chimiques, physiques et biologiques. Cette hypothèse n'a pas pu être réfutée jusqu'à présent. Par contre, ces isotopes sont détectables par des méthodes différentes (³¹Pi en colorimétrie ou en chromatographie ionique, ³²Pi et ³³Pi par la mesure de leur rayonnement radioactif par un compteur β en scintillation liquide). L'étude du transfert d'isotopes dans le système sol-eau ou sol-eau-plante permet, en utilisant des concepts développés en médecine, d'estimer le Pi présent sur la phase solide d'un sol qui est susceptible de passer en solution, sans avoir à extraire ce Pi du sol (Fardeau, 1993 ; Fardeau et al., 1991 ; Cobelli et al., 2000).

Deux types de méthodes utilisant ces principes peuvent être mises en œuvre : l'une basée sur le suivi du transfert du Pi radioactif de la solution du sol vers la phase solide dans une suspension sol-eau en agitation (la méthode des cinétiques d'échanges isotopiques, valeur E) et l'autre basée sur le marquage du P disponible d'un sol à l'aide de Pi radioactif et sur son suivi vers une plante test (valeur L).

Ces méthodes ont été déjà utilisées par plusieurs chercheurs dans différentes études (Pypers et *al.*, 2006 ; Morel et Planchette 1994 ; Fardeau, 1993 ; Larsen, 1952 ; Andrianjaka, 1984) pour étudier la biodisponibilité de P dans le sol.

Le principe de ce type d'étude est :

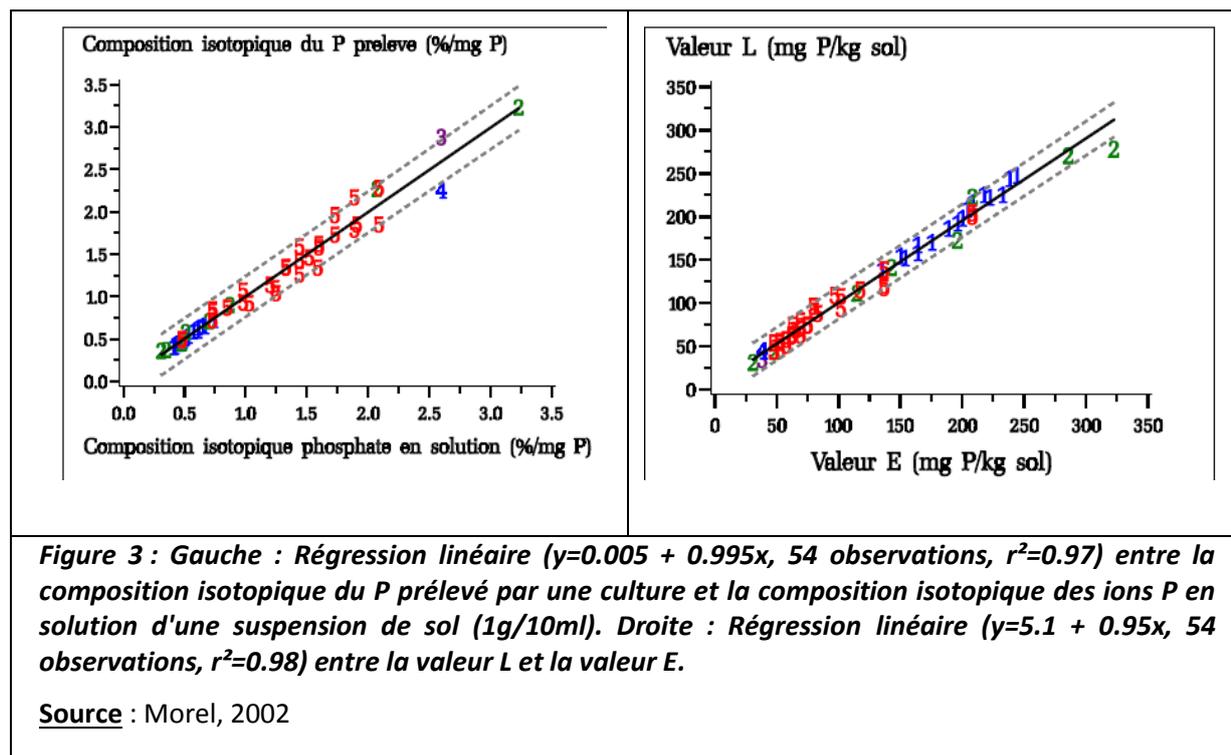
- d'introduire une quantité connue d'ions P radioactifs dans le sol afin de marquer, de façon homogène, l'ensemble des ions P du sol susceptibles de passer en solution.
- d'effectuer la culture des espèces étudiées
- et de comparer la quantité de P prélevé et sa composition isotopique en fonction des espèces

En pratique, une quantité connue (R) d'ions P radioactifs en solution est soigneusement mélangée dans le sol. La radioactivité (r) et le phosphore prélevés par une plante sont ensuite déterminés après différentes périodes de culture. La comparaison de la composition isotopique du P prélevé par différentes espèces cultivées permet de quantifier la proportion du P prélevé ayant la même origine. Cette approche a été récemment appliquée à des éléments en traces comme le cadmium par Gérard (1999).

Par ailleurs, à partir du même jeu de données, la quantité de P biodisponible du sol peut-être déduite de la composition isotopique en appliquant le principe de dilution isotopique. Cette approche, proposée et développée par Larsen (1952), consiste à appliquer la règle des proportions à la quantité totale de P du sol dans laquelle les ions P marqués se sont dilués pendant le prélèvement.

La validité de l'équation utilisée pour calculer les quantités de Pi isotopiquement échangeable et en déduire les quantités de Pi des différents compartiments a été vérifiée pour des sols bien pourvus en Pi en comparant les quantités de Pi échangeables mesurées dans des systèmes sol/solution (valeur E) et dans des essais en pots (valeur L) (Figure 3).

L'intérêt et les limites de ces deux approches ont été décrites récemment (Fardeau 1996 ; Fardeau et *al.*, 1996 ; Frossard et Sinaj 1997 ; Bühler et *al.*, 2003).



Bien qu'extrêmement intéressante par son aspect applicatif, cette méthode est restée du domaine de la recherche et ne sera probablement jamais utilisée en routine eu égard aux difficultés de manipulation qu'elle présente (Fardeau et *al.*, 2001). Ceci n'empêche pas que la méthode nous apporte de très précieux enseignements sur les modalités de fertilisation phosphatée des milieux étudiés selon ce protocole.

▪ **Couplage de sorption-désorption et dilution isotopique**

La dynamique des ions phosphate à l'interface solide-solution est fonction de la concentration en solution et du temps. C'est pourquoi la méthode utilisée tient compte de la variation de la concentration des ions phosphates en solution avec la méthode de sorption-désorption et la durée du transfert des ions entre les deux phases avec la méthode de dilution isotopique. Le couplage de ces deux méthodes permet de paramétrer la fonction de Freundlich ($Pr = v C_p^w t^p$) décrivant la dynamique de la quantité (Pr) brute des ions phosphates diffusibles à l'interface solide-solution.

Où :

C_p (mg de P L⁻¹) est la concentration des ions phosphates dans la solution du sol

v , w et p sont des coefficients de régression :

$v > 0$ est la quantité brute d'ions phosphates transférés en 1 minute lorsque la concentration de C_p est égale à 1 mg P L⁻¹;

$w < 1$ est un coefficient de régression qui rend compte de l'effet, moins que proportionnel, de l'augmentation de C_p ;

$p < 1$ est un coefficient de régression qui rend compte de l'effet, moins que proportionnel du temps qui s'écoule.

II. L'EFFET DES SYSTEMES DE CULTURE SUR LA DISPONIBILITE DU PHOSPHORE DANS LES SOLS FERRALLITIQUES DE MADAGASCAR

II.1. Introduction.

L'importance du phosphore dans la fertilisation des cultures peut être estimée à partir de son effet sur le rendement de la plante qui peut se manifester par le développement des organes de la plante. Dans le fonctionnement du système sol-solution-plante, les ions phosphates dissous dans la solution du sol jouent un rôle important du fait que le niveau de concentration de ces ions dans la solution du sol, après prélèvement des racines, régule le transfert des ions phosphates diffusibles logés dans la phase solide du sol vers la solution, étant donné qu'environ 99% des ions phosphates prélevés par la plante proviennent de cette phase solide (Andrianjaka, 1984 ; Morel, 2002).

La concentration des ions phosphates dans la solution du sol est donc l'une des variables déterminant la biodisponibilité du phosphore pour les cultures.

Actuellement, dans l'objectif d'augmentation de la production agricole tout en respectant l'environnement pour le développement durable, des solutions alternatives aux habitudes des paysans devraient être trouvées. Une des causes principales de la faible production est que l'apport en éléments nutritifs au sol n'est pas suffisant ou voire même nul comme le prouvent les statistiques malgaches en matière d'utilisation des engrais. Les paysans ne peuvent généralement pas acheter des engrais et la production agricole repose essentiellement sur l'utilisation (sans compensation) des réserves du sol en éléments minéraux ("soil mining"), pratique non durable qui conduit inévitablement à une baisse lente et inévitable de la fertilité. La deuxième cause majeure qui explique la faible fertilité des sols mis en culture est l'absence, ou le peu, d'investissement effectué par les paysans, pour améliorer et protéger les sols. Les conséquences de la mise en culture sont souvent négatives. Ainsi la pratique du 'tavy'¹ souvent utilisée pour mettre en culture ces sols est source de graves problèmes de pertes de sol par érosion hydrique. La productivité initiale est généralement faible et diminue encore au cours des années de culture avec l'épuisement des sols en éléments minéraux assimilables. A terme, cela se traduit par l'abandon des terrains cultivés, la dégradation des ressources en sol et des qualités du milieu.

Des chercheurs du CIRAD et leurs partenaires ont proposé et étudié depuis plusieurs années des systèmes de cultures avec semis direct sur couverture végétale (SCV) conçus pour augmenter et maintenir la productivité de ces sols tout en les protégeant afin de minimiser les pertes par érosion des nutriments (Séguy *et al.*, 2006 ; Husson *et al.*, 2006). Les concepts sous-jacents à la mise au point et au développement des systèmes SCV ont été explicités par Séguy *et al.* (2006) et reposent sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Les points essentiels sont : une protection efficace du sol par une couverture permanente du sol ; une

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

couche superficielle avec une activité biologique intense bénéfique pour la structure du sol, la biodisponibilité des éléments minéraux, la teneur en matière organique ; une production de biomasse importante associée à une utilisation et un recyclage optimale des éléments minéraux souvent présents en quantités limitées dans ces sols forestiers.

Le système de culture du type semis direct sous couverture végétale, à travers les matières organiques qu'il apporte, modifie physiquement et chimiquement le sol et donc sa réactivité par rapport à la fixation ou à la libération des ions comme les phosphates. Par ailleurs, l'apport d'engrais minéraux et l'amendement calcique ont également des effets non seulement sur la composition chimique du sol mais aussi sur son comportement vis-à-vis de la rétention ou la libération des ions.

Le comportement du sol vis-à-vis d'un élément comme le phosphore va donc être différent selon les pratiques culturales.

Cette étude est ainsi consacrée à l'analyse de l'effet des pratiques agricoles sur ces ions phosphates dans la solution du sol.

Il faut donc identifier et expliquer les facteurs qui contrôlent la biodisponibilité du phosphore et analyser en quoi certaines pratiques agricoles ont des effets positifs ou négatifs. Il s'agit :

1. de déterminer les principales caractéristiques physico-chimiques de la solution de sol et du transfert à l'interface solide-solution du sol (pH, carbone, ...)
2. d'analyser et de mettre en relation la quantité de phosphore biodisponible (ions phosphates dissous plus diffusibles) dans le sol et ses modifications sous l'impact des différents systèmes de cultures

II.2. Matériels et méthodes.

II.2.1. Dispositif étudié

L'étude a été menée dans la région d'Antsirabe, au centre des Hautes Terres malgaches, à une altitude de 1600 m. Le climat de la région est du type subtropical avec deux saisons distinctes : une saison sèche et froide, de mai à septembre, et une saison humide, d'octobre à avril. La température moyenne annuelle est de 16°C avec des températures minimales pouvant atteindre des valeurs négatives pendant la saison sèche, et maximales de 31°C pendant la saison humide. La pluviosité annuelle moyenne est d'environ 1400 mm pour les sites où sont réalisées les expérimentations mais peut varier de 1200 à 2400 mm en fonction de l'altitude (Michellon et *al.*, 2004).

La région, située dans une région de volcanisme ancien (datant du Pliocène) et récent (moins de 10 000 ans), comprend des sols minéraux bruts, des sols peu évolués, des andosols, des sols ferrallitiques (ferralsols) et des sols hydromorphes (Zebrowski et Ratsimbazafy, 1979), selon la classification française (CPCS, 1967).

Cette région a été choisie pour étudier l'effet des systèmes de culture sur les concentrations des ions phosphates dans la solution du sol et les ions phosphates diffusibles dans la phase solide du sol.

L'essai étudié est localisé à Andranomanelatra, au nord-est de la ville d'Antsirabe. Il a été mis en place en 1991 par une organisation non gouvernementale malgache Tany sy Fampandrosoana (TAFa) avec l'appui du Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD). Les systèmes de culture que nous avons étudiés ont débuté en 1992. Ce dispositif comprend des parcelles de surface variant de 30 à 200 m².

II.2.2. Les traitements

Quatre systèmes de cultures qui se différencient essentiellement sur le mode de préparation du sol, soit semis direct sur couverture végétale (SCV) ou labour (Lb), et la fumure réalisée ont été considérés :

- Le labour (Lb) est réalisé avec une bêche (angady), une charrue ou un tracteur selon la superficie sur une profondeur de 20 à 25 cm. Avant le labour, le sol est défriché et les résidus de récoltes sont exportés hors de la parcelle. Le sarclage après semis ou en cours du cycle se fait manuellement.
- Le système SCV que nous avons retenu est avec une couverture morte maintenue en permanence sur le sol. Le sol n'est jamais travaillé et le semis est effectué directement dans la couverture après ouverture d'un simple trou ou d'un sillon. La couverture végétale morte est constituée des résidus de cultures qui sont donc restitués sur la parcelle. Avant semis et éventuellement pendant le cycle de la culture on utilise un herbicide (gramoxone de 1,5 à 2 L ha⁻¹) pour lutter contre les adventices.
- Un traitement, désigné par F1 consiste à épandre 5 t ha⁻¹ de fumier de bovin chaque année et correspond à une pratique courante et recommandée en milieu paysan.
- Un traitement désigné par F2 consiste à épandre chaque année 5 t ha⁻¹ de fumier de bovin plus une fertilisation minérale NPK et à apporter un amendement calcique sous forme de dolomie à raison de 500 kg ha⁻¹. Le détail de la fertilisation minérale NPK est présenté dans le tableau 2.

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

Quelle que soit la culture, le phosphore minéral a été apporté à raison de 150 kg ha⁻¹ sous forme de phosphate d'ammoniaque,

Le potassium a été apporté à raison de 80 kg ha⁻¹ de chlorure de potassium

Tableau 2 : Les quantités (kg ha⁻¹) apportées de phosphore (P) pour les niveaux de fertilisation F1 et F2 dans le dispositif d'Andranomanelatra

Culture	Niveau de fertilisation	Fumier	Engrais	Total
kg ha ⁻¹				
Mais/Soja	F1	6,1	-	6,1
Mais/Soja	F2	6,1	29,5	35,6

Les itinéraires techniques sont donnés dans le tableau 3 pour les 3 systèmes de cultures adoptés.

Tableau 3 : Itinéraires culturaux pour un maïs implanté dans une couverture vive (desmodium, trèfle, cassia), sur une couverture morte (résidu de soja) et sur labour (source : TAFA, 2001)

Stade de la culture	Opération culturale	Couverture vive	Couverture morte	Labour
Avant semis	Préparation du terrain	Paraquat à 300g/ha (gramoxone à 1,5l/ha) en localisé sur la ligne ou traitement en plein si nécessaire	Paraquat à 200g/ha (gramoxone à 1l/ha) en traitement en plein	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Labour ▪ Reprise de labour à l'angady
Semis	Semis	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Semences traitées avec 5g/kg de gaoucho T45WS (1,75g/kg d'imidachlopride+0,5g/kg de thirame) ▪ Semis à l'angady avec interligne de 0,8m d'écartement à raison de 3graines tous les 0,4m ▪ Fumure localisée sur les lignes 		
	Fumure localisée	2 niveaux de fumure F1et F2		
Entretiens en cours de cycle	Démariage	Démariage au stade de 2 à 3 feuilles à 2 plants par poquet		
	Apport d'urée	Voir tableau Y sur les différentes doses de fertilisation		
	Lutte contre les adventices ou maîtrise de la couverture	Paraquat à 400g/ha (gramoxone à 2l/ha) en dirigé entre les lignes avec un pulvérisateur muni d'une cache		Sarclage manuel

II.2.3. Les échantillons de sol

Les échantillons de sol ont été prélevés en avril-mai 2003, en fin de saison de culture (après récolte). Sur chaque parcelle élémentaire, 4 prélèvements au cylindre, dont deux sur lignes et deux sur interlignes, sont effectués à 20cm de profondeur. Les échantillons sont séchés à l'air, à l'ombre, avant d'être tamisé à 2 mm. Des parties aliquotes des 4 prélèvements (répétitions intra parcelles) sur la même parcelle, ont été regroupées pour constituer un échantillon homogène par parcelle pour chaque traitement étudié (Razafimbelo, 2005). Ces échantillons composites sont utilisés pour les analyses au laboratoire.

II.2.4. Méthodes analytiques

a. Le pH eau des échantillons de sol

Il a été mesuré en utilisant une méthode basée sur la norme internationale ISO 10390 de 1994. Le principe était de mesurer le pH du sol à partir d'une suspension de sol qui était préparée dans cinq fois de son volume dans de l'eau ayant une conductivité inférieure ou égale à 0,2 mS/m à 25°C et un pH supérieur à 5,6 (eau de grade 2 conformément à l'ISO 3696).

b. Le carbone total dissous

Le carbone total dissous a été mesuré par combustion au COT-mètre. Il a été déterminée après oxydation par combustion sèche après correction si des carbonates sont présents (NF ISO 10694).

c. Les ions phosphates

Pour doser les ions phosphates dans la solution du sol, plusieurs méthodes existent, à savoir le dosage par chromatographie ionique, la spectrométrie d'émission atomique (ICP) et la colorimétrie. Les différences des résultats obtenus s'expliquent par la spéciation du phosphore dissous dans la solution du sol (Morel, 2002 ; Rabeharisoa, 2004). Les résultats des différentes recherches ont donné avantages à la méthode spectrométrie d'émission atomique (ICP) (Masson et *al.*, 2001 ; Rabeharisoa, 2004) face aux méthodes de dosage par colorimétrie et de dosage par chromatographie ionique.

Pourtant chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients dans sa manipulation et sur la fiabilité de ses résultats.

La méthode de dosage par colorimétrie peut être au bleu (Duval, 1963 ; John, 1970) ou au vert malachite (Van Veldhoven et Mannaerts, 1987). Dans ces deux méthodes, il y a une formation et réduction d'un complexe phosphomolybdate en milieu acide, mais c'est la méthode au vert malachite qui est le plus sensible par rapport à la méthode au bleu (Morel, 2002).

✓ *Dosage colorimétriques des ions phosphates en solution*

La méthode du complexe au molybdate d'ammonium décrite par Murphy et Riley (1962) a été utilisée pour doser les ions phosphates dans la solution du sol.

La détermination des ions phosphates en solution s'effectue en deux étapes. La première consiste en une hydrolyse acide des phosphates présents dans l'échantillon.

Dans la seconde étape, les ions orthophosphates réagissent avec les ions molybdates pour former un complexe phosphomolybdate dans un milieu acide et avec de vert de malachite.

Pour former le complexe phosphomolybdate, il faut préparer 2 réactifs (Martin et Morel, 2002) :

Le réactif 1 est préparé, en mélangeant d'abord 168 ml d'acide sulfurique concentré avec 700 ml d'eau. Puis, après avoir refroidi l'ensemble dans la glace pour combattre l'échauffement dû à la dissolution de l'acide sulfurique, on rajoute 17,55 g de molybdate d'ammonium $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}, 4\text{H}_2\text{O}]$. On porte ensuite à 1000 ml avec de l'eau.

Pour le réactif 2, on dissout dans 700 ml d'eau, à 80-90°C, 3,5g de PVA (alcool polyvinylique). Après refroidissement, on ajoute 0,35g de vert de malachite et filtrer sur Whatman N° 541. On ajuste le volume à 1000ml avec de l'eau.

On met 2ml de réactif 1 dans chacun des tubes (pour tous les tubes de la gamme étalon, des 10 blancs et les échantillons) et attendre environ 10 minutes pour mettre 2ml de réactif 2. Agiter les tubes à l'aide d'un agitateur Vortex, puis attendre environ 2 heures avant de passer au colorimètre.

La solution de réactif est ajoutée au même moment dans tous les tubes afin que la coloration se développe dans les mêmes conditions pour la gamme étalon, les blancs et les échantillons à doser.

Pour le dosage par colorimétrie avec de vert de malachite on utilise la longueur d'onde 610nm

Lors du passage au colorimètre, les trois zéro de la gamme étalon sont passés au début, au milieu et à la fin de la lecture afin de s'assurer sur la stabilité de l'appareil.

✓ *Le dosage par chromatographie ionique des ions phosphates*

La chromatographie ionique (CI) est une des plus anciennes techniques chromatographiques. Paradoxalement, les appareils automatiques de CI n'ont été développés que depuis un peu plus d'une vingtaine d'années (1975).

Le principe de la CI est simple : une colonne est composée d'une résine chargée soit positivement (pour séparer des anions) soit négativement (pour séparer des cations). L'éluant emporte les anions ou les cations à séparer. Selon que l'interaction électrostatique entre la résine de la colonne et les ions à séparer est plus ou moins forte, la séparation se fera plus ou moins facilement.

Le principe de la CI est donc basé sur un échange d'ions sur résine. Les ions sont entraînés par une *phase mobile* et séparés par l'action de la *phase stationnaire*.

La chromatographie ionique est une technique de séparation et de détection qui permet de doser très précisément des ions en solution.

L'appareil utilisé est l'analyseur d'ions « DIONEX - DX-600 IC System et détection UV ou conductimètre » qui est entièrement automatisé et piloté par un logiciel spécial.

La préparation des échantillons est la même qu'en colorimétrie, sauf le volume prélevé pour la lecture qui est différent et varie en fonction de la concentration de la solution à doser (à partir de 0.1ml).

✓ *Le dosage colorimétrique du phosphore total dissous*

Le dosage du phosphore total dissous dans la solution du sol consiste à déterminer la totalité des formes de phosphores dans la solution du sol (formes ioniques, complexées, molécules organiques et colloïdales). Donc la différence au dosage des ions phosphates dissous par colorimétrie réside sur les traitements préalables de la solution du sol après extraction à l'eau. Pour ce dosage de phosphore total dissous on traite la solution du sol avec des acides sulfuriques et des acides nitriques pour libérer tous autres les phosphores complexés par d'autres éléments.

II.2.5. Analyses statistiques des données

L'étude de comparaison de l'effet du système de culture sur le rendement annuel et cumulé ainsi que la concentration des ions phosphates dans la solution du sol ont été analysés statistiquement par une analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs (SCV et Lb) et deux modalités de fertilisation (F1 et F2). Les écarts sont considérés comme significatifs pour un seuil de probabilité inférieur à 0.05

II.3. Résultats

II.3.1. Caractéristiques physico-chimiques des terres analysées (0-20 cm)

Les résultats pour les quatre traitements sont regroupés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Caractéristiques physico-chimiques du sol d'Andranomanelatra sur la profondeur de labour (0-20 cm) pour les quatre traitements (Lb_F1, Lb_F2, SCV_F1 et SCV_F2)

		Lb_F1	Lb_F2	SCV_F1	SCV_F2
Humidité à 105°C Sol					
▪ Humidité	g kg ⁻¹	23.2	22.3	24	24.3
pH					
▪ pH Eau sol	-	4.52	5.10	4.86	5.34
▪ pH KCl N	-	4.20	4.48	4.23	4.58
Granulométrie					
▪ Argile (< 2 µm)	g kg ⁻¹	535	458	607	582
▪ Limons fins (2-20 µm)	g kg ⁻¹	223	245	187	224
▪ Limons grossiers (20-50 µm)	g kg ⁻¹	65	100	57	49
▪ Sables fins (50-200 µm)	g kg ⁻¹	88	85	60	53
▪ Sables grossiers (200-2000 µm)	g kg ⁻¹	89	112	89	92
Carbone (C) Organique-Azote (N) Total du sol					
▪ Carbone (C) organique	g kg ⁻¹	31.3	31.1	39.7	37.8
▪ Azote (N) total	g kg ⁻¹	2.22	2.27	2.92	2.8
▪ C/N	-	14.1	13.7	13.6	13.5
▪ Matière organique	g kg ⁻¹	54.1	53.8	68.6	65.4
CEC Cobaltihexamine					
▪ CEC cobaltihexamine	cmol kg ⁻¹	4.24	4.88	5.49	6.18
Ca, Mg, Na, K, Fe, Min, Al à la Cobaltihexamine					
▪ Calcium (Ca)	cmol kg ⁻¹	0.32	1.50	1.33	3.20
▪ Magnésium (Mg)	cmol kg ⁻¹	0.13	1.03	0.63	2.01
▪ Sodium (Na)	cmol kg ⁻¹	0.011	0.009	0.017	0.014
▪ Potassium (K)	cmol kg ⁻¹	0.099	0.206	0.242	0.415
▪ Fer (Fe)	cmol kg ⁻¹	0.019	0.022	0.020	0.019
▪ Manganèse (Min)	cmol kg ⁻¹	0.112	0.106	0.139	0.107
▪ Aluminium (Al)	cmol kg ⁻¹	2.30	0.95	1.81	0.59
Phosphore (P₂O₅) Total HF Sol					
▪ Phosphore (P ₂ O ₅)	g 100g ⁻¹	0.138	0.153	0.150	0.177

La granulométrie des parcelles, réalisée en condition standard de dispersion (Afnor, 1999), indique que 45-60 % des particules sont de taille inférieure à 2 µm (argiles), c'est dire que ces sols ont une texture argileuse. Le pH varie en fonction des traitements, surtout avec le niveau de fertilisation : avec le système labour, le pH est de 4,52 pour F1 et de 5,10 pour F2 ; avec le système SCV le pH est de 4,86 pour F1 et de 5,34 pour F2). Cette différence en F2 est

expliquée par l'apport des dolomies à raison de $500 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. La capacité d'échange de cations (CEC) est faible et varie également selon les traitements. Elle est plus élevée avec le système SCV et F2 par rapport au système labour et F1 ($\text{Lb_F1}=4.24 \text{ cmol}^{-1} \text{ kg}^{-1}$, $\text{Lb_F2}=4.88 \text{ cmol}^{-1} \text{ kg}^{-1}$, $\text{SCV_F1}=5.49 \text{ cmol}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ et $\text{SCV_F2}=6.18 \text{ cmol}^{-1} \text{ kg}^{-1}$). La teneur de la matière organique est significativement différente dans les deux systèmes de culture, alors qu'elle ne l'est pas avec les modes de fertilisation (5,41 % en Lb_F1 contre 6,86 % en SCV_F1 et 5,38 % en Lb_F2 contre 6,54 % en SCV_F2)

II.3.2. L'effet des différents traitements sur le pH de sol

La variation des pH en fonction du traitement est donnée dans la figure 4

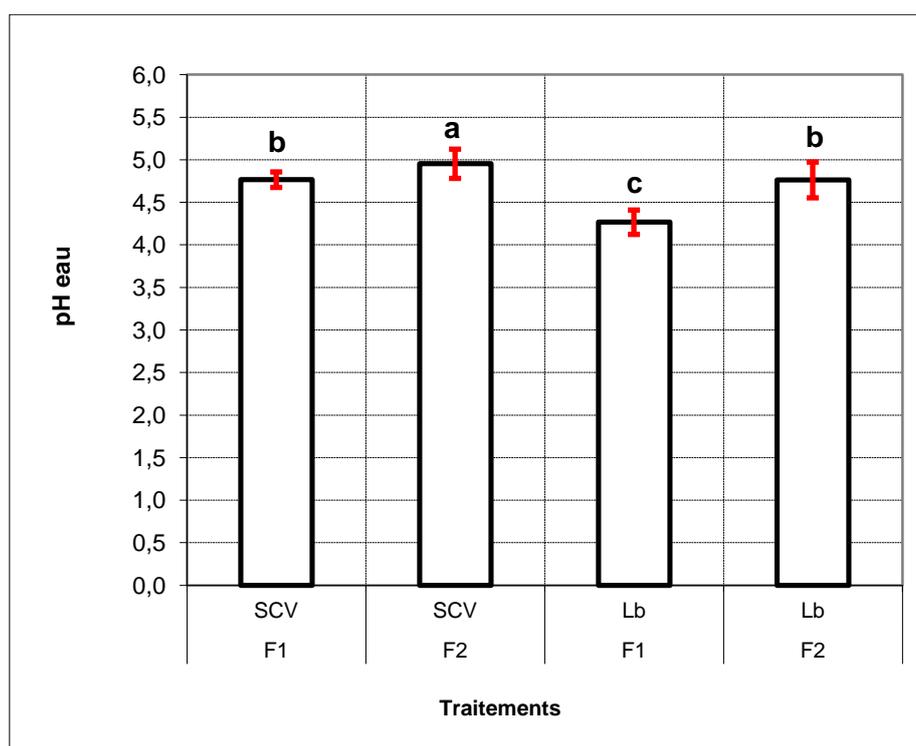


Figure 4 : pH eau du sol d'Andranomanelatra en fonction de système de culture adopté : semis direct sur couverture végétale (SCV) ou labour et le niveau de fertilisation utilisé : F1 ou F2

Ce graphique montre que le pH du sol est plus élevé dans le système de culture semis direct sur couverture végétale ou SCV que dans celui de labour, le système SCV peut donc diminuer l'acidité du sol. On peut constater également qu'avec le niveau de fertilisation F2, que ce soit dans le système SCV ou labour, le pH est supérieur par rapport à F1.

Les résultats d'analyse statistique confirment que :

Avec $p = 0.002 < 0.05$ pour le système de culture et pour la fertilisation, la différence est significative, donc :

- La fertilisation (F) a un effet sur le pH
- Le système de culture (SC) a un effet sur pH, donc la couverture végétale augmente le pH

- Il n'y a pas d'interaction entre ces deux facteurs, c'est-à-dire que les différences du pH sur la fertilisation sont indépendantes du type de système de culture et vis versa

II.3.3. L'effet des différents traitements sur la matière organique de sol

La concentration du carbone total dissous en fonction du traitement est donnée dans la figure 5

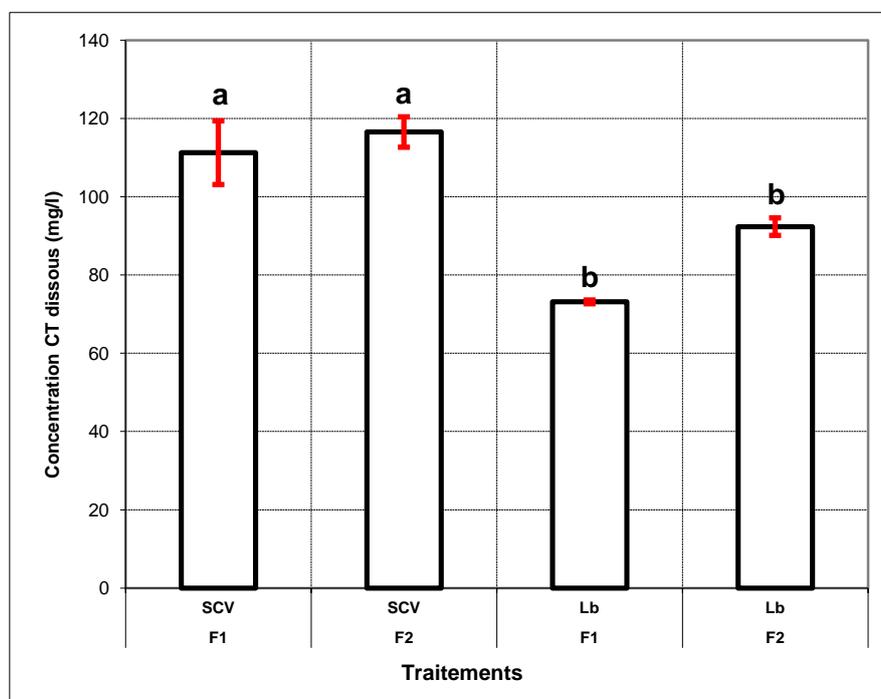


Figure 5 : Concentration en carbone total dissous dans le sol d'Andranomanelatra en fonction de système de culture adopté et le niveau de fertilisation utilisé

Ce graphique montre que le carbone total dissous dans le sol est plus élevé dans le système de culture semis direct sur couverture végétale ou SCV que dans celui de labour, le système SCV peut donc augmenter le carbone dans le sol. On peut constater aussi que dans les deux systèmes, les carbones dans le sol pour les niveaux F1 et F2 sont les mêmes.

Les résultats d'analyse statistique confirment que :

Avec $p = 0.002 < 0.05$ pour le système de culture la différence est significative, donc :

- Le système de culture (SC) a un effet sur le carbone, donc la couverture végétale peut augmenter le carbone du sol

Alors que pour la fertilisation, il n'a pas de différence significative, donc :

- La fertilisation (F) n'a pas d'effet sur le carbone

II.3.4. L'effet de la matière organique sur le pH du sol

La corrélation entre le carbone total dissous et le pH du sol est donnée dans la figure 6

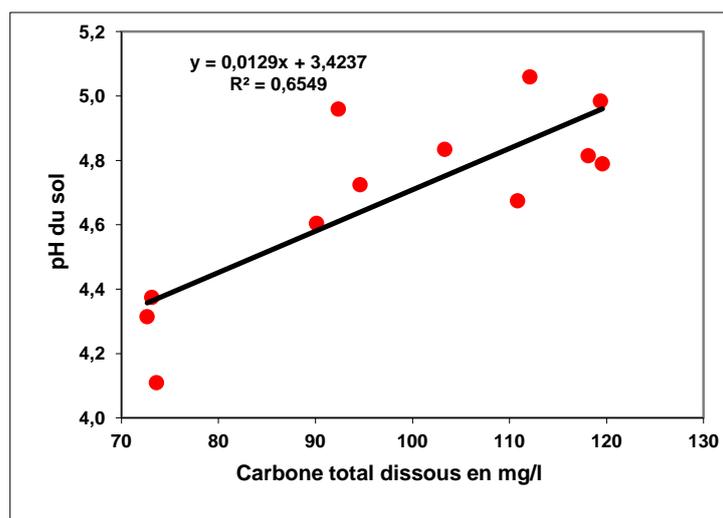


Figure 6 : Corrélation entre le carbone total dissous et le pH du sol d'Andranomanelatra

Le R^2 (0,6549) du graphique qui a une valeur moyenne au-dessus de 0,5 et le coefficient de corrélation (+ 0,81) donnés par l'analyse de corrélation peuvent montrer qu'il y a une corrélation positive entre le carbone organique total dissous (COT dissous) et le pH du sol, c'est-à-dire que plus le COT dissous augmente plus le pH du sol augmente.

Comme la valeur de F calculé (314,349) est supérieure à la valeur critique (4,301) donc on peut conclure qu'il y a effet de COT dissous sur le pH du sol d'Andranomanelatra

II.3.5. L'effet des différents traitements sur la concentration des ions phosphates (Cp) dans la solution du sol

Dans le but de comprendre les origines des variations de la concentration des ions phosphates dans la solution du sol, nous avons déterminé ces concentrations selon les pratiques culturales (fertilisation et système de culture), qui sont supposés comme des éléments jouant des rôles importants dans cette variation.

Deux méthodes (colorimétrie et CI) ont été utilisées afin de vérifier la fiabilité des résultats obtenus (Tableau 5)

Tableau 5 : Comparaison entre le P total dissous, la Cp obtenue par la méthode chromatographie ionique (CI) et la Cp obtenue par colorimétrie (n=3)

Traitements	Cp par colorimétrie	Cp par CI	P total dissous
	mg de P L ⁻¹		
SCV_F1	0,015 ± 0,002 (b)	0,022 ± 0,004 (b)	0,018 ± 0,005 (b)
SCV_F2	0,024 ± 0,001(a)	0,036 ± 0,006 (a)	0,024 ± 0,001(a)
Lb_F1	0,004 ± 0,001(c)	0,007 ± 0,002 (c)	0,006 ± 0,001(d)
Lb_F2	0,013 ± 0,001(b)	0,017 ± 0,009 (b)	0,009 ± 0,004 (c)

La lettre entre parenthèse montre le classement des traitements

Statistiquement au seuil de 5%, entre les deux méthodes de dosage, les différences ne sont pas significatives. Et les concentrations des ions phosphates dans la solution du sol, obtenues avec les deux méthodes par rapport à la concentration du phosphore total dissous, ne sont pas significativement différentes non plus.

Les résultats sur la concentration des ions phosphates dans la solution du sol (Tableau 5) montrent donc que, quelle que soit la méthode utilisée, la concentration des ions phosphates dans la solution du sol varie en fonction du traitement.

En effet, en prenant l'exemple des résultats obtenus par la méthode colorimétrique (Figure 7), pour la fertilisation la différence est significative que ce soit pour le système SCV (0.015 mg de P L⁻¹ pour SCV_F1 contre 0.024 mg de P L⁻¹ pour SCV_F2) ou le labour (0.004 mg de P L⁻¹ pour Lb_F1 contre 0.013 mg de P L⁻¹ pour Lb_F2). Cette différence est également constatée au niveau du système de culture, c'est-à-dire pour le SCV et le labour (0.015 mg de P L⁻¹ pour SCV_F1 contre 0.004 mg de P L⁻¹ pour Lb_F1 et 0.024 mg de P L⁻¹ pour SCV_F2 contre 0.013 mg de P L⁻¹ pour Lb_F2).

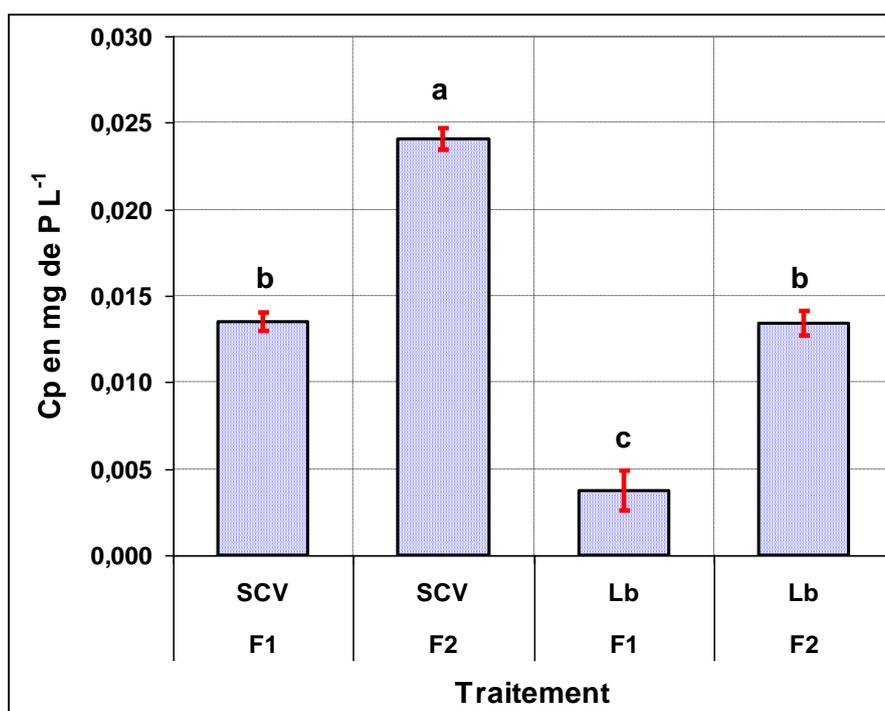


Figure 7 : Concentration en ions phosphates dans la solution du sol d'Andranomanelatra en fonction de système de culture adopté et le niveau de fertilisation utilisé

Ce graphique montre que le Cp dans le sol est plus élevé dans le système de culture semis direct sur couverture végétale ou SCV que dans celui de labour, le système SCV peut donc augmenter la concentration des ions phosphates du sol. On peut constater également qu'avec le niveau de fertilisation F2, que ce soit dans le système SCV ou labour, le Cp est supérieur par rapport à F1.

Les résultats d'analyses statistique confirment que :

Avec $p = 0.00001 < 0.05$ pour le système de culture et $p = 0.00002 < 0.05$ pour la fertilisation, la différence est significative donc :

- La fertilisation (F) a un effet sur la concentration des ions phosphates dans la solution du sol
- Le système de culture (SC) a un effet aussi sur la concentration des ions phosphates dans la solution du sol
- Il n'y a pas d'interaction entre ces deux facteurs, c'est-à-dire que les différences de la Cp sur la fertilisation sont indépendantes du mode de gestion des sols et vis versa

Donc on peut écrire l'équation de la Cp comme suit :

$$Cp = Cp \text{ moyenne} + SC + F + r$$

avec r est une erreur résiduelle

II.3.6. Corrélation entre le pH du sol et la concentration des ions phosphates (Cp) dans la solution du sol

La corrélation entre la concentration des ions phosphates et le pH du sol est donnée dans la figure 8

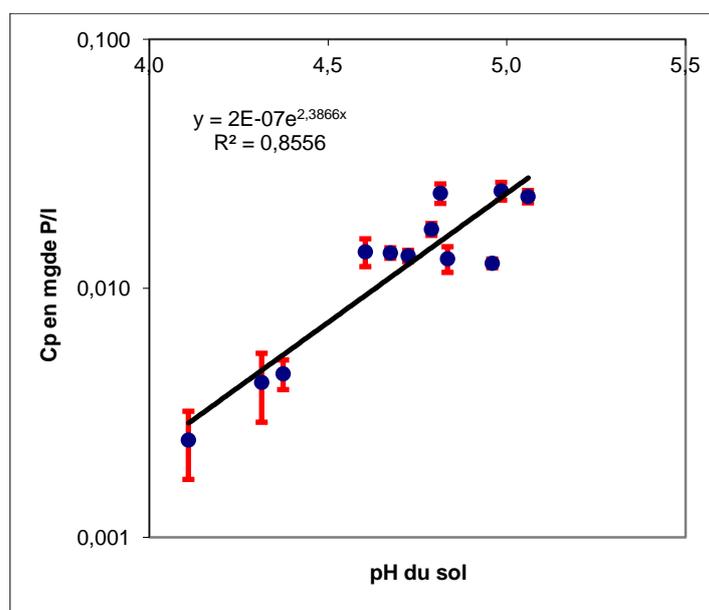


Figure 8 : Corrélation entre le pH et la concentration des ions phosphates dans la solution du sol d'Andranomanelatra

Le R^2 (0,8556) du graphique qui a une valeur largement supérieure à la moyenne (0,5) et le coefficient de corrélation donné par l'analyse de corrélation peuvent montrer qu'il y a une corrélation positive entre le pH et la concentration des ions phosphates (Cp) dans la solution du sol, c'est-à-dire que plus le pH augmente plus la Cp de la solution du sol augmente.

Donc le pH du sol a un effet positif sur l'augmentation de la Cp du sol

II.3.7. Schéma récapitulatif de l'effet des différents traitements sur la concentration des ions phosphates

Le fonctionnement de l'effet des différents traitements sur la concentration des ions phosphates est résumé dans la figure 9

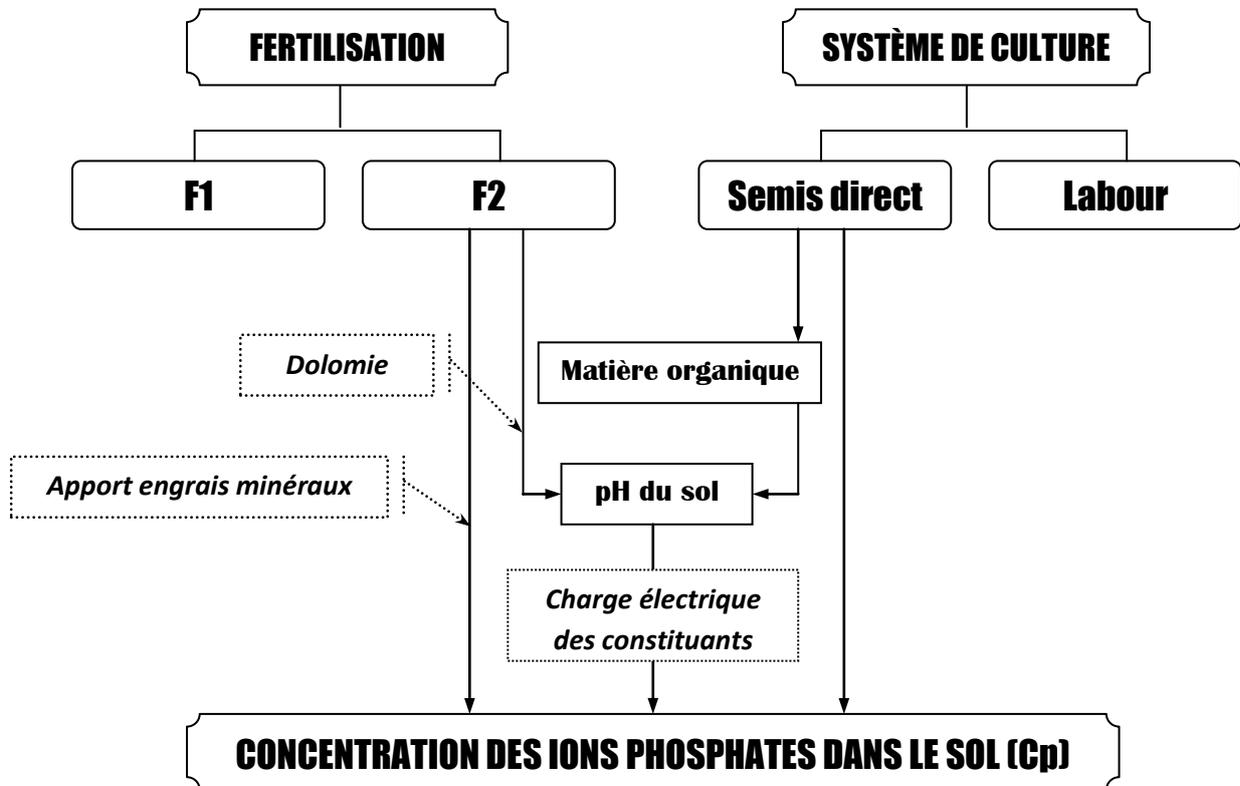


Figure 9 : Schéma récapitulatif de l'effet des différents traitements sur la concentration des ions phosphates dans le sol d'Andranomanelatra

Ce schéma explique le fonctionnement des différentes variables, selon les traitements, qui peuvent intervenir dans l'explication de l'augmentation de la concentration des ions phosphates dans la solution du sol.

II.4. Discussions

II.4.1. L'effet de la fertilisation sur le pH de sol

Les résultats de l'analyse statistique ont montré que la fertilisation a un effet sur le pH, c'est-à-dire que le pH augmente avec le niveau de fertilisation. En effet, le pH avec le niveau de fertilisation F2 est supérieur à celui du niveau F1. Cet effet peut être expliqué par le fait qu'en F1 on apporte que du fumier de ferme alors qu'en F2 en plus de ce fumier on y apporte aussi des engrais minéraux comme l'urée, le KCl, le phosphate d'ammoniaque et la dolomie à raison de 500kg à l'hectare. Et c'est surtout l'apport de dolomie qui joue le rôle de correcteur d'acidité et a fait augmenter le pH du sol.

II.4.2. L'effet de la matière organique sur le pH de sol

Nous avons constaté également d'après nos résultats que le système de culture a un effet sur le pH. Autrement dit le système semis direct avec couverture végétale augmente le pH du sol. En effet le pH du sol dans le système semis direct avec couverture végétale (SCV) est supérieur à celui du labour (Lb).

Dans les deux systèmes comparés, à part le non labour du sol dans le système semis direct, ce sont les couvertures végétales qui pourraient être l'origine de la différence.

Evidemment que les couvertures végétales qu'elles soient mortes ou vivantes apportent des matières organiques au sol.

Les essais menés sur le site de Boigneville par l'ITCF et l'INRA (Balesdent, 1996) ont permis d'étudier comparativement les effets du passage d'un système de culture (labour) à un système simplifié (travail superficiel ou semis direct) sur la répartition des matières organiques et leur évolution. Après 28 années d'expérimentation, un léger accroissement du stock de matière organique (+7%) comparé au stock initial dans le traitement avec labour et restitution des résidus de récolte est constaté. Le travail superficiel et le semis direct conduisent à une plus forte accumulation de matière organique dans le sol qu'avec le labour : elle est respectivement de +14% et +13% du stock initial.

Des synthèses d'essais comparant les stocks de matière organique sous différents régimes de système de culture, principalement aux Etats-Unis, montrent également que les stocks de matière organique sont en moyenne plus élevés sans système de culture mais cette augmentation est relativement limitée (Balesdent, 1997).

Mais la question qui se pose ici c'est que est-ce que ces matières organiques apportées par les couvertures végétales sont-elles vraiment les responsables de cette augmentation de pH ?

En sachant que l'acidité d'un sol est contrôlée par les charges électriques présentes à la surface de ses constituants dont il faut distinguer trois grands types : les oxydes de fer et d'aluminium, les argiles et enfin les matières organiques.

La fraction organique a un comportement typique de surface ayant une charge variable. En effet, les substances humiques portent des groupes fonctionnels variés (hydroxyle -OH [alcoolique, phénolique], carboxyle -COOH, carbonyle C=O) qui leur confèrent le caractère d'acides faibles (pKa compris entre 4 et 6), capables de retenir des cations et anions par échange et par complexation.

La CEC des composés organiques provient, dans un premier temps, des charges négatives apparaissant lors de la dissociation des molécules organiques qui se comportent comme des acides faibles : $R-COOH \rightleftharpoons R-COO^- + H^+$

Dans beaucoup de sols, entre 10 et 90 % des charges négatives totales proviennent des groupes fonctionnels des matières organiques, autrement dit, la matière organique est

chargée négativement dans cette gamme de pKa où l'équilibre de la réaction de dissociation en solution tend vers la formation de proton et de groupement organique COO^- .

II.4.3. L'effet du pH de sol sur la concentration des ions phosphates (Cp) dans le sol

Les charges électriques des phases solides sur leurs surfaces des groupements fonctionnels comme -OH et -COOH évoluent avec le pH du sol et participent à la régulation des espèces en solution. En effet, à partir du point de charge nulle (PCN) l'augmentation du pH change les charges électriques positives en charges négatives. La présence des charges est à l'origine de nombreuses propriétés des sols comme par exemple la capacité d'échange cationique et anionique. Donc comme la phase solide est chargée négativement, elle peut attirer les cations par une attraction électrostatique et/ou par une formation des liaisons spécifiques. Cette rétention ou adsorption des cations sur la phase solide pourrait libérer les anions comme les ions phosphates dans la solution du sol. Ce phénomène explique l'augmentation de la concentration des ions phosphates dans la solution du sol quand le pH du sol augmente.

II.4.4. L'effet de la fertilisation sur la concentration des ions phosphates (Cp) dans le sol

Comme nous l'avons vu dans le tableau 2 sur les différentes doses de fertilisation appliquées dans la culture de maïs dans le sol d'Andranomanelatra, en F1 il n'y a que de fumier de ferme de 5t ha^{-1} alors qu'en F2 en plus de ce fumier de ferme de 5t ha^{-1} , qui contient $6,1\text{kg ha}^{-1}$ de P, on y ajoute des engrais minéraux entre autres le phosphate d'ammoniaque 20N-45P₂O₅ qui apporte $29,5\text{kg ha}^{-1}$ de P avec une dose de 150kg ha^{-1} . Donc cette différence de dose d'apport explique l'effet de la fertilisation sur la concentration des ions phosphates dans le sol d'Andranomanelatra.

II.4.5. L'effet de système de culture sur la concentration des ions phosphates (Cp) dans le sol

A l'issue de ces résultats d'analyse au laboratoire et du test statistique, on a trouvé que le système de culture semis direct avec couvertures végétales a un effet positif sur la quantité des ions phosphates dans la solution du sol d'Andranomanelatra. Mais on peut dire aussi que le travail du sol avec labour pourrait avoir des effets négatifs sur la quantité des ions phosphates dans le sol. En effet, le fait de labourer le sol peut augmenter la perte en ions phosphates par lessivage des éléments en profondeur et par érosion de ceux qui sont restés en surface sans protection par de couvertures végétales. Mais dans la circonstance où s'est passée notre étude, nous avons supposé que ces pertes sont négligeables. Cette hypothèse est probablement raisonnable pour ce qui concerne les fuites de P vers la profondeur du profil de sol qui a une texture argileuse et limoneuse. Un calcul rapide, volume d'eau lixivié (environ 500 mm) par la concentration de la solution de P en solution dans ce type de sol de l'ordre de $20\ \mu\text{g P L}^{-1}$ (Rabeharisoa, 2004 ; Oberson et *al.*, 1999), montre que le P lixivié ne représente que quelques dizaines de grammes de P par hectare.

Par contre, l'hypothèse selon laquelle le P ruisselé est négligeable sans doute moins même si la pente de la parcelle expérimentale des différents dispositifs reste faible. Une des raisons majeures de la présence d'une couverture végétale permanente est son rôle protecteur vis-à-vis de la désagrégation des particules de sol par l'impact direct des gouttes de pluie et du ruissellement qui peut en résulter. Selon l'étude de Rasoloniaina en 2005, le système en labour est plus favorable au ruissellement (1100 mm) par rapport au système semis direct sous couverture végétale (450 mm). Il est donc probable que les pertes de P par érosion hydrique/ruissellement diffèrent en particulier avec le mode de préparation et de semis du sol. D'ailleurs plusieurs études ont souligné que les pertes de terre sont plus importantes en utilisant les techniques de préparation conventionnelle à base de labour que pour les techniques à base de semis direct. Ainsi, Silva et al., 1997, rapporte une perte annuelle, en moyenne sur 5 ans, de $40 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour une parcelle des Cerrados (savane) brésilienne sous climat tropical saisonnier ayant une pente de 0.04 m m^{-1} . Pour les systèmes à base de semis direct sur couverture permanente du sol, les pertes étaient de l'ordre de 10 fois plus faibles. L'étude faite par Rasoloniaina en 2005 sur les hautes terres malgaches, dans les dispositifs de TAFE Antsirabe, a montré que la perte en terre est plus importante ($35 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) avec le système labour qu'avec celui de semis direct ($7,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$). Compte tenu de la teneur en P total de ce type de sol, en moyenne de 500 mg P kg^{-1} (Rabeharisoa, 2004), le flux annuel de P ruisselé est de $17,5 \text{ kg P ha}^{-1}$ pour le système labour et $3,75 \text{ kg P ha}^{-1}$ pour le SCV.

Dans les deux systèmes comparés, à part le non labour du sol dans le système semis direct, ce sont les couvertures végétales qui pourraient être l'origine de la différence à travers les matières organiques apportées par ces couvertures végétales.

L'étude menée par Randriantsoa (2001) sur un sol ferrallitique malgache a montré que par rapport au labour, le SCV apporte 80% de C.

Par rapport aux études récentes faites par Razafimbelo en 2005 sur le dispositif d'Andranomanelatra, Les stocks de carbone sous SCV et labour sont significativement différents pour la couche 0-20cm.

Mais la question qui se pose ici c'est que est-ce que ces matières organiques apportées par les couvertures végétales sont-elles vraiment les responsables de cette augmentation des ions phosphates dans la solution du sol ?

Ainsi en partant sur cette hypothèse : l'augmentation des ions phosphates dans la solution du sol pourrait être obtenue par la matière organique apportée par les couvertures végétales, deux phénomènes peuvent exister pour la confirmer :

Premièrement, dans les matières organiques, on peut trouver déjà de phosphore organique qui peut se retrouver dans la solution du sol après une libération et une minéralisation par des microorganismes dans le sol. Par exemple dans le fumier de ferme apporté dans le cadre de la fertilisation dans cette étude, dans 5 t ha^{-1} de fumier on peut avoir $6,1 \text{ kg de P ha}^{-1}$ (Analyse ONG TAFE).

Donc rien qu'avec le fumier on peut déjà avoir une quantité non négligeable de P dans le sol, alors que les couvertures végétales pourraient produire une biomasse importante en quantité qui sera une source de matière organique sur et dans le sol.

Toutefois il faut noter quand même que le niveau de pH trop bas ne permet pas aux autres microorganismes de transformer efficacement les matières organiques libérées par l'action des champignons. Mais quand on regarde le pH du sol dans notre dispositif (Tableau 4), le pH du sol dans le système semis direct sous couverture végétale ou SCV est plus élevé que celui dans le système labour, donc l'action des microorganismes sur la minéralisation peut se dérouler normalement.

Deuxièmement, l'incorporation de la matière organique dans les sols peut augmenter la quantité des ions phosphates dans la solution du sol. En effet, étant chargées négatives dans une condition d'acidité faible, les matières organiques pourraient être considérées comme des concurrents des autres produits de décomposition des matières organiques (acides organiques de faible poids moléculaire, acides humiques et fulviques) et les ions phosphates, qui sont aussi chargés négativement, dans le sol pour être fixés par des cations.

Par conséquent, la complexation ou la liaison formée entre les composés organiques et les cations (Aluminium ou Fer) pourrait libérer les ions phosphates dans la solution du sol.

II.5. Conclusion

Les ions phosphates dans la solution du sol jouent un rôle très important non seulement dans le fonctionnement du cycle de phosphore dans un système cultivé, mais surtout ils déterminent les rendements des cultures. La concentration de ces ions phosphates dans la solution du sol peut varier en fonction de différents facteurs, entre autres les types de sol et les pratiques culturales.

Dans notre étude, concernant les effets des pratiques culturales sur la concentration de ces ions phosphates dans la solution du sol, l'apport de dolomie et des engrais minéraux phosphatés dans le traitement F2 et des matières organiques par les couvertures végétales du système SCV sont jugés comme des facteurs influençant l'augmentation de cette concentration. La dolomie a évidemment eu un effet sur le pH du sol qui a modifié la propriété chimique du sol en agissant sur les autres éléments chimiques comme l'aluminium en faveur des ions phosphates. Dans le système SCV, il y avait les matières organiques qui ont agi également non seulement sur la propriété physique du sol en l'améliorant mais aussi sur l'aspect chimique.

Pour conclure, l'augmentation des productions agricoles pourrait être envisagée en adoptant ce système de culture SCV avec un apport raisonné des engrais minéraux et des amendements calciques. Cette alternative peut être donc considérée comme une des solutions pour un développement durable car non seulement elle augmente la production mais aussi elle protège l'environnement surtout le sol contre l'érosion.

III. LA FERTILISATION PHOSPHATÉE DES SOLS FERRALLITIQUES DE MADAGASCAR : EFFETS DES ENGRAIS BIOLOGIQUES PHOSPHATÉS

III. 1. Introduction

La stratégie de réduction de la pauvreté et de l'insécurité alimentaire inscrite dans la politique nationale de développement rural vise des objectifs d'une forte croissance économique et d'une amélioration de la qualité de vie des populations. A Madagascar, le milieu rural est tout particulièrement concerné, d'une part en raison du caractère préoccupant de la pauvreté dans les campagnes, d'autre part parce que les objectifs de croissance économique et de réduction de la pauvreté ne seront pas atteints sans une relance de la production agricole (MAEP, 2004). Pour les petits exploitants agricoles, la couche la plus vulnérable, la culture maraîchère figure parmi les productions agricoles que l'on devrait relancer parce que les produits maraîchers sont des produits quotidiennement utiles et peuvent être bénéfiques. La culture maraîchère est une pratique très fréquente chez les malgaches tant en milieu rural qu'en milieu urbain. Souvent, elle se pratique sur le bas fond, sur la rizière en contre-saison et aussi sur les bas de pente comme dans le cas de ce présent article. Les bas de pente caractérisés par des sols ferrallitiques de « tanety » ou sols des collines présentent des contraintes biophysiques et chimiques pour la production végétale (acidité, adsorption du phosphore, faible capacité d'échanges cationiques, etc...). Les techniques de gestion de la fertilité pratiquées par les agriculteurs malgache conduisent à un épuisement rapide des sols (Yemefack, 2004 ; N'Dienor, 2006). Le travail de Rabeharisoa en 2004 a montré que le sol ferrallitique malgache riche en phosphore total (300 à 1200 mg P kg⁻¹) présente une teneur en P assimilable très faible (moins de 10 mg P kg⁻¹). Ainsi, dans le cadre de cette étude en collaboration avec le projet BIRD (Biodiversity Integration and Rural Development) qui travaille dans la protection de la zone forestière de Maromizaha en diffusant des modèles d'agriculture innovants, plusieurs essais sur l'apport d'engrais biologique phosphaté sur les cultures maraîchères ont été effectués. L'étude de l'effet des engrais biologiques phosphatés à dose croissante sur le rendement ainsi que la détermination de la dose optimale de ces engrais constituent les objectifs de ces essais.

Face à ces réalités, la question suivante se pose : « L'apport d'engrais biologique phosphaté pourrait-il augmenter la production pour relancer la culture maraîchère ? »

Afin d'apporter des éléments de réponse à cette problématique, deux hypothèses ont été retenues :

- Hypothèse 1 : L'apport d'engrais biologique phosphaté améliore la production sur des sols ferrallitiques
- Hypothèse 2 : Le rendement en légume augmente proportionnellement avec la dose croissante des engrais.

III. 2. Matériel et méthodes

III. 2.1. Présentation du site d'étude

Afin de s'approcher de la réalité paysanne, le dispositif expérimental a été installé dans des champs des paysans collaborateurs du Projet BIRD durant trois ans. La zone d'intervention du projet où l'expérimentation a été menée, se situe à Anevoka-Andasibe dans la Région Alaotra-Mangoro. Les caractéristiques agro-pédo-climatiques du milieu sont typiques du littoral Est de Madagascar, un climat tropical d'altitude avec une température moyenne annuelle de 18°C et une pluviométrie annuelle de 1779,6 mm répartie sur 207 jours. Le sol est caractéristique des milieux tropicaux humides de couleur jaune orangé à rouge (GERP, 2008). Ce sol est non seulement pauvre en matière organique (12,77%) mais acide avec un pH de 4.8 et carencé en phosphore (P total= 300 à 1200 mg P kg⁻¹, P biodisponible= inférieures à 10 mg P kg⁻¹) (Rabeharisoa, 2004).

III. 2.2. Les engrais biologiques testés et le matériel végétal

III.2.2.1. Les engrais

Le choix de fertilisant et de culture se basent sur les différentes doses préconisées par la société de distribution d'engrais biologique GUANOMAD à ses clientèles.

Les engrais phosphatés testés sont le Guanotsar, engrais biologique issu de l'excrément de chauve-souris dans les grottes malgaches, et le Guanobarren, issu de l'excrément d'oiseaux marins sur l'île de Barren malgache.

Les origines de ces types d'engrais (phosphorites) ont été déjà étudiées par Andrianjaka (1984) dans les sols de rizières de Madagascar sur leur efficacité en utilisant différentes doses. Les gisements de ces phosphorites des îles Barren ont été étudiés par Ratsimbazafy (1977).

Chaque apport d'engrais phosphaté a été mélangé avec du compost de déchets urbains de la décharge d'Andralanitra étant donné que le dispositif est caractéristique d'un sol pauvre où la pratique successive de défriche et de culture a épuisé la matière organique et a dégradé la structure du sol.

Afin de pouvoir dégager ce potentiel des engrais biologiques phosphatés, le Guanotsar (GT) et le Guanobarren (GM) à trois doses croissantes chacune (200 kg.ha⁻¹, 400 kg.ha⁻¹ et 600 kg.ha⁻¹) ont été comparées avec les doses témoins qui sont le témoin absolu et le témoin compost de déchet urbain de la décharge d'Andralanitra avec un apport de 5 t.ha⁻¹.

Ainsi, les 8 modalités correspondent au :

- Témoin absolu (**T_{abs}**),
- Témoin avec apport de compost de déchet urbain (**T_{compost}**),
- Guanotsar à dose 200 kg.ha⁻¹(**GT₂₀₀**),
- Guanotsar à dose 400 kg.ha⁻¹(**GT₄₀₀**),
- Guanotsar à dose 600 kg.ha⁻¹(**GT₆₀₀**),
- Guanobarren à dose 200 kg.ha⁻¹(**GM₂₀₀**),
- Guanobarren à dose 400 kg.ha⁻¹(**GM₄₀₀**),

- Guanobarren à dose 600 kg.ha⁻¹(GM₆₀₀).

Le test de l'engrais phosphaté Guanotsar s'est fait avec les deux spéculations concombre et petit pois et l'effet du Guanobarren a été étudié avec la culture d'oignon.

Chaque traitement a été réparti de façon aléatoire et répété trois fois à l'intérieur d'un dispositif en bloc.

Les caractéristiques du facteur principal qui est l'engrais phosphaté sont les suivantes :

Tableau 6 : Caractéristiques des engrais utilisés

Caractéristiques	Guanotsar	Guanobarren	Compost de déchet urbain d'Andralanitra
Origine	Excrément chauve souris dans les grottes malgaches	Excrément oiseaux marins sur l'île de Barren malgache	Ordure ménagère d'Antananarivo compostée naturellement et criblé
pH	5,5-6,1	4,5-6,1	8,2
Anhydride phosphorique (P₂O₅)	25-45%	20-35%	0,6%
Azote	5-7%	3,5-6 %	0,67%
Matière organique	30-40%	19,4%- 25,7%	24,8%
C/N	3,4	2,98- 3,2	
Oxyde de potassium (K₂O)	1,5%	0,02-0,06%	0,4%
Oxyde de calcium	31-33%	31-33%	1,95%
Oxyde de magnésium	-	-	0,15%
Biomasse microbienne		2,5.10 ³ - 1,8.10 ⁶	

Source : Guanomad, 2010 ; Falinirina 2010

Tableau 7 : Fertilisants et matériel végétal

Fertilisants	Guanotsar	Guanobarren
Matériel végétal	Petit pois	Concombre
Surface élémentaire m²	6	10
Dose d'apport (kg.ha⁻¹)	200/400/600 (Ajouté de 5 t.ha ⁻¹ de compost de déchet urbain de la décharge d'Andralanitra)	

III.2.2.2. Les matériels utilisés

Les espèces maraîchères étudiées sont le petit pois et l'oignon qui sont des spéculations introduites et le concombre déjà pratiqué par une majorité de paysans.

- **Concombre :**

Le concombre est une plante monoïque, l'apparition des fleurs est en fonction de l'éclaircissement et de la température.

- **Choix du sol**

- ✓ Sol riche et humifère.
- ✓ Le pH optimal est de 5,5 à 7.
- ✓ Eviter les sols pauvres, trop lourds ou compacts.
- ✓ Un sol trop froid provoque la fonte des jeunes plantules.

○ **Besoin en chaleur :**

- ✓ L'optimum de croissance racinaire est de 22 à 25°C.
- ✓ Le minimum de 12°C est exigé pour le développement racinaire.
- ✓ L'optimum de la croissance végétative est de 20 à 22°C le jour et 17 à 20°C la nuit.
- ✓ En période de production, la culture exige 20 à 25°C le jour et 17 à 20°C la nuit.
- ✓ Les excès de température et les rayons du soleil gênent la fécondation et la fructification.

○ **Récolte :**

- ✓ La récolte commence 3 mois après le semis.
- ✓ Le meilleur stade de récolte est le stade de fruit tendre et encore vert, les fruits jaunes sont impropres à la consommation.
- ✓ La récolte est effectuée avec soins : à l'aide du sécateur afin de ne pas endommager les plantes.
- ✓ Les fruits ne doivent pas être jetés dans des sacs de cueillette.
- ✓ Il est recommandé d'acheminer la production rapidement à sa destination pour la vente immédiate afin de sauvegarder la qualité du produit.

○ **Rendement :**

- ✓ Moyenne : 20 Tonnes à l'hectare

▪ **Oignon :**

○ **Caractéristiques de la plante**

L'oignon est une plante biennale cultivée sous irrigation, pour ses bulbes et ses feuilles. Le cycle végétatif de la culture varie de 120 à 160 jours suivant les variétés. La plante produit à maturité un bulbe de forme ronde/épaisse ou aplatie, de couleur généralement violette ou blanche. Sa multiplication est généralement assurée par des graines noires et angulaires. L'oignon peut également être multiplié végétativement par des petits bulbes (bulbilles).

○ **Nature du sol**

L'oignon se développe bien sur les sols sableux-argileux et sableux limoneux riches en matières organiques bien décomposées. Il craint l'acidité excessive, les pH les plus favorables sont situés entre 5,5 et 7,5. L'oignon ne supporte ni la salinité du sol ni celle de l'eau d'arrosage.

○ **Récolte**

Il est important de récolter les oignons avec le feuillage (donc ne pas couper au collet ce qui est l'habitude des producteurs). Par la suite, il faut recouvrir les oignons avec le feuillage et laisser ressuyer les bulbes sur la parcelle pendant quelques jours dans un endroit aéré (2 à 3 jours)

○ **Rendement :**

Le rendement potentiel varie entre 30 et 60 t.ha⁻¹ selon les variétés.

▪ **Petit pois :**

○ **Description :**

Il existe plusieurs variétés : naines ; demi-naines ; grimpantes ; avec ou sans parchemin. La fleur est blanche ou violacée et donne naissance par autofécondation à une gousse de 6 à 8 cm contenant 5 à 10 graines. Les feuilles ont 5 folioles dont la dernière est transformée en crille, à la base du pétiole, on distingue 2 larges stipules entourant la tige.

○ **Physiologie :**

Le pois se lève entre 8 à 12 jours suivant l'époque et la variété.

○ **Ecologie :**

Température : l'optimum se situe entre 15° et 18°C, la plante est assez résistante au froid.

Eau : la plante est attaquée par les maladies cryptogamiques en cas de forte humidité. Le petit pois supporte mal la sécheresse. Les irrigations en saison sèche est bénéfique. Les besoins en eau sont de l'ordre de 400 à 500mm jusqu'à la formation des gousses suivi d'une période sèche pour la maturation.

Sol : il préfère les sols meubles, légers, peu acides et frais. Il se comporte bien en sol argileux.

Zones de culture : le petit pois est cultivé sur les bas de pente, bas-fond et au bord des fleuves.

○ **Rendement :**

Pour le petit pois secs, le rendement moyen au niveau mondial s'établit à 1,47 t.ha⁻¹, à 1,66 t.ha⁻¹ en Europe et à 2,05 t.ha⁻¹ en Amérique, mais seulement 0,71 t.ha⁻¹ en Afrique. Les meilleurs rendements sont enregistrés dans l'Union européenne avec 2,55 t.ha⁻¹ en moyenne, et 2,93, 3,51 et 3,72 t.ha⁻¹ respectivement en Allemagne, au Royaume-Uni et en France (FAO, 2007)

III. 2.3. Estimation de rendement des cultures

La détermination du rendement a été faite à chaque spéculatation et la récolte à chaque culture s'est faite à l'état commercialisable. La formule adoptée est spécifique à chaque culture :

▪ **Concombre :**

$$Rdt = \frac{N_p}{m^2} \times \frac{N_f}{poquet} \times P_{mf} \times 10^{-2} \quad (1)$$

Rdt = Rendement (t.ha⁻¹)

N_p : Nombre poquet

N_f : Nombre fruit

P_{mf} : Poids moyen d'un fruit (g)

- Oignon :

$$Rdt = \frac{N_b}{m^2} \times P_{mb} \times 10^{-2} \quad (2)$$

Rdt = Rendement (t.ha⁻¹)

N_b : Nombre de bulbe

P_{mb} : Poids moyen d'un bulbe (g)

- Petit pois :

$$Rdt = \frac{P_s \times G_p \times Gr_G}{1000} \times P_{1000} \times 10^{-2} \quad (3)$$

Rdt = Rendement (t.ha⁻¹)

P_s = Nombre de plante/unité de surface (m²)

G_p = Nombre de gousses/plante

Gr_G = Nombre de graines/gousse

P₁₀₀₀ = Poids de 1000 grains (g).

III. 2.4. Analyses statistiques des données

Afin de déterminer l'effet des engrais biologiques phosphatés sur le rendement des trois cultures, l'analyse statistique des données s'est faite par l'analyse de la variance ou ANOVA des rendements obtenus entre les différentes doses suivies d'une étude comparative où chaque moyenne a été comparée entre elles. La différence entre ces moyennes de chaque traitement est significative au seuil 0,05.

III. 3. Résultats

La réponse de la culture de concombre à dose croissante de Guanotsar est résumée dans la figure suivante :

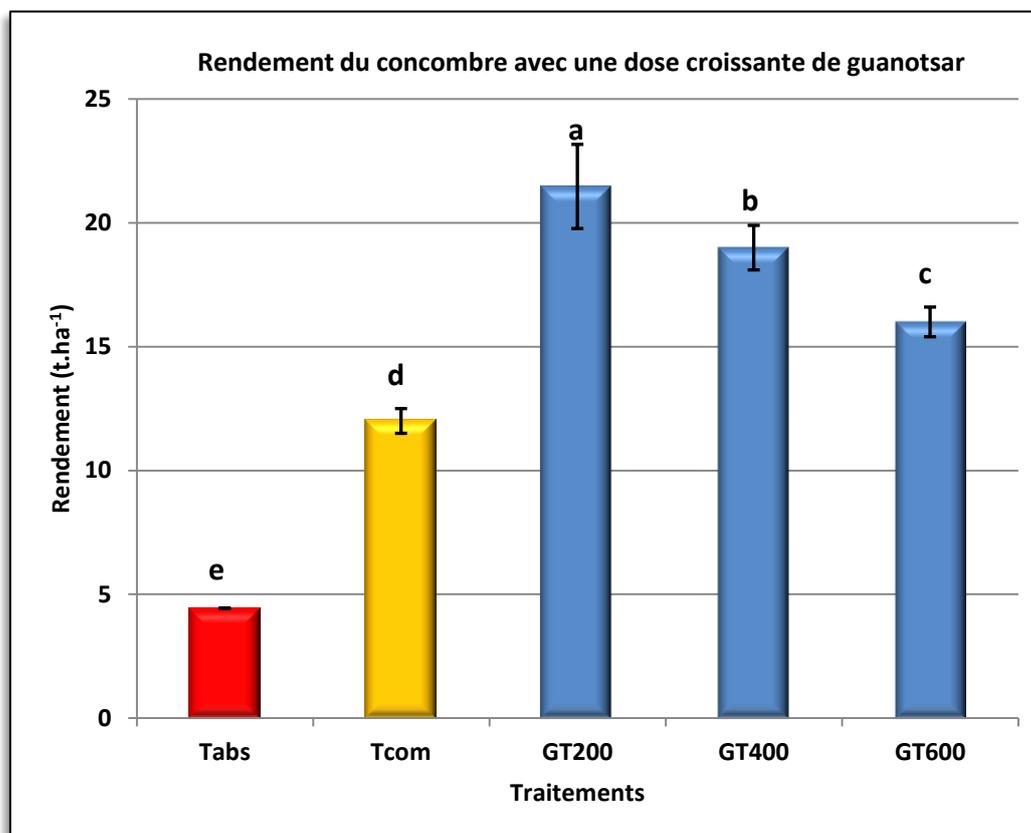


Figure 10 : Réponse de la culture du concombre au traitement Guanotsar à doses croissantes 200 kg.ha⁻¹, 400 kg.ha⁻¹, et 600 kg.ha⁻¹ (Tabs : Témoin absolu, Tcom : Témoin compost)

Les résultats obtenus (figure 10), montrent que parmi les traitements comparés, le rendement sur les parcelles témoin absolu (Tabs) est le plus faible (4,431 t.ha⁻¹) et celui sur les parcelles Guanotsar à dose plus faible (T200) est le plus élevé avec un rendement de 21,471 t.ha⁻¹. Une différence significative est constatée entre ces deux traitements.

Les rendements obtenus avec le témoin compost de déchet d'ordure d'Andralanitra sont plus élevés que ceux obtenus avec le témoin absolu mais sont plus faibles par rapport aux traitements Guanotsar quelle que soit la dose apportée. Avec le traitement Guanotsar, les rendements du concombre sont inversement proportionnels aux doses appliquées.

Les résultats de l'effet du Guanobarren à dose croissante sur le rendement des bulbes d'oignon sont synthétisés dans la figure suivante :

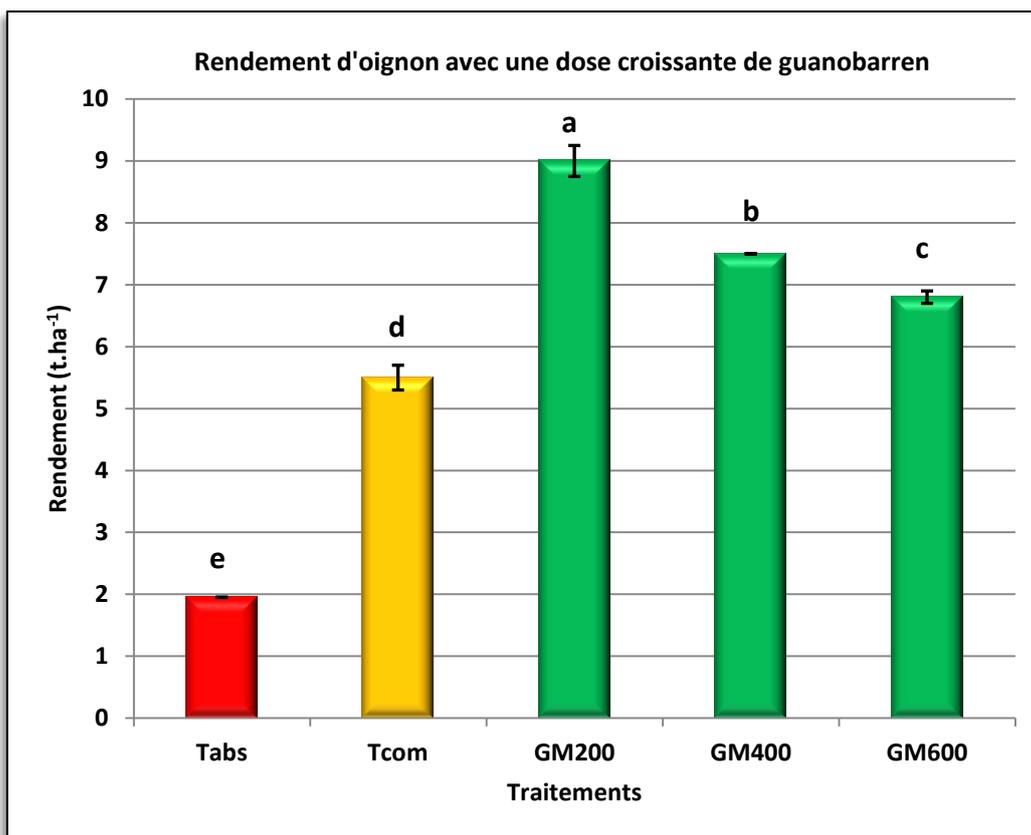


Figure 11 : Réponse de la culture d'oignon au traitement Guanobarren à doses croissantes 200 kg.ha⁻¹, 400 kg.ha⁻¹, et 600 kg.ha⁻¹ (Tabs : Témoin absolu, Tcom : Témoin compost)

Les résultats obtenus (figure 11), montrent que le rendement le plus élevé (9 t.ha⁻¹) est obtenu avec le traitement Guanobarren à dose plus faible (T200) tandis que le rendement le plus faible appartient au témoin absolu (Tabs). Les différences entre les deux traitements sont significatives.

Le témoin compost de déchet d'ordure d'Andralanitra a un rendement significativement plus élevé par rapport au témoin absolu mais significativement plus faible qu'avec ceux issus du traitement Guanobarren quelle que soit la dose apportée. Avec Guanobarren, mis à part la dose la plus faible (200kg.ha⁻¹), l'augmentation de la dose apportée n'a pas d'effet sur le rendement de bulbe d'oignon (dose 400kg.ha⁻¹ et 600kg.ha⁻¹).

Les résultats de l'effet du Guanotsar à dose croissante sur le rendement des petits pois sont synthétisés dans la figure suivante :

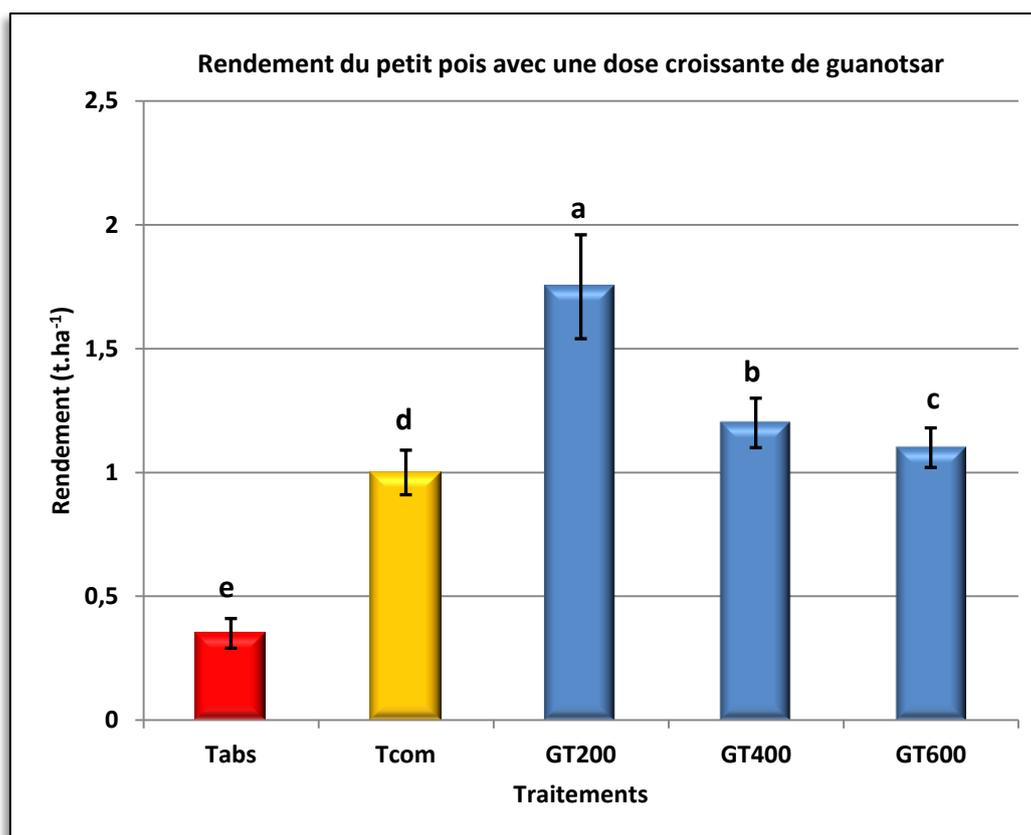


Figure 12 : Réponse de la culture de petit pois aux traitements Guanotsar à doses croissantes 200 kg.ha⁻¹, 400 kg.ha⁻¹, et 600 kg.ha⁻¹ (Tabs : Témoin absolu, Tcom : Témoin compost)

Concernant l'effet de l'engrais phosphaté Guanotsar à dose croissante sur le rendement du petit pois (figure 12), le témoin absolu donne du rendement significativement faible par rapport aux autres traitements car il n'atteint même pas le 0,5t.ha⁻¹ alors que tous les autres traitements donnent des rendements supérieurs ou égaux à 1t.ha⁻¹.

L'engrais phosphaté Guanotsar augmente le rendement en petit pois à une certaine dose, c'est à dire à 200 kg.ha⁻¹ et au-delà de cette dose, le rendement diminue. Avec Guanotsar, comme dans le cas de la culture de concombre, l'augmentation de la dose fait diminuer les rendements.

Bref, les trois graphes ont la même allure. Le témoin absolu donne le rendement le plus faible, suivi par le témoin compost de déchets urbains. L'apport des engrais phosphatés augmente le rendement. En effet, les rendements obtenus avec ces engrais phosphatés sont supérieurs à ceux obtenus avec les deux témoins. Concernant l'effet de l'augmentation de la dose apportée, les résultats sont inversement proportionnels à la dose. Autrement dit, plus la dose d'engrais phosphaté apportée augmente, plus le rendement obtenu de chaque espèce diminue. Ainsi, pour les trois espèces, la dose la plus faible de 200 kg.ha⁻¹ donne le rendement le plus élevé.

Pour les trois espèces, les traitements ont une probabilité Pr > F inférieure au seuil significatif qui est de 0,05 d'une part (Concombre : Pr>F = 0.0001, Oignon : Pr>F = 0.001,

Petit pois : $Pr > F = 0.028$) et un coefficient de corrélation R^2 très élevé d'autre part (Concombre : $R^2 = 0.973$, Oignon : $R^2 = 0.986$, Petit pois : $R^2 = 0.924$). Par conséquent, une différence significative entre les différents traitements appliqués est observée. Cette différence significative entre traitement est plus observée entre le témoin absolu et la dose la plus faible d'engrais phosphaté puisque c'est avec ce témoin que le rendement le plus faible s'observe.

III. 4. Discussions

III. 4.1. Effet de la fertilisation biologique et phosphatée sur les rendements

L'amélioration des rendements en concombre, bulbe d'oignon et petit pois sur les sols fertilisés en compost de déchet urbains, et en engrais phosphatés Guanotsar et Guanobarren montrent que les fertilisants appliqués présentent un effet positif sur le sol et sur les rendements des cultures maraichères par rapport aux rendements sur des sols non fertilisés (témoin absolu). Ces résultats sont conformes aux travaux de plusieurs auteurs, comme (Innocent et *al.*, 2013 ; Falinirina, 2010 ; Bazoumana et *al.*, 2009 ; Gascho et Parker 2001 ; Dridi et Toumi, 1999 ; Andrianjaka, 1984) qui ont mis en évidence des augmentations sensibles de rendements des cultures après des apports des engrais organiques, minéraux sur des sols ferrugineux tropicaux et des ferralsols acides. L'augmentation des rendements de culture sur les sols amendés en compost de déchets urbains d'Andralanitra, en engrais phosphaté Guanotsar et Guanobarren a occasionné des exportations d'éléments minéraux plus importants que celles observées sur le sol témoin sans aucun apport.

Entre le traitement organique (témoin compost de déchet urbain), et le traitement mixte (Compost de déchet urbain associé aux engrais phosphatés Guanotsar et Guanobarren), les engrais phosphatés améliorent de façon significatives les rendements en culture maraichère. Ceci est conforme aux résultats d'Innocent (Innocent et *al.*, 2013) en comparant l'effet de l'engrais organique local CETEP seul et l'engrais organique local CETEP associé aux engrais minéraux NPK.

Les faibles rendements obtenus dans les terrains amendés par la matière organique seule par rapport à ceux obtenus dans les parcelles fertilisés par la matière organique associée aux engrais phosphatés pourraient être expliqués par le fait que le phosphore et l'azote disponibles apportés par les engrais phosphatés furent en majeure partie à la base des bons rendements dans les parcelles étant donné que ces éléments font défaut ou sont présents à l'état libre en quantité infime ou immobilisé par les microorganismes dans la matière organique (Morel et *al.*, 2011 ; Ziadi et *al.*, 2011 ; Rabeharisoa, 2004). Par contre, malgré ce manque d'éléments minéraux majeurs dans la matière organique, elle améliore la structure du sol en contribuant à sa résistance contre l'action érosive des pluies ou du vent, en retenant l'eau et en la libérant lentement aux plantes (capacité d'emmagasinement de l'eau) pendant une période plus longue (Andriamaniraka et *al.*, 2010), mais aussi en retenant des substances nutritives du sol et en les libérant lentement aux plantes pendant une période

plus longue (Molenaar et *al.*, 2008). Dès lors, la combinaison de ces effets bénéfiques de la matière organique à savoir l'amélioration de la structure du sol et de ceux des engrais phosphatés (Andriamaniraka et *al.*, 2010), l'amélioration de la fertilité du sol expliquerait les bons rendements qu'ont manifestés les parcelles fertilisées aux engrais phosphatés combinés à la matière organique.

III. 4.2. Effet des doses d'engrais phosphatés apportées sur les rendements

L'allure des courbes de réponse des espèces maraîchères aux engrais phosphatés a montré que l'accroissement du rendement est en corrélation négative avec l'augmentation de la dose de fertilisant apportée. L'indice de saturation du phosphore ainsi que le processus microbien peuvent expliquer l'allure de ces courbes (Parent et *al.*, 2002). Le premier se passe dans le sol organique dont la pratique de fertilisation dépasse largement la capacité du sol à retenir le phosphore (Frossard et *al.*, 2004 ; Fardeau, 1993). Ceci ne peut être considéré comme élément expliquant ce fait parce que cet indice de saturation concerne le sol (Fardeau et Frossard, 1992) alors qu'avec notre étude, nous considérons l'effet immédiat de l'apport des éléments aux plantes (Morel et *al.*, 2011). Donc, l'explication doit se focaliser sur le processus microbien qui tient un rôle important dans la décomposition des matières organiques contenues ici dans le compost de déchet et dans les engrais phosphatés (Falindirina, 2010). Le processus microbien peut être pris en compte puisque quand un engrais phosphaté hydrosoluble est appliqué au sol, il réagit rapidement avec les composantes du sol (Frossard et *al.*, 1986 ; FAO, 2004). Or, la disponibilité du phosphore est sujette à plusieurs processus physicochimiques comme la précipitation, l'adsorption et la réorganisation microbienne (Parent et *al.*, 2002 ; Morel, 2002) ; en plus les amendements organiques procurent une source de carbone qui stimule l'activité microbienne.

Chacune des doses apportées est additionnée de compost de déchet urbain (24,8% de matière organique). Ainsi, un enrichissement du sol en matière organique augmente la contribution du P organique à la dynamique du phosphore (Frossard et *al.*, 1986) mais les différentes modalités influençant la décomposition de ces matières organiques apportées sont cependant liées à l'activité des microorganismes. Il y a donc interaction entre les microorganismes et la mobilité du phosphore (Grant et *al.*, 2005). Le critère biologique représentatif des processus microbiens peut être décrit par le rapport des formes organiques C/P, de façon analogue au rapport C/N (Parent et Khiari, 2003). Jusqu'à un rapport C/P critique, la biomasse microbienne immobilise le P, au-delà de cette valeur critique, le P peut être hydrolysé ou non selon le niveau d'activités enzymatiques (phosphatases produites par les microbes et les racines). Donc, plus on augmente le taux de phosphate, plus la valeur C/P atteint un niveau critique, c'est pourquoi la dose significativement forte diminue le rendement car l'immobilisation microbienne de P de l'engrais est importante que l'effet de l'ajout de MO sur la solubilité du P de l'engrais dans le sol acide réputé fixateur de P (Parent et *al.*, 2002).

III. 5. Conclusion

Le but de cette recherche est d'augmenter la production agricole; d'étudier l'effet de deux engrais biologiques phosphatés sur le rendement du concombre, d'oignon et du petit pois. Sur ceux, l'étude fait intervenir différents types de traitements composés de Guanotsar, Guanobarren, et compost de déchet urbain de la décharge.

Parmi les deux engrais biologiques testés, le Guanotsar à la dose $200\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ donne le meilleur rendement. Toutefois, le Guanobarren donne aussi de rendement important sauf à dose élevée ($600\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). On en déduit alors que la première hypothèse : « les engrais biologiques phosphatés augmentent le rendement surtout le Guanotsar », est confirmée. Par contre, la deuxième hypothèse : « le rendement en légume augmente proportionnellement avec la dose croissante » est rejetée.

Pour conclure, l'apport d'engrais permet l'amélioration du rendement. Pourtant, il n'a pas encore été possible de déterminer avec précision la dose optimale d'apport correspondant à un maximum de rendement parce que les rendements obtenus n'atteignent même pas le rendement normal qu'on doit avoir pour le concombre et le petit pois, à cause du taux de germination qui n'est pas très fort et de l'attaque de la maladie. Aussi, la grille de fertilisation efficace ne peut pas être avancée par cette expérimentation. Toutefois, on peut affirmer que ces deux engrais biologiques améliorent le rendement et l'efficacité de chaque type d'engrais dépend de plusieurs facteurs comme l'espèce cultivée (légumineuse, graminée), le type de sol, les conditions climatiques.

IV. PERSPECTIVES (PROJET DE RECHERCHE)

Mon projet de recherche pour les 5-10 années futures peut être présenté en trois parties :

- ✓ une première partie, plutôt ciblée sur la recherche des pratiques agricoles améliorantes la disponibilité des phosphores dans les sols ferrallitiques de Madagascar,
- ✓ une deuxième partie, ciblée sur l'étude des engrais phosphatés qui pourraient améliorer la productivité et respecter l'environnement face aux problèmes de changements climatiques qui persistent actuellement,
- ✓ Une troisième partie consisterait à la modélisation de la biodisponibilité des phosphores en utilisant les engrais phosphatés biologiques sur les sols ferrallitiques.

IV.1. Pratiques agricoles améliorantes de la disponibilité des phosphores dans les sols ferrallitiques de Madagascar

Plusieurs facteurs pourraient influencer la mobilité des différentes sources de phosphore. À la base, les propriétés physicochimiques (texture, matière organique, présence d'hydroxydes de fer, d'aluminium et de calcium) et biologiques (mycorhizes, bactéries) des sols ont une influence sur la capacité de rétention et le mouvement du phosphore. Toutefois, l'influence des pratiques agricoles doit aussi être prise en compte. Par exemple, un bilan des apports excédentaire entraînera à long terme un enrichissement du sol qui augmentera les risques d'exportation de phosphore vers le milieu aquatique. La forme, la période et le mode d'épandage des engrais influenceront également le risque de transport événementiel par le ruissellement des apports récents de phosphore. Finalement, les pratiques culturales influenceront la distribution du phosphore dans le profil du sol et contrôleront la vulnérabilité des parcelles face aux processus d'érosion et de transport du phosphore particulaire.

➤ Bilan des apports et enrichissement des sols

A Madagascar, l'agriculture et l'élevage sont des activités inséparables. Ainsi les déjections animales sont couramment utilisées comme engrais de ferme. Comme le ratio phosphore/azote des fertilisants organiques dépasse celui qui est nécessaire aux cultures, il s'ensuit qu'une fertilisation basée sur les besoins en azote (N) des plantes génère un surplus de phosphore. Des bilans excédentaires en phosphore, plus ou moins importants, devraient être rapportés à l'échelle des fermes, des bassins versants ou des régions. Ainsi, dans le cadre de partenariat avec l'Université de Turin, une grande étude sera menée dans différents bassins versants d'Anevoka, des bilans à la surface du sol seront étudiés sur différentes parcelles. Des analyses de sol seront effectuées par le laboratoire de Turin et le laboratoire du Département Agriculture de l'ESSA afin de connaître le portrait de la richesse et de la saturation en phosphore des sols de cette région.

➤ **Forme, mode et période d'épandage des engrais**

La teneur et la saturation en phosphore des sols et leur potentiel de sorption-désorption traduisent bien la mobilité du phosphore stocké dans les couches arables des sols agricoles. Les extractions chimiques du phosphore des sols ne tiennent toutefois pas compte de l'influence à court terme des épandages d'engrais inorganiques et organiques. En effet, la forme ainsi que la période et le mode d'épandage des engrais ont une influence sur les quantités et les formes de phosphore qui seront exportées des champs. L'effet des fertilisants sur la mobilité du phosphore est principalement lié à l'ajout de fertilisants organiques. La présence des composés organiques dans le sol entrerait en compétition avec le phosphore pour les sites d'adsorption. En se liant à ces derniers (Fe, Al, Ca, minéraux argileux), ces composés organiques favoriseraient la mise en solution du phosphore. De plus, la solubilité plus élevée du phosphore contenu dans les fumiers, combinée avec une quantité d'eau plus importante dans ceux-ci, la faible densité des particules organiques et son application en surface du sol, contribuerait significativement à l'accroissement des charges solubles, majoritairement biodisponibles, de phosphore. Cette augmentation épisodique, particulièrement celle de la fraction soluble dans le ruissellement à la suite des fertilisations, est indépendante de la richesse des sols. Ces pertes événementielles, lorsqu'elles se produisent, peuvent être responsables de 50 à 98 % des charges de phosphore mesurées en surface et dans le sous-sol. Elles représentent généralement de 5 à 10 % du phosphore total appliqué, mais peuvent représenter plus de 20 % dans des conditions défavorables (Withers *et al.*, 2003). L'exportation potentielle des engrais sous forme soluble est maximale suivant l'application en surface et diminue progressivement alors que le phosphore soluble est adsorbé par les particules de sol. La période s'écoulant entre l'épandage et le transport du phosphore lors d'une pluie revêt donc une importance cruciale puisque le phosphore des engrais organiques nécessite du temps pour se fixer aux particules de sol. De plus, lorsque les engrais organiques sont appliqués en même temps que les engrais minéraux, le phosphore organique réduit la fixation du phosphore de l'engrais minéral par les oxydes de fer et d'aluminium. Cette synergie augmente donc la solubilité du phosphore minéral et conduit à une plus grande disponibilité du phosphore pour la plante et à un risque accru de transport du phosphore vers le milieu aquatique. L'application d'engrais en surface, plutôt que l'incorporation, augmente aussi considérablement le risque d'exportation du phosphore qui est majoritairement transporté en surface par le ruissellement. Sans incorporation, le phosphore soluble forme généralement la fraction dominante du ruissellement. Par conséquent, l'incorporation diminue aussi la fraction soluble dans le ruissellement.

Dans le cadre du partenariat de recherche avec l'Université de Turin, des essais sur les effets de la couverture végétale (SCV), de l'amendement de dolomie et du type de sol sur la mobilité et la spéciation du phosphore (total, réactif dissous, particulaire et biodisponible) seront installés avec différentes parcelles. Bien que les processus d'érosion et de transport de sédiments fussent identifiés comme les principaux vecteurs d'exportation du phosphore, l'utilisation du système de culture sous couverture végétale (SCV) pourrait contribuer à une augmentation de la concentration en phosphore potentiellement biodisponible. Parmi les

implications pratiques de cette étude, il est à noter qu'un sol relativement pauvre en phosphore peut contribuer à des exportations significatives de phosphore si les modalités d'épandage font en sorte que la parcelle ruisselle avant l'enfouissement de l'engrais de ferme. Compte tenu de la faible profondeur effective d'interaction entre le sol et le ruissellement, l'enfouissement des amendements constitue également un élément déterminant du devenir du phosphore.

IV.2. Les engrais phosphatés qui pourraient améliorer la productivité et respecter l'environnement face aux problèmes de changements climatiques

La bonne gestion du phosphore est une des clés de la maîtrise des phénomènes d'eutrophisation caractérisés par des déséquilibres biologiques de l'écosystème (Arousseau et *al.*, 2007).

Les phosphates sont utilisés dans l'agriculture comme engrais pour enrichir les fruits et légumes en phosphore. Ils apportent aussi du calcium. Ils peuvent également apporter de l'azote (phosphate d'ammonium), la roche phosphatée du calcium (phosphates de calcium) et de l'aluminium (phosphate d'aluminium). Ces engrais peuvent être d'origine organique (poudre d'os, arêtes de poissons, etc.) ou inorganique (attaque d'acide sur du minerai), ce qui est de plus en plus le cas, hormis en agriculture biologique où les engrais de synthèse sont interdits. Le phosphore d'origine agricole peut provenir de sources ponctuelles et de sources diffuses.

Les minéraux des roches mères des sols contiennent des quantités de phosphore significatives, propres à satisfaire les besoins des plantes, et ce sur les sols jeunes de la plupart des cultures. Toutefois, l'intensification s'est accompagnée d'une sollicitation d'exportation que les pools de phosphore des sols ne pouvaient satisfaire. À l'état initial, les pools de phosphore étaient d'autant plus faibles et associés au pool organique que les sols étaient anciens et acides. Après 50 années de fertilisation chimique, appuyée sur l'idée que certains sols (andosols, ferrisols) fixent tellement le phosphore qu'il faut en apporter beaucoup pour satisfaire le besoin des cultures, les stocks de phosphore total sont tels, dans certaines parcelles, que la légère désorption ou solubilisation pourrait suffire à satisfaire le besoin des cultures pour plusieurs années, ce qui reste toutefois à démontrer. Le chaulage a parfois été utilisé pour faciliter la solubilisation du P à travers une augmentation de l'activité microbienne (Broadbent, 1986 ; Brossard et *al.*, 1988).

Deux certitudes cependant :

- La biodisponibilité de ce phosphore n'est assurée que si le statut organique des sols est correct. D'une part, la libération lente de P inorganique pendant la décomposition de matières organiques fournit du P peu exposé aux processus de fixation ; d'autre part, la matière organique a des capacités de chélation importantes qui diminuent

l'activité des cations polyvalents (Ca, Fe, Al) qui forment des sels insolubles avec le P (Broadbent, 1986).

- Les alluvions, par définition constituée de sédiments redéposés, sont issues de l'érosion de couches superficielles de zones situées en amont ; à condition qu'elles soient récentes, elles contiennent toujours un stock élevé de phosphore très disponible pour les cultures.

S'il faut rechercher des sources de phosphore qui pourraient améliorer la productivité et respecter l'environnement, elles sont limitées : cendres de combustion de végétaux (Cabidoche, 2001) et boues d'épuration urbaine en sont bien pourvues (plus que les composts d'ordures ménagères) ; de plus, les boues ne présentent pas de pouvoir fixateur vis-à-vis des phosphates (Brossard *et al.*, 1991). L'apport de deux doses de boues (10 t et 100 t.ha⁻¹ MS) sur un sol ferrallitique pourrait entraîner une augmentation du stock de P du sol, sous toutes ses formes (Brossard *et al.*, 1991).

Différentes sources de phosphore exogènes sont malheureusement lointaines :

- Scories de déphosphorylation du minerai de fer : elles donnent d'excellents résultats sur les sols très acides, en combinant une solubilisation lente du phosphore et un effet de chaulage, mais sont malheureusement de plus en plus rares. Leur contenu en ETM est par ailleurs à surveiller.
- Les phosphates naturels devraient être exploités. Les apports de roches volcaniques broyées pourraient provenir de la région volcanique de Madagascar, à condition d'en créer la filière ; leur efficacité est cependant assez faible.
- Le guano présent dans les différentes petites îles de Madagascar (Ratsimbazafy, 1977). Ces guanos sont déjà exploités par plusieurs industries à Madagascar.

Ainsi, Madagascar possède une potentialité énorme en matière de sources d'engrais phosphatés naturels qui pourraient être exploités pour améliorer la productivité de nos sols tout en respectant l'environnement. Et c'est dans ce sens que nous envisageons de mener des essais agronomiques pour tester et vérifier les valeurs agronomiques de ces engrais.

Un projet est entrain de monter avec l'Université de Turin et le FOFIFA de Kianjasoa pour voir les effets des ces différents engrais sur la production céréalière et légumière.

Ce partenariat de recherche valorisera l'expérience locale et les ressources locales qui seront appuyées par des chercheurs venant de l'Université de Turin dans le Département Agronomique.

IV.3. Modélisation de la biodisponibilité des phosphores en utilisant les engrais phosphatés biologiques sur les sols ferrallitiques

Dans le but de la continuité et de la complémentarité de la recherche, le dispositif qui a été utilisé pour l'étude des effets des engrais phosphatés biologiques pourrait être exploité afin

de modéliser la biodisponibilité du phosphore dans les sols. Deux facteurs seront étudiés dans cette recherche : le type d'engrais phosphatés biologiques (Guanotsar et Guanobarren) et la dose (200, 400 et 600 kg.ha⁻¹). Pour la détermination de cette biodisponibilité du phosphore, l'approche basée sur le mécanisme de diffusion qui a été déjà utilisée dans les sols cultivés durant longue durée sera adoptée. Cette approche qui reflète bien le fonctionnement du système sol-solution-plante dans le cycle biogéochimique du phosphore permet de modéliser l'évolution de cette biodisponibilité du phosphore. Par conséquent cette approche constituerait un nouveau cadre théorique pour raisonner la fertilisation phosphatée biologique.

Pour quantifier la dynamique du transfert des ions phosphates entre les deux phases du sol en suspension, deux approches expérimentales seront adoptées : les expériences de sorption-désorption quantifiant le transfert net des ions phosphates et les études faisant appel à l'utilisation du traçage isotopique des ions phosphates dissous et à l'analyse de leur dilution isotopique pour quantifier les deux flux inverses des ions phosphates transférés. Selon les expériences qui ont été déjà menées dans le cas des sols cultivés de longue date (Morel, 2002), pour éviter le développement de toute activité microbienne tout au long de l'analyse, il faudrait utiliser de biocide (micro-protect ou toluène) dans les suspensions de sol. Par conséquent les autres principales caractéristiques physico-chimiques, comme le pH, le potentiel redox... sont supposées invariantes. Le transfert des ions phosphates à l'interface solide-solution associé à ces différents mécanismes (minéralisation de composés organiques contenant du phosphate, variation de pH ou de potentiel redox) est donc considéré comme négligeable. Ces deux approches quantifient alors le passage des ions entre les deux phases sous le seul contrôle d'un processus physico-chimique qui est la diffusion.

Ces méthodes ont été déjà utilisées par plusieurs chercheurs dans différentes études (Pypers et *al.*, 2006 ; Morel et Planchette 1994 ; Fardeau, 1993 ; Larsen, 1952) pour étudier la biodisponibilité de P dans le sol.

Pour le cas des sols ferrallitiques de Madagascar, nous avons déjà commencé à modéliser cette biodisponibilité de phosphore avec les différents systèmes de culture (SCV et labour avec des céréales) et avec une fertilisation minérale. Mais cette fois-ci, après cette expérimentation avec des engrais phosphatés biologiques, nous allons essayer de modéliser cette biodisponibilité de phosphore tout en gardant les variables considérées (types d'engrais phosphatés biologiques et doses d'engrais) pour respecter notre objectif (produire plus en respectant l'environnement).

Pour la réalisation de cette recherche, toujours en partenariat avec l'Université de Turin, des expérimentations seront menées dans les sols ferrallitiques d'Anevoka et des analyses au laboratoire seront réalisées au LRI et surtout pour l'utilisation des P³² sur la dilution isotopique. Le paramétrage du modèle sera réalisé avec l'équipe de l'INRA Bordeaux.

CONCLUSION GENERALE

Les résultats présentés dans ce mémoire montrent bien que les ions phosphates dans la solution du sol jouent un rôle très important non seulement dans le fonctionnement du cycle de phosphore dans un système cultivé, mais surtout ils déterminent les rendements des cultures. La concentration de ces ions phosphates dans la solution du sol dépend de plusieurs facteurs, notamment les types de sol et les pratiques culturales.

Ainsi, au-delà de leurs effets positifs sur les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol, les systèmes SCV avec ses matières organiques apportées, sont aussi des systèmes améliorant la disponibilité de phosphore par l'augmentation des ions phosphates dans la solution du sol. Toutefois, à Madagascar, leur diffusion reste limitée (seulement environ 5000 ha en 2008/2009). Depuis 2003, d'autres systèmes SCV basés sur des associations et rotations de culture utilisant des plantes à forte productivité de biomasse, notamment le stylosanthes, ont été mis en place afin de restaurer les sols de tanety les moins fertiles. Ces systèmes semblent être plus faciles à réaliser d'où leur adoption plus grande par les paysans.

Mais les systèmes SCV ne sont pas les seuls à pouvoir être améliorants l'augmentation des ions phosphates dans la solution du sol, l'apport de dolomie et des engrais minéraux phosphatés dans le traitement F2 sont aussi jugés comme des facteurs influençant l'augmentation de cette concentration. La dolomie a évidemment eu un effet sur le pH du sol qui a modifié la propriété chimique du sol en agissant sur les autres éléments chimiques comme l'aluminium en faveur des ions phosphates.

Ainsi, l'augmentation des productions agricoles pourrait être envisagée en adoptant ces systèmes de culture SCV avec un apport raisonné des engrais minéraux et des amendements calciques. Cette alternative peut être donc considérée comme une des solutions pour un développement durable car non seulement elle augmente la production mais aussi elle protège l'environnement surtout le sol contre l'érosion. Mais il faut pouvoir les développer sur de larges superficies. Pour l'appropriation de ces systèmes par le petit paysanat malgache, il y aura donc nécessité, dans un avenir proche, de rechercher les blocages socio-économiques qui semblent bloquer actuellement la diffusion de ces systèmes, alors qu'ils se montrent performants sur le plan agro-environnemental.

Toujours dans ce sens d'augmentation de la production agricole et de la protection de l'environnement; nous avons pu constater que les engrais biologiques phosphatés (Guanotsar, Guanobarren, et compost de déchet urbain de la décharge) pourraient également augmenter le rendement des cultures.

Nos essais sur les deux engrais biologiques, le Guanotsar à la dose $200\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ donne le meilleur rendement. Toutefois, le Guanobarren donne aussi de rendement important sauf à dose élevée ($600\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). On en déduit alors que les engrais phosphatés biologiques quelle que soit la forme pourrait améliorer la production surtout pour la culture légumière.

Pour conclure, l'apport d'engrais phosphatés biologiques permet l'amélioration du rendement. Pourtant, il n'a pas encore été possible de déterminer avec précision la dose

optimale d'apport correspondant à un maximum de rendement parce que les rendements obtenus n'atteignent même pas le rendement normal qu'on doit avoir pour la culture légumière, à cause du taux de germination qui n'est pas très fort et de l'attaque de la maladie. Aussi, la grille de fertilisation efficace ne peut pas être avancée par cette expérimentation. Toutefois, on peut affirmer que ces deux engrais biologiques améliorent le rendement et l'efficacité de chaque type d'engrais dépend de plusieurs facteurs comme l'espèce cultivée (légumineuse, graminée), le type de sol, les conditions climatiques.

Cette recherche peut être continuée plus loin en testant plusieurs doses et sur des cultures céréalières qui sont les plus pratiquées à Madagascar.

Pour la réalisation de cette recherche, nous comptons impliquer des thésards qui seront accompagnés par des étudiants en Master.

Ainsi, les résultats seront valorisés non seulement pour les techniciens et les paysans et aussi pour améliorer notre cours en classe.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Afnor**, 1999. Recueil de normes françaises. Qualité de sols : protocole d'évaluation d'une méthode alternative d'analyse physico-chimique quantitative par rapport à une méthode de référence. Afnor, Paris La défense, France.
- **Andriamaniraka 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, 186 pages.
- **Andriamaniraka H., Rabeharisoa L., Michellon R., Moussa N. et Morel C.** 2010. Influence de différents systèmes de culture sur la productivité de sols cultivés des Hautes Terres de Madagascar et conséquences pour le bilan de phosphore. Etude et Gestion des Sols, Volume 17, 2, 2010, pages 115 à 126.
- **Andriamaniraka H., Andriampenomanana S. V., Falinirina M. V., Rasoamanana A.**, 2013. Détermination d'une dose efficiente de l'engrais biologique phosphaté Guanotsar pour une meilleure productivité dans la culture de concombre. 11èmes Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse au Palais des Congrès du Futuroscope à Poitiers, 20 et 21 novembre 2013, Poitiers, France
- **Andriamaniraka H., Andriampenomanana S. V., Falinirina M. V., Nasolonjanahary T. H.**, 2014. Comparaison d'effets des différents types d'engrais biologiques phosphates sur une culture légumière pratiquée sur un sol ferrallitique. Journées d'Étude des Sols (JES) 2014, 01 au 03 juillet 2014, Chambéry, France.
- **Andriamaniraka H., Rakotoson T., Rasoamanana A., Zafindrabenja A. A., Razafindramanana N. C., Ramanankaja L., Andriampenomanana S. V., Falinirina M. V.**, 2015. Effet des engrais biologiques phosphatés sur le rendement des cultures légumières sur des sols ferrallitiques à Madagascar : concombres, oignons et petits pois. AFRIQUE SCIENCE 11(5) (2015) 306 - 316.
- **Andrianjaka A.**, 1984. Contribution à l'étude de l'efficacité des phosphorites des Iles Barren dans les sols des rizières de Madagascar Utilisation du $^{32}\text{PO}_4^{3-}$. Thèse de Doctorat de 3^{ème} Cycle, Université d'Antananarivo.
- **Andrianjaka A., Fardeau J.C. et Trobisch S.**, 1986. Efficacité des phosphorites des Iles Barren dans deux sols de rizières malgaches : Utilisation du $^{32}\text{PO}_4^{3-}$. Relation sol-plante. Série Sciences Biologiques N°3, Ministère de la Recherche Scientifique et Technologique pour le Développement, Antananarivo, 1^{er} semestre 1986, pp 83-96.
- **Andrianjaka A. et Fardeau J.C.**, 1986. Efficacité des phosphorites des Iles Barren dans deux sols de rizières malgaches : Phosphore assimilable et pouvoir fixateur du sol. Série Sciences Biologiques N°3, Ministère de la Recherche Scientifique et Technologique pour le Développement, Antananarivo, 1^{er} semestre 1986, pp 229 – 238.

- **Arrivets J.**, 1998. Réflexion sur la fertilité des sols à Madagascar. CIRAD-CA Programme Cultures Alimentaires D'après aide mémoire d'une mission effectuée pour le Centre d'investissement de la FAO.
- **Arousseau P., Dorioz J.M., Bourrié G.**, 2007. Le phosphore dans l'environnement : bilan des connaissances sur les impacts, les transferts et la gestion environnementale, édition Institut océanographique février 2009. OCEANIS vol 33 – 1/2.
- **Balesdent J.**, 1996. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. Etudes et Gestion des sols.
- **Balbino LC., Brossard M., Leprun JC et Bruand A.**, 2002. Mise en valeur des sols ferrallitiques de la région du Cerrado (Brésil) et évolution de leurs propriétés physiques. Étude et Gestion des Sols, Volume 9, pages 83-104.
- **Balesdent J.** 1997. Un point sur les matières organiques des sols. Numéro spécial "Le sol, un patrimoine à préserver". Chambres d'Agriculture, supplément au n° 856, juin 1997, 17-22
- **Bazoumana K., Ouola T., Héhou D., et Prosper N. Z.** 2009. Effet des amendements locaux sur les rendements, les indices de nutrition et les bilans culturaux dans un système de rotation coton maïs dans l'Ouest de Burkina Faso. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 13, 103-111.
- **Bolan NS.** 1991. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. *Plant and Soil* 134, 189-207.
- **Broadbent F.E.**, 1986 – « Effects of organic matter on nitrogen and phosphorus supply to plants ». In : Chen Y., Avnimelech Y. (eds) : The role of organic matter in modern agriculture ; Developments in plant and soil sciences. Dordrecht, Martinus Nijhoff Publishers : 13-27.
- **Brossard M., Fardeau J.C., Monteau J.P., Laurent J.Y.**, 1988 - Matière organique et mobilité du phosphore dans quelques types de sols. In : Feller C. (éd.) : *Fertilité des sols dans les agricultures paysannes caribéennes : effet des restitutions organiques : rapport final*. Projet TSDA 0178F, ORSTOM Martinique : 69-84.
- **Brossard M., Mench M., Clairon M., Laurent J.Y., Nagou D., Louri J.**, 1991 - Évolution à court terme de formes du phosphore d'un sol ferrallitique après apports d'une boue urbaine. *Agronomie*, 11 (8) : 699-706.
- **Bühler S., Oberson A., Sinaj S., Friessen DK. & Frossard E.**, 2003. Isotope methods for assessing plant available phosphorus in acid tropical soils. *Europ. Journal of Soil Science*. 54, 605-616.
- **Cabidoche Y.M.**, 2001 - Impact des pratiques culturales sur l'état et les propriétés des sols des Petites Antilles. CARREN 2001, Valorisation des ressources naturelles renouvelables dans l'arc caraïbe insulaire au XXIe siècle, Guadeloupe, 3-7 décembre 2001.

- **Cobelli C., Foster D. & Toffolo G.**, 2000. Tracer kinetics in biomedical research. From data to model. Kluwer Academic, New York.
- **Cobelli C., Foster D. & Toffolo G.**, 2000. Tracer kinetics in biomedical research. From data to model. Kluwer Academic, New York.
- **CPCS**, 1967 - Classification des sols, Commission de Pédologie et de Cartographie des sols. Document ronéoté, 96p.
- **Dabin B.**, 1967. Application des dosages automatiques à l'analyse des sols. 3è partie, Cah. ORSTOM, sér. Pédologie, vol. 3, 257-286.
- **Dabin B.**, 1967. Application des dosages automatiques à l'analyse des sols. 3è partie, Cah. ORSTOM, sér. Pédologie, vol. 3, 257-286.
- **Dridi B. et Toumi C.** 1999. Influence d'amendements organiques et d'apport de boue sur les propriétés d'un sol cultivé. Etude et. Gestion des Sols 6, 7-14.
- **Duval L.**, 1963. Etude des conditions de validité du dosage céruléomolybdique de l'acide phosphorique. Conséquences pratiques. Chimie Analytique 45 :237 :249.
- **Espiau P.**, 1994. Le complexe adsorbant, chap. XX, 489-510, in Duchaufour et Souchier éd., Pédologie, 2, constituants et propriétés du sol, Masson, Paris.
- **Falinirina M.V.** 2010. Valorisation en agriculture des apports organiques contenus dans les déchets urbains : qualité des matières organiques et services écosystémiques. Thèse de doctorat.
- **FAO**, 2004. « Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable », bulletin FAO Engrais et nutrition végétale, 13 pages.
- **FAO**, 2007. « La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture », 259 pages
- **Fardeau J.C. et Marini P.**, 1969. Détermination par échange isotopique en retour du compartiment des ions phosphates les plus mobiles du sol. C.R. Acad. Sc., Paris 267D, pp 427 - 430.
- **Fardeau J.C. et Guiraud G.**, 1972. Phosphore assimilable du sol et des engrais déterminé par la méthode de dilution isotopique. Phosphore et Agriculture, Paris, 60, pp23 – 29.
- **Fardeau J.C.**, 1981. Cinétique de dilution isotopique et phosphore assimilable des sols. Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Pierre et marie Curie, Paris, 1981
- **Fardeau J.C., Morel C. et Boniface, R.**,1988 b. Pourquoi choisir la méthode Olsen pour estimer le phosphore "assimilable" des sols? Agronomie 8, 13-21.
- **Fardeau J.C., Morel C. et Boniface, R.**, 1991. Cinétiques de transfert des ions phosphates du sol vers la solution du sol: paramètres caractéristiques. Agronomie 11, 787-797.
- **Fardeau J.C. et Frossard E.** 1992. Processus de transformation du phosphore dans les sols de l'Afrique de l'Ouest semi-aride : application au phosphore assimilable. Dans : Phosphorus

- Cycles IN terrestrial and Aquatic Ecosystems of Semi- Arid Africa, pages 108-128. SCOPE/UNEP proceedings.
- **Fardeau JC.**, 1993. Le phosphore biodisponible des sols: sa représentation par un modèle fonctionnel à plusieurs compartiments. *Agronomie* 13, 317-331.
 - **Fardeau JC. et Conesa AP.**, 1994. Le phosphore., chap. XXVI, pp 557-568 in Bonneau M et Souchier B, *Pédologie*, 2, constituants et propriétés du sol, Masson, Paris.
 - **Fardeau JC., Guiraud, G. and Marol C.**, 1996. The role of isotopic techniques on the evaluation of the agronomic effectiveness of P fertilizers. *Fertilizer Research* 45, 101-109.
 - **Fardeau JC., Dorioz JM.**, 2001. La dynamique du phosphore dans les zones humides. In : Fustec E et Lefeuvre JC (eds). *Fonctions et valeurs des zones humides*. pp 143-459. Dunod. Paris.
 - **Friessen DK., Rao IM., Thomas RJ., Oberson A. Sanz JI.**, 1997. Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture systems in low fertility tropical soils. *Plant Soil* 196:289-294.
 - **Frossard E., Truong B. et Jacquin F.** 1986. Influence de l'apport de composés organiques sur l'adsorption et de la désorption des ions phosphates en sol ferrallitique ; *Agronomie*, 6 : 503-508.
 - **Frossard E. & Sinaj S.**, 1997. The isotope exchange kinetic technique: a method to describe the availability of inorganic nutrients. Applications to K, PO₄, SO₄ and Zn. *Isotopes Environ. Health Stud.* 33, 61-77.
 - **Frossard E., Julien P., Neyroud J.A., et Sinaj S.** 2004. Le phosphore dans les sols, les engrais, les cultures et l'environnement : Etat de la situation en Suisse. *Cahier de l'environnement N° 368. Sol*. Publié par l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEP) Berne.
 - **Gascho G. et Parker M.** 2001. Long term liming effects on Coastal Plain soils and crops. *Agron. J* 93, 1305-1315.
 - **Gérard E.**, 1999. Caractérisation du cadmium phytodisponible par des methods isotopiques. Thèse doct. INPL. Sci. Agro. 153p.
 - **GERP** 2008. Préservation de la biodiversité de Maromizaha, 109 pages.
 - **Grant C., Bittman S., Montreal M., Plenchette C., Morel C.** 2005. "Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development"- *Can. J. Plant Sci.* 85: 3-14- 12pages.
 - **GUANOMAD**, 2010. Fiche technique de l'engrais biologique Guanotsar, Guanobarren.
 - **Hinsinger P., Schneider A., Dufey JY.**, 2004. Le sol: ressource en nutriments et biodisponibilité. In: Giard, M.C., Walter, C., Rémy, J.C, Borthelin, J., Morel, J.C. (eds). *Sols et Environnement. Sciences Supérieures Dunod*, Paris pp. 285 – 305.

- **Hocking JP., Randall PJ., Delhaize E., Keerthisinghe G.** 1999. The role of organic acids exuded from roots in phosphorus nutrition. In Management and conservation of tropical acid soils for sustainable crop production. Proceedings of a consultants meeting organized by the Joint FAO/IAEA Division of nuclear Techniques in Food and Agriculture and held in Vienna, 1-3 March 1999; 61-70.
- **Husson, O., Séguy L., Michellon R. and Boulakia S.,** 2006. Restoration of acid soil systems through agroecological management. Pp. 343-356. In : Biological approaches to sustainable soil systems. Ed. N. Uphoff et al. CRC Taylor & Francis.
- **Innocent K. B., Adrien C., Espoir M. B., Cizungu J. M., Trésor M. A., Pascal M. M. et Mwapu I.** 2013. Effet de l'engrais « CETEP » sur le rendement des cultures de haricot nain dans le Sud-Kivu . *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne],. URL : <http://vertigo.revues.org/13914> ; DOI : 10.4000/vertigo.13914.
- **John MK.,** 1970. Colorimetric determination of phosphorus in soil and plant materials with ascorbic acid. *Soil Science*. 109 : 214-220
- **Larsen S.,** 1952. The use of ³²P in studies on the uptake of phosphorus by plants. *Plant Soil* 4, 1–10.
- **Martin E. et Morel C.,** 2002. Détermination du flux brut des ions phosphates transférés entre le sol et la solution : évaluation par la méthode de traçage des ions P en solution et de l'analyse de leur dilution isotopique dans une suspension de sol à l'état stationnaire et par le dosage des ions P en solution. Protocole d'analyse au laboratoire (Document interne : communication personnelle).
- **Masson P., Morel, C., Martin, E., Oberson, A. and Friesen, D.** 2001. Comparison of soluble P in soil water extracts determined by ion chromatography, colorimetric, and inductively coupled plasma techniques in ppb range. *Commun. Soil Science. Plant ana.*, 32 (13&14) : 2241-2253.
- **Mathieu C. et Pieltain F.,** 2003. *Analyse chimique des sols : méthodes choisies*, éd. TEC et DOC Lavoisier Paris. 387p.
- **Michellon R., Razanaparany C., Moussa N., Andrianasolo H., Fara Hanitriniaina J. C., Razakamanantoanina R., Rakotovazaha L., Randrianaivo S., Rakotoniaina F.,** 2004. Rapport de campagne 2002-2003 Hautes Terres et Moyen Ouest, 98p
- **Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche (MAEP)** 2004. Lettre de Politique de Développement Rural à Madagascar.
- **Molenaar J.W., Kessler J.J. et Breman H.** 2008. L'agroforesterie dans le cadre de l'intensification agricole, IFDC catalyst. Kigali, 43 p.
- **Morel C. et Fardeau JC.,** 1987. Le phosphore assimilable des sols intertropicaux: ses relations avec le phosphore extrait par deux méthodes chimiques. *L'Agronomie Tropicale*, 42:248-257.

- **Morel, C. and Plenchette, C.**, 1994. Is the isotopically exchangeable phosphate of a loamy soil the plant – available P. *Plant and Soil*, **158**, 287 – 297.
- **Morel, C. and Plenchette, C.**, 1994. Is the isotopically exchangeable phosphate of a loamy soil the plant – available P. *Plant and Soil*, **158**, 287 – 297.
- **Morel C., Pellerin S.**, 1997. Concentration dans la solution du sol et biodisponibilité du phosphore dans les sols de quelques régions agricoles françaises. Confrontation avec les besoins des cultures. Journées AFES du 6 mars 1997, Paris, France.
- **Morel, C., Tunney, H., Plenet, D., Pellerin, S.**, 2000. Transfer of phosphate ions between soil land solution. Perspectives in soil testing. *Journal of Environmental Quality*, **29**, 50 – 59.
- **Morel C.**, 2002. Caractérisation de la phytodisponibilité du phosphore du sol par la modélisation du transfert des ions phosphates entre le sol et la solution. HDR, 80p
- **Morel C., Mollier A., Denoroy P., Plénet D.** 2011. Dynamics of organic P, C and N within the plough layer of a sandy soil continuously cropped and fertilized for 28 years. p. 235. In: “Organic matter dynamics – from soils to oceans”. Book of abstracts of the 3rd international symposium on soil organic matter (ISSOM).11-14 July 2011, Leuven, Belgium.
- **Morel C., Butler F., Castillon P., Champolivier L., Denoroy P., Duval R., Hanocq D., Kouassi A. S., Kvarnström E., Messiga A., Metraillie M., Rabeharisoa L., Rabourdin N., Raynal C., Savoie T., Sinaj S., Ziadi N.** 2011. Gestion à long terme de la dynamique du phosphore dans les sols cultivés. 10èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse, COMIFER-GEMAS, Reims, 23-24 novembre 2011.
- **Murphy, J. and J.P. Riley**, 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in *natural waters*. *Anal. Chim. Acta*, **27**: 31-36.
- **N'Dienor M.** 2006. Fertilité et gestion de la fertilisation dans les systèmes maraîchers périurbains des pays en développement : intérêts et limites de la valorisation agricole des déchets urbains dans ces systèmes, cas de l'agglomération d'Antananarivo (Madagascar). Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris.
- **Oberson A., Friesen D.K., Tiessen H., Morel C., Stahel W.**, 1999. Phosphorus status and cycling in native savanna and improved pastures on an acid low-P Colombian Oxisol. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, **55** :77-88.
- **Owusu-Bennoah E., Fardeau J.C. & Zapata F.**, 2000. Evaluation of bioavailable phosphorus in some acid soils of Ghana using ³²p isotopic exchange method. *Ghana Journal of Agricultural Science*, Vol. 33, No. 2.
- **Parent L.E. et Khiari L.** 2003. «Nitrogen and phosphorus indicators of organic soil quality” *Organic soils and peat materials for sustainable agriculture*.
- **Parent L.E., Pellerin A. et Khiari L.** 2002. Le flux et la dynamique du phosphore dans les sols agricoles québécois : Colloque sur le phosphore nov. 2002, 27p.

- **Pypers P., Van Loon L., Diels J., Abaidoo R., Smolders E. & Merckx R., 2006.** Plant-available P for maize and cowpea in P-deficient soils from the Nigerian Northern Guinea savanna – Comparison of E- and L-values. *Plant and Soil* 283 : 251–264.
- **Rabeharisoa L., 1985.** Etude de l'influence de l'aluminium échangeable sur la dynamique du phosphore et son assimilation par le blé dans un sol ferrallitique de la région d'Ambohimandroso. Utilisation du $^{32}\text{PO}_4^{---}$. DEA de Sciences biologiques appliquées. Option Physiologie végétale appliquée à l'agronomie, 59 p.
- **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 de l'Université d'Antananarivo, Spécialité : science du sol. 202p.
- **Rakotoson T., 2009.** Effets de l'utilisation du fumier de ferme et du superphosphate triple sur la fertilité phosphatée des sols ferrallitiques sous culture de riz pluvial. Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
- **Randriantsoa M., 2001.** Rôle de la matière organique dans la fertilité phosphorique d'un sol ferrallitique des hautes terres malgaches. DEA de l'Ecole Nationale Agronomique de Lorraine France.
- **Rasoloniaina M., 2005.** – Caractérisation des impacts de différents systèmes de culture en semis direct sur couverture végétale sur la réduction de ruissellements et érosions. Mémoire d'ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, 49p.
- **Ratsimbazafy J.R., 1977.** Quelques données techniques sur les gisements de phosphorites des îles Barren. Service des Mines et de Géologie, Tananarive, A.242.
- **Razafimbelo T., 2005.** Stockage et protection du carbone dans un sol ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des hautes terres malgaches, 123p.
- **Riquier 1966.** Définition et classification des sols ferrallitiques de Madagascar. . Cah. O.R.S.T.O.M. Série Pédologie, IV : 75-90
- **Roche P., 1983.** Les méthodes d'appréciation du statut phosphorique des sols. Leur application à l'estimation des besoins en engrais phosphatés. In : *IMPHOS Proceedings of the 3rd International Congress on Phosphorus Compounds*. Casablanca (Morocco) : 165-93.
- **Roederer P., 1971.** *Les sols de Madagascar*, Sciences de la terre, Pédologie, 5, ORSTOM, Paris ,56 p.
- **Schneider A., Mollier A., Morel C., 2003.** Modelling the kinetics of the solution phosphate concentration during sorption and desorption experiment. *Soil Science*, **168** (9), 627 – 636.
- **Séguy L., S. Bouzinac S. and O. Husson, 2006.** Direct-seeded tropical soil systems with permanent soil cover. Pp. 323-342. In: *Biological approaches to sustainable soil systems*. Ed. N. Uphoff et al. CRC Taylor & Francis.

- **Silva MLN., Freitas PL., Blancaneau P., Curi N., Lima JM.**, 1997 - Relação entre parâmetros da chuva e perdas de solo e determinação da erodibilidade de um Latossolo Vermelho-escuro em Goiânia (GO). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 21, 131-137.
- **Van Veldhoven PP. and Manaerts GP.**, 1987. Inorganic and organic phosphate measurements in the nanomolar range. *Analytical Biochemistry* 161 : 45-48.
- **Vanden B.**, 1999. Devenir du phosphore apporté sur les sols et risques de contamination des eaux de surface. Cas des boues de stations d'épuration. Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes 1, n° d'ordre 2263. 282p.
- **Withers P.J.A., Barbro U., Stamm C. et Bechmann M.** 2003. Incidental phosphorus losses - Are they significant and can they be predicted? *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166: 459-68.
- **Yemefack M., Nounamo L., Njomgang R** 2004. Influence des pratiques agricoles sur la teneur en argile et autres propriétés agronomiques d'un sol ferrallitique au sud du Cameroun. *Tropicultura* 22 3-10
- **Zebrowski C. et Ratsimbazafy C.**, 1979 - Carte pédologique de Madagascar au 1/100000. Feuille Antsirabe. Paris, Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.
- **Ziadi N., Messiga A. J., Morel C., Lalande R., Tremblay G.** 2011. Disponibilité du phosphore dans les sols de grandes cultures: état des connaissances au Québec. pp. 10-11. In: Journée d'information scientifique des Grandes cultures : Ensemble pour la diffusion de la recherche agronomique. Cahier des conférences. 17 février 2011 à Drummondville (Québec).

DOCUMENT 3 : PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES

I. PUBLICATIONS DANS DES REVUES A COMITE DE LECTURE

1.1. Rabeharisoa L., Randriamanantsoa L., ANDRIAMANIRAKA H., Morel C., 2009. Use of ^{32}P to calibrate and simulate dynamics of plant-available phosphorus in cultivated Malagasy soils. Soils Newsletter, Vol. 32, N°1, July 2009 : 05-07.

Use of ^{32}P to calibrate and simulate dynamics of plant-available phosphorus in cultivated Malagasy soils

Rabeharisoa L.¹, Randriamanantsoa L.¹, **Andriamaniraka H.**², Morel C.³

¹ Laboratoire des Radio Isotopes, Service de la Radioagronomie, BP 3383, Route d'Andraisoro, 101 Antananarivo, Madagascar

² Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Agriculture, BP 175 Ankatso 101 Antananarivo, Madagascar

³ UMR 1220 INRA TCEM (Transfert sol-plante et Cycle des Eléments Minéraux dans les écosystèmes cultivés), BP 81, 33883 Villenave-d'Ornon cedex, France

The IAEA technical cooperation project MAG5015 'Optimization of phosphate fertilization of Ferralsols in the Highland Areas of Madagascar' was initiated in 2004 with the objective to enhance food security of small landholders in the "Tanety" (upland in Malagasy) areas of Madagascar by increasing crop productivity through appropriate management of soil and nutrients inputs in rainfed cropping systems and to build national capacity in the use of nuclear and related techniques. The project focuses mainly on the improvement of P availability in Malagasy cropping systems through a better understanding of the phosphorus cycle in the soil.

Challenge

In Madagascar, with a population having crossed the 20 Millions mark, the increasing need for food requires finding new surfaces for cultivation. "Tanety" soils cover about 30 % of the potential agricultural areas (about 3 Mha) but are infertile because of chemical constraints (acidity, aluminium toxicity and low contents of plantavailable nutrients) often encountered in Ferralsols. Especially, Ferralsols have high contents of Fe- and Al oxyhydroxides and therefore are characterised by a high ability to react with ionic phosphate species (Pi) leading to an extremely low Pi concentration in solution, available for the crops.

As a consequence, improving phosphorus availability is a prerequisite to raise production and productivity of the Malagasy agriculture and to improve food security during the next decades. In addition, mineral P fertilizers are a non-renewable and expensive resource for farmers and must be used with efficiency. So, the question of P, as a limiting factor for crop production, has to be addressed. The IAEA technical cooperation project MAG5015 therefore aims at analyzing how to improve P cycling in Malagasy cropping systems.

The study

The study was based on a long-term field experiment of the Non-Governmental Organization Land and Development “TAFa”, initiated in 1992 in the Central Highlands of Madagascar (19°47’S; 47°06’E). The region elevation is about 1600 m a.s.l. with a typical upland tropical climate. Two cropping systems (with three replicates) were screened year after year. One treatment was based on no-till (NT+r) (Photo 1) with crop residues retained forming a mulch and direct seeding; the other treatment was conventional tillage (CT-r) (Photo 2) with crop residues removed as fodder for cattle (i.e. the traditional tillage practice in the Highlands of Madagascar). The succession was a two-year rotation consisting of maize (*Zea mays* L.) (Photo 3) and soybean (*Glycine max* L.) (Photo 4). In both systems, manure (5 t ha⁻¹ year⁻¹), mineral NPK fertilizers (100 kg N, 42 kg K and 30 kg P ha⁻¹) and lime (500 kg ha⁻¹) were applied at the same rate every year. Dry matter of yields and crop residues and their P contents were determined to calculate annual P balances. After 12 years of experimentation, samples were taken up from the 0-20 cm layer of soil, air-dried, sieved (<2mm), and stored before analysis. The plant-available soil P has been assessed using a processes-oriented approach which consists of determining both the concentration of Pi in solution (CP, mg P l⁻¹) and dynamics of diffusive Pi (Pr, mg P kg⁻¹) at the solid-to-solution interface as a function of both CP and time. Its calibration was obtained in batch studies by coupling sorption experiments with subsequent ³²Pi labelling of Pi in solution and isotopic dilution kinetics.

Preliminary findings

Cumulated yields for 12 years of experimentation were almost twice under NT+r (36.6 t ha⁻¹) as compared with CT-r (19.7 t ha⁻¹). However, despite the large difference in crop yield, the cumulative P balance was significantly but only slightly lower for NT+r (+329 kg P ha⁻¹) than for CT-r (+353 kg P ha⁻¹) in which crop residues were exported.

The average concentration of Pi in solution (CP values) was significantly lower in CT-r (0.013 mg P l⁻¹) than in NT+r (0.024 mg P l⁻¹). This result is consistent with significant modifications observed in diffusive Pi dynamics at the solid-to-solution interface of soil. A decrease in rapid reactions rates and an increase in slow reactions rates for the NT+r treatment. These changes were mainly related to variations in pH and organic C content between treatments. Organic C content significantly increased in the NT+r treatment from 2.1 to 2.6% and pH from 4.77 to 4.95. As a consequence, plant-available soil P, i.e. the sum of ionic P in solution and diffusive P ions from soil, was 14 mg P kg⁻¹ for CT-r and 63 mg P kg⁻¹ for NT+r considering a functioning period of one day.

The returns of crop residues in NT+r treatment increased not only plant-available P but also organic carbon, organic nitrogen, and exchangeable calcium, potassium, and magnesium, as compared with the CT-r treatment. The no-till based cropping systems with P inputs seems to be a promising strategy for improving both P cycling through the agro ecosystems and soil P availability.

Impact

The expected outcome of the MAG5015 project is to better understand plant-available soil P dynamics in order to improve agricultural practices in Malagasy soils, particularly under on-farm conditions of no-tillage cropping systems. The project team is involved with research teams from all over the world (Belgium, Brazil, Burkina Faso, France, Madagascar, Martinique, Senegal, Switzerland) to study for instance the impact of soil pH on the availability of phosphorus, to assess how appropriate irrigation management can help to overcome phosphate deficiency or to better understand the role of organic phosphorus for plant nutrition in the Ferralsols of Madagascar.

1.2. ANDRIAMANIRAKA H., Rabeharisoa L., Michellon R., Moussa N., Morel C., 2010. Influence de différents systèmes de culture sur la productivité de sols cultivés des Hautes Terres de Madagascar et conséquences pour le bilan de phosphore. Etude et Gestion des Sols, 17, 2, 2010.

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

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

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

Résumé

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

Mots clés

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

Summary

Influence of various cropping systems on the productivity of cultivated soils of the Highlands of Madagascar and the effects on the phosphorus balance

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

Key-words

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

Resumen

Influencia de diferentes sistemas de cultivo sobre la productividad de suelos cultivados en las altas tierras de Madagascar y consecuencias para el balance del fosforo

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

Palabras clave

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

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

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

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

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

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

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

Matériels et méthodes

Présentation du dispositif expérimental

Ce dispositif, situé dans les Hautes Terres de Madagascar, a été mis en place et suivi par l'ONG « Tany sy Fampandrosoana » (TAFE) avec l'appui du CIRAD depuis 1991. Il a fait récemment l'objet d'études sur le rôle du système de cultures sur le stockage de carbone, C, dans le sol (Razafimbelo, 2005). Le choix du dispositif et des traitements s'est donc tout naturellement imposé afin de bénéficier des informations déjà acquises. Les parcelles expérimentales étudiées appartiennent au dispositif d'Andranomanelatra situé dans la région d'Antsirabe, au cœur des Hautes Terres malgaches, à une altitude d'environ 1 600 m. Le climat y est de type tropical d'altitude humide et se caractérise par deux saisons distinctes : une saison sèche et fraîche de mai à septembre et une saison pluvieuse et chaude d'octobre à avril. La température moyenne annuelle est de 16 °C. La pluviosité annuelle moyenne est d'environ 1 400 mm mais peut varier de 1 200 à 2 400 mm en fonction de l'altitude (Michellon *et al.*, 2004).

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

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

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

Les quatre systèmes de cultures

Ces systèmes de culture se différencient essentiellement par :

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

- Le labour est réalisé avec une bêche (angady) sur une profondeur de 20 à 25 cm. Avant le labour, les résidus de récolte sont coupés et exportés hors de la parcelle. Le sarclage après semis ou en cours du cycle se fait manuellement.

- Le système SCV est conduit avec une couverture morte ; le sol est recouvert par des résidus de récolte qui sont restitués sur la parcelle chaque année après la récolte. Le sol n'est jamais travaillé et le semis est effectué directement dans la couverture après ouverture d'un simple trou. Avant semis et pendant le cycle de la culture on utilise un herbicide (gramoxone de 1,5 à 2 L ha⁻¹) pour lutter contre les adventices.

- Le traitement F1 consiste en un apport annuel 5 t ha⁻¹ de fumier de bovin et correspond à une pratique courante et recommandée en milieu paysan.

- Le traitement F2 consiste en un apport annuel 5 t ha⁻¹ de fumier de bovin plus une fertilisation minérale NPK et un amendement calcique sous forme de dolomie à raison de 500 kg ha⁻¹. Les quantités annuelles apportées sont signifiées au *tableau 2*.

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

Rendements des cultures

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

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

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

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

Détermination de la teneur du P dans les parties récoltées

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

Calcul du bilan de P

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

Bilan de P =

Quantité totale de P apportée - Quantité totale de P exportée

Analyses statistiques des données

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

Résultats

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

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

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

		Lb_F1	Lb_F2	SCV_F1	SCV_F2
pH					
pH Eau sol	-	4.52	5.10	4.86	5.34
pH KCl N	-	4.20	4.48	4.23	4.58
Granulométrie					
Argile (< 2 µm)	g kg ⁻¹	535	458	607	582
Limons fins (2-20 µm)	g kg ⁻¹	223	245	187	224
Limons grossiers (20-50 µm)	g kg ⁻¹	65	100	57	49
Sables fins (50-200 µm)	g kg ⁻¹	88	85	60	53
Sables grossiers (200-2 000 µm)	g kg ⁻¹	89	112	89	92
Carbone (C) Organique-Azote (N) Total du sol					
Carbone (C) organique	g kg ⁻¹	31.3	31.1	39.7	37.8
Azote (N) total	g kg ⁻¹	2.22	2.27	2.92	2.8
C/N	-	14.1	13.7	13.6	13.5
Matière organique	g kg ⁻¹	54.1	53.8	68.6	65.4
CEC, Proton (H+) Cobaltihexamine					
CEC cobaltihexamine	cmol kg ⁻¹	4.24	4.88	5.49	6.18
Protons (H+)	cmol kg ⁻¹	0.48	0.48	0.52	0.40
Ca, Mg, Na, K, Fe, Min, Al à la Cobaltihexamine					
Calcium (Ca)	cmol kg ⁻¹	0.32	1.50	1.33	3.20
Magnésium (Mg)	cmol kg ⁻¹	0.13	1.03	0.63	2.01
Sodium (Na)	cmol kg ⁻¹	0.011	0.009	0.017	0.014
Potassium (K)	cmol kg ⁻¹	0.099	0.206	0.242	0.415
Fer (Fe)	cmol kg ⁻¹	0.019	0.022	0.020	0.019
Manganèse (Min)	cmol kg ⁻¹	0.112	0.106	0.139	0.107
Aluminium (Al)	cmol kg ⁻¹	2.30	0.95	1.81	0.59
Si, Al, Fe TAMM en obscurité					
Silicium (Si)	g 100g ⁻¹	0.12	0.12	0.13	0.12
Aluminium (Al)	g 100g ⁻¹	1.26	1.18	1.19	1.09
Fer (Fe)	g 100g ⁻¹	0.38	0.37	0.39	0.36
Si, Al, Fe MEHRA-JACKSON					
Silicium (Si)	g 100g ⁻¹	0.13	0.12	0.14	0.13
Aluminium (Al)	g 100g ⁻¹	1.59	1.48	1.47	1.40
Fer (Fe)	g 100g ⁻¹	5.04	4.84	4.62	4.65
Phosphore (P ₂ O ₅) Total HF Sol					
Phosphore (P ₂ O ₅)	g 100g ⁻¹	0.138	0.153	0.150	0.177

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

Table 2 : Nitrogen (N), Phosphorus (P) and Kalium (K) annual inputs (in $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) of F1 and F2 fertilizer levels in the studied designs.

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

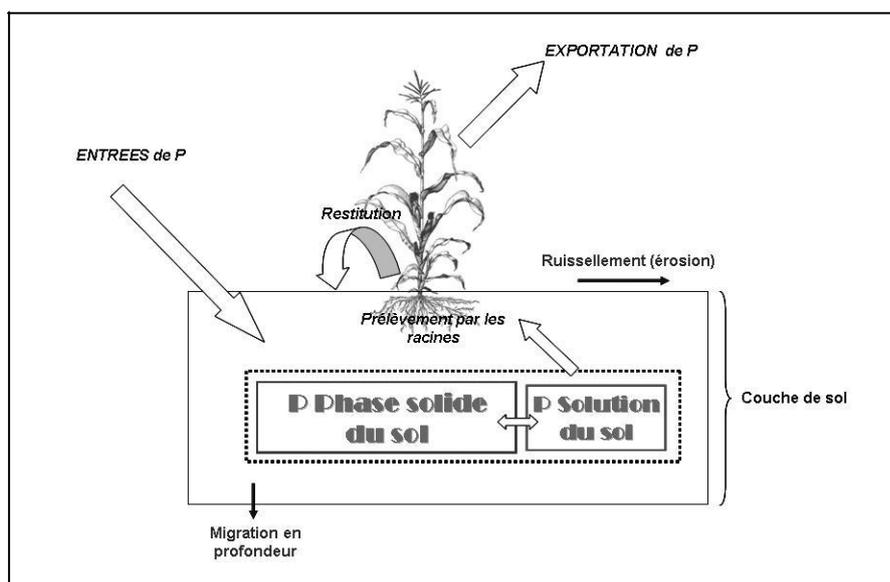
^a sur maïs, l'azote minéral a été apporté sous forme de phosphate d'ammoniaque avant le semis et de 100 kg ha^{-1} d'urée 25 j après le semis. Un apport supplémentaire de 50 kg ha^{-1} a été réalisé sur maïs 60 j après semis.

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

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

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

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



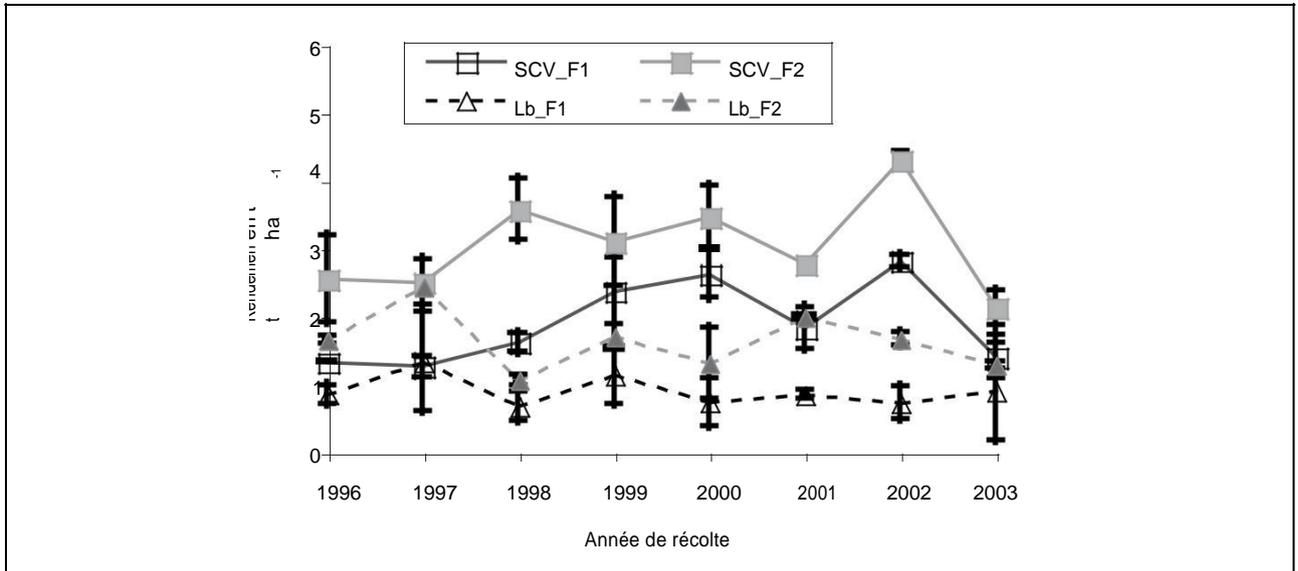
particules sont de taille inférieure à $2 \mu\text{m}$ (argiles), c'est dire que ces sols ont une texture argileuse. Le pH varie en fonction des traitements, surtout avec le niveau de fertilisation : avec le système labour, le pH est de 4,52 pour F1 et de 5,10 pour F2 ; avec le système SCV le pH est de 4,86 pour F1 et de 5,34 pour F2. Cette différence en F2 est expliquée par l'apport des dolomies à raison de $500 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. La capacité d'échange de cations (CEC) est faible et varie également selon les traitements. Elle est plus élevée avec le système SCV et F2 par rapport au système labour et F1 ($\text{Lb}_F1=4.24 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$, $\text{Lb}_F2=4.88 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$, $\text{SCV}_F1=5.49 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$ et $\text{SCV}_F2=6.18 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$). La teneur de la matière organique est significativement différente dans les deux systèmes de culture, alors qu'elle ne l'est pas avec les modes de fertilisation (5,41 % en Lb_F1 contre 6,86 % en SCV_F1 et 5,38 % en Lb_F2 contre 6,54 % en SCV_F2).

Production de biomasse (grains et résidus de récolte)

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

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

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



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

Les ions phosphates dans la solution du sol (Cp)

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

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

Teneur de P dans les grains et des résidus de récolte

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

Figure 3 : La concentration des ions phosphates dans la solution de sol (C_p , mg P L^{-1}) selon les différents traitements dans le dispositif d'Andranomanelatra.

Figure 3 : Concentration of phosphate ions in the solution of soil (C_p , mg P L^{-1}) to the different treatments in the experimental design of Andranomanelatra.

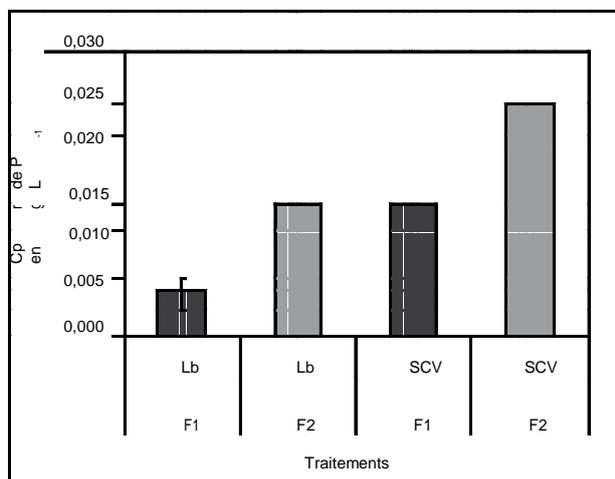


Figure 4 : Corrélation entre la concentration des ions phosphates et le rendement cumulé pendant 8 ans, Andranomanelatra.

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

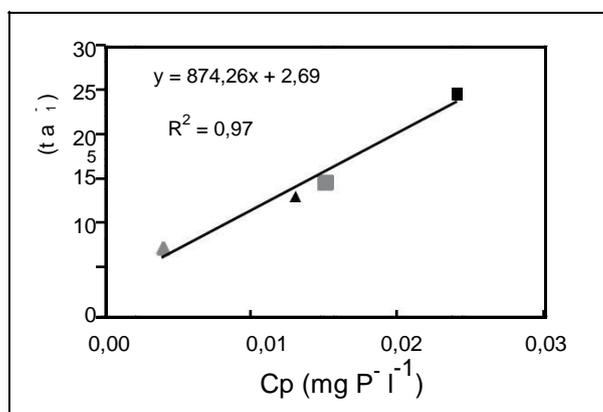


Tableau 3 : Moyennes et écart types ($n=3$) du rendement en grains et des résidus de récoltes (t ha^{-1}) pour les différents traitements. Les valeurs ont été obtenues en cumulant les quantités récoltées obtenues de 1996 à 2003.

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

	SCV_F1	SCV_F2	Lb_F1	Lb_F2
Rendement grains (t ha^{-1})	14,7 ($\pm 1,0$) b	24,7 ($\pm 1,9$) a	7,2 ($\pm 2,2$) c	13,1 ($\pm 0,7$) b
Résidus de récolte (t ha^{-1})	28,1 ($\pm 2,0$) b	47,2 ($\pm 3,0$) a	13,6 ($\pm 3,2$) c	25,0 ($\pm 1,8$) b
rendement grains par rapport Lb_F1 (%)	+104%	+243%	0%	+82%

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

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

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

Tableau 5 : Bilan annuel et cumulé sur 8 ans (kg ha^{-1}) de phosphore (P) pour les quatre traitements dans le dispositif étudié.

Table 5 : Annual balance and Cumulated balance of Phosphorus for 8 years (in kg ha^{-1}) for the four treatments in the studied designs.

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

Les flux entrants de phosphore dans la parcelle

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

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

Les flux sortants de P de la parcelle

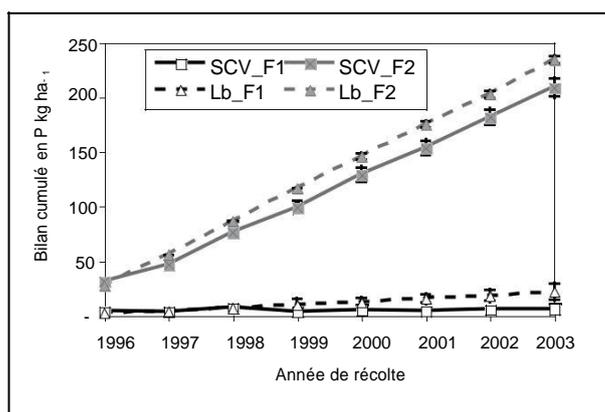
Plusieurs flux peuvent entraîner du P à l'extérieur de la parcelle (figure 1) :

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

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

Figure 5 : Bilan cumulé en P (kg ha^{-1}) dans les quatre traitements pour le site d'Andranomanelatra.

Figure 5 : Cumulated P balance (kg ha^{-1}) of the four treatments of Andranomanelatra.



Les bilans annuels et cumulés de P

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

Discussion

Sur la productivité de biomasse

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

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

Sur les flux sortants de P de la parcelle

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

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

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

Sur le bilan de P

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

Conclusion

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

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

bibliographie

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

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

1.3. ANDRIAMANIRAKA H., Rakotoson T., Rasoamanana A., Zafindrabenja A. A., Razafindramanana N. C., Ramanankaja L., Andriampenomanana S. V., Falinirina M. V., 2015. Effet des engrais biologiques phosphatés sur le rendement des cultures légumières sur des sols ferrallitiques à Madagascar : concombres, oignons et petits pois. AFRIQUE SCIENCE 11(5) (2015) 306 – 316



Effet des engrais biologiques phosphatés sur le rendement des cultures légumières sur des sols ferrallitiques à Madagascar : concombres, oignons et petits pois

Harilala ANDRIAMANIRAKA ^{1*}, Tatiana RAKOTOSON ¹, Alexandra RASOAMANANA ¹, Arthur Anatole ZAFINDRABENJA ¹, Norosoa Christine RAZAFINDRAMANANA ¹, Landiarimisa RAMANANKAJA ¹, Samoelina Vononantenaina ANDRIAMPENOMANANA ² et Marie Virginie FALINIRINA ³

¹ Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Agriculture, Université d'Antananarivo, Madagascar

² Société GUANOMAD Antananarivo, Madagascar

³ Institut Supérieur de Technologie d'Ambositra, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, Madagascar

* Correspondance, courriel : jharilala@gmail.com

Résumé

Dans le but de tester l'efficacité des engrais biologiques phosphatés dans des conditions où les sols sont acides et ont une teneur faible en phosphore, une étude a été conduite avec des cultures légumières (petit pois, concombre et oignon) sur un sol ferrallitique dans un dispositif à bloc de Fisher comportant 3 répétitions. Le site d'expérimentation est situé à Anevoka, sur la côte Est de Madagascar. Deux types d'engrais phosphatés tels que le Guanotsar (excrément de chauve-souris) et le Guanobarren (excrément d'oiseau marin de l'île Barren de Madagascar) à dose croissante 200 kg.ha⁻¹, 400 kg.ha⁻¹ et 600 kg.ha⁻¹ associés chacun avec 5 t.ha⁻¹ de compost de déchet urbain de la ville ont été comparés au témoin absolu et au témoin compost de déchet urbain. Les trois types de culture sur la parcelle témoin sans aucun apport donnent des rendements plus faibles, suivi par les cultures sur les parcelles témoin compost de déchet urbain. Les trois cultures issues des traitements d'engrais phosphatés Guanotsar et Guanobarren à dose plus faible donne des rendements plus élevés. Les rendements obtenus sont inversement proportionnels à la dose d'engrais phosphatés apportée. L'association des engrais phosphatés avec le compost de déchet urbain augmente l'activité microbienne, par conséquent, la dose significativement forte d'engrais phosphaté diminue le rendement par l'immobilisation microbienne de P de l'engrais.

Mots-clés : fertilisation phosphaté, Guanotsar, Guanobarren, rendement, dose d'apport.

Abstract

Effect of phosphate organic fertilizers on yield of vegetable crops on ferralsol of Madagascar : cucumbers, onions and peas

In order to test the effectiveness of biological phosphate fertilizer in conditions where soils are acidic and have a low rate of phosphorus, a study was conducted with vegetable crops (peas, cucumber and onion) on ferralsol, disposed in Fisher block device with 3 repetitions.

The experimental site was located in Anevoka, on the east coast of Madagascar. Two types of phosphate fertilizers such as Guanotsar (excrement of bats) and Guanobarren (marine bird excrement from the Island Barren of Madagascar) with increasing dose 200 kg.ha⁻¹, 400 kg.ha⁻¹ and 600 kg. ha⁻¹. Each of them was associated with 5 t.ha⁻¹ urban waste compost in the city and were compared to absolute control and urban waste compost witness. The three types of culture on the control plot without any input gives the lowest yield, followed by crops on the control plots with urban waste compost. The three cultures from the phosphate fertilizer treatments with Guanotsar and Guanobarren with a low dose gives the highest yield. The yields are inversely proportional to the dose of given phosphatic fertilizers. The combination of phosphate fertilizers with urban waste compost increases microbial activity, therefore, significantly high phosphate fertilizer dose reduces the yield by microbial immobilization of P fertilizer.

Keywords : *phosphate fertilization, Guanotsar, Guanobarren, performance, contribution dose.*

1. Introduction

La stratégie de réduction de la pauvreté et de l'insécurité alimentaire inscrite dans la politique nationale de développement rural vise des objectifs d'une forte croissance économique et d'une amélioration de la qualité de vie des populations. A Madagascar, le milieu rural est tout particulièrement concerné, d'une part en raison du caractère préoccupant de la pauvreté dans les campagnes, d'autre part parce que les objectifs de croissance économique et de réduction de la pauvreté ne seront pas atteints sans une relance de la production agricole [1]. Pour les petits exploitants agricoles, la couche la plus vulnérable, la culture maraîchère figure parmi les productions agricoles que l'on devrait relancer parce que les produits maraîchers sont des produits quotidiennement utiles et peuvent être bénéfiques. La culture maraîchère est une pratique très fréquente chez les malgaches tant en milieu rural qu'en milieu urbain. Souvent, elle se pratique sur le bas fond, sur la rizière en contre-saison et aussi sur les bas de pente comme dans le cas de ce présent article. Les bas de pente caractérisés par des sols ferrallitiques de « tanety » ou sols des collines présente des contraintes biophysiques et chimiques pour la production végétale (acidité, adsorption du phosphore, faible capacité d'échanges cationiques, etc...). Les techniques de gestion de la fertilité pratiquées par les agriculteurs malgache conduisent à un épuisement rapide des sols [2, 3]. Le travail de [4] a montré que le sol ferrallitique malgache riche en phosphore total (300 à 1200 mg P kg⁻¹) présente une teneur en P assimilable très faible (moins de 10 mg P kg⁻¹). Ainsi, dans le cadre de cette étude en collaboration avec le projet BIRD (Biodiversity Integration and Rural Development) qui travaille dans la protection de la zone forestière de

Maromizaha en diffusant des modèles d'agriculture innovants, plusieurs essais sur l'apport d'engrais biologique phosphaté sur les cultures maraîchères ont été effectués. L'étude de l'effet des engrais biologiques phosphatés à dose croissante sur le rendement ainsi que la détermination de la dose optimale de ces engrais constituent les objectifs de ces essais.

Face à ces réalités, la question suivante se pose : « L'apport d'engrais biologique phosphaté pourrait-il augmenter la production pour relancer la culture maraîchère ? ». Afin d'apporter des éléments de réponse à cette problématique, deux hypothèses ont été retenues :

- Hypothèse 1 : L'apport d'engrais biologique phosphaté améliore la production sur des sols ferrallitiques
- Hypothèse 2 : Le rendement en légume augmente proportionnellement avec la dose croissante des engrais

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation du site d'étude

Afin de s'approcher de la réalité paysanne, le dispositif expérimental a été installé dans des champs des paysans collaborateurs du Projet BIRD durant trois ans. La zone d'intervention du projet où l'expérimentation a été menée, se situe à Anevoka-Andasibe dans la Région Alaotra-Mangoro. Les caractéristiques agro-pédo-climatiques du milieu sont typiques du littoral Est de Madagascar, un climat tropical d'altitude avec une température moyenne annuelle de 18°C et une pluviométrie annuelle de 1779,6 mm répartie sur 207 jours. Le sol est caractéristique des milieux tropicaux humides de couleur jaune orangé à rouge [5]. Ce sol est non seulement pauvre en matière organique (12,77 %) mais acide avec un pH de 4.8 et carencé en phosphore (P total = 300 à 1200 mg P kg⁻¹, P biodisponible = inférieures à 10 mg P kg⁻¹) [4]

2-2. Les engrais biologiques testés et le matériel végétal

Le choix de fertilisant et de culture se basent sur les différentes doses préconisées par la société de distribution d'engrais biologique GUANOMAD à ses clientèles. Les engrais phosphatés testés sont le Guanotsar, engrais biologique issu de l'excrément de chauve-souris dans les grottes malgaches, et le Guanobarren, issu de l'excrément d'oiseaux marins sur l'île de Barren malgache. Chaque apport d'engrais phosphaté a été mélangé avec du compost de déchets urbains de la décharge d'Andralanitra étant donné que le dispositif est caractéristique d'un sol pauvre où la pratique successive de défriche et de culture a épuisée la matière organique et a dégradée la structure du sol. Afin de pouvoir dégager ce potentiel des engrais biologiques phosphatés, le Guanotsar et le Guanobarren à trois doses croissantes chacune (200 kg.ha⁻¹, 400 kg.ha⁻¹ et 600kg.ha⁻¹) ont été comparées avec les doses témoins qui sont le témoin absolu et le témoin compost de déchet urbain de la décharge d'Andralanitra avec un apport de 5t.ha⁻¹. Ainsi, les 8 modalités correspondent au :

- Témoin absolu (T_{abs}),
- Témoin avec apport de compost de déchet urbain (T_{compost}),
- Guanotsar à dose 200 kg.ha⁻¹(GT₂₀₀),
- Guanotsar à dose 400 kg.ha⁻¹(GT₄₀₀),
- Guanotsar à dose 600 kg.ha⁻¹(GT₆₀₀),
- Guanobarren à dose 200 kg.ha⁻¹(GM₂₀₀),
- Guanobarren à dose 400 kg.ha⁻¹(GM₄₀₀),
- Guanobarren à dose 600 kg.ha⁻¹(GM₆₀₀).

Le test de l'engrais phosphaté Guanotsar s'est fait avec les deux spéculations concombre et petit pois et l'effet du Guanobarren a été étudié avec la culture d'oignon. Chaque traitement a été réparti de façon aléatoire et répété trois fois à l'intérieur d'un dispositif en bloc. Les caractéristiques du facteur principal qui est l'engrais phosphaté sont les suivantes :

Tableau 1 : Caractéristiques des engrais utilisés

Caractéristiques	Guanotsar	Guanobarren	Compost de déchet urbain d'Andralanitra
Origine	Excrément chauve-souris dans les grottes malgaches	Excrément oiseaux marins sur l'île de Barren malgache	Ordures ménagères d'Antananarivo compostées naturellement et criblées
pH	5,5-6,1	4,5-6,1	8,2
Anhydride phosphorique (P₂O₅)	25-45%	20-35%	0,6%
Azote	5-7%	3,5-6 %	0,67%
Matière organique	30-40%	19,4%- 25,7%	24,8%
C/N	3,4	2,98- 3,2	
Oxyde de potassium (K₂O)	1,5%	0,02-0,06%	0,4%
Oxyde de calcium	31-33%	31-33%	1,95%
Oxyde de magnésium	-	-	0,15%
Biomasse microbienne		2,5.10 ³ - 1,8.10 ⁶	

Source : [6, 7]

Tableau 2 : Fertilisants et matériel végétal

Fertilisants	Guanotsar		Guanobarren
Matériel végétal	Petit pois	Concombre	Oignon
Surface élémentaire m²	6	10	2
Dose d'apport (kg.ha⁻¹)	200/400/600 (Ajouté de 5 t.ha ⁻¹ de compost de déchet urbain de la décharge d'Andralanitra)		

Les espèces maraîchères étudiées sont le petit pois et l'oignon qui sont des spéculations introduites et le concombre déjà pratiqué par une majorité de paysans.

2-3. Estimation de rendement des cultures

La détermination du rendement a été faite à chaque spéculation et la récolte à chaque culture s'est faite à l'état commercialisable. La formule adoptée est spécifique à chaque culture :

- Concombre :

$$Rdt = \frac{N_p}{m^2} \times \frac{N_f}{poquet} \times P_{mf} \times 10^{-2} \quad (1)$$

Rdt = Rendement (t.ha⁻¹), N_p : Nombre poquet, N_f : Nombre fruit, P_{mf} : Poids moyen d'un fruit (g)

- Oignon :

$$Rdt = \frac{N_b}{m^2} \times P_{mb} \times 10^{-2} \quad (2)$$

Rdt = Rendement (t.ha-1), Nb : Nombre de bulbe, Pmb : Poids moyen d'un bulbe (g)

- Petit pois :

$$Rdt = \frac{P_s \times G_p \times Gr_G}{1000} \times P_{1000} \times 10^{-2} \quad (3)$$

Rdt = Rendement (t.ha-1), Ps = Nombre de plante/unité de surface (m²), GP = Nombre de gousses/plante, GrG = Nombre de graines/gousse, P1000 = Poids de 1000 grains (g).

2-4. Analyses statistiques des données

Afin de déterminer l'effet des engrais biologiques phosphatés sur le rendement des trois cultures, l'analyse statistique des données s'est faite par l'analyse de la variance ou ANOVA des rendements obtenus entre les différentes doses suivies d'une étude comparative où chaque moyenne a été comparée entre elles. La différence entre ces moyennes de chaque traitement est significative au seuil 0,05.

3. Résultats

La réponse de la culture de concombre à dose croissante de Guanotsar est résumée dans la **Figure** suivante :

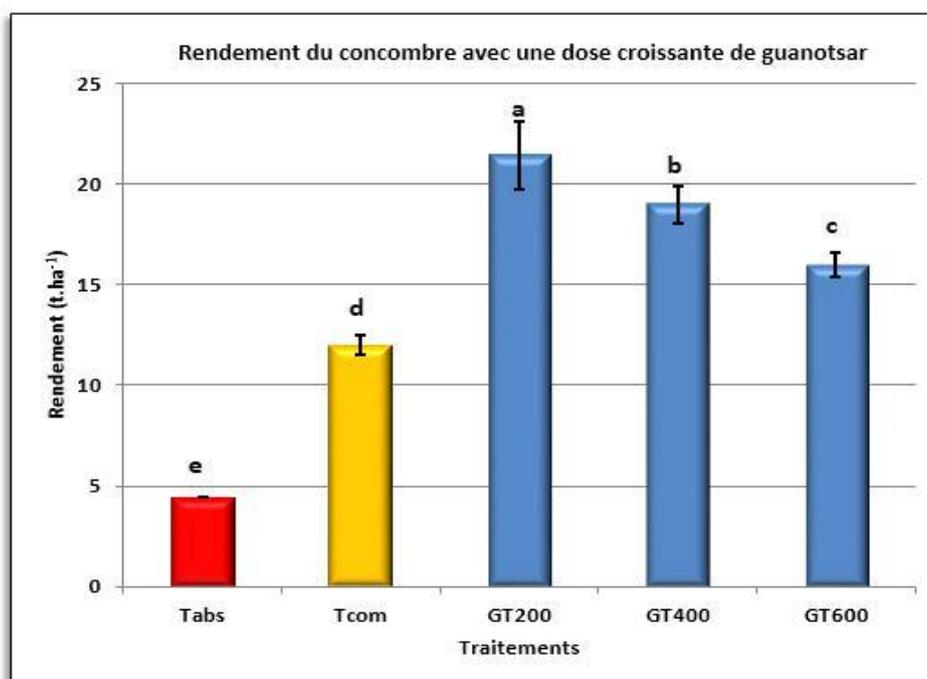


Figure 1 : Réponse de la culture du concombre au traitement Guanotsar à doses croissantes 200 kg.ha⁻¹, 400 kg.ha⁻¹, et 600 kg.ha⁻¹

Les résultats obtenus (**Figure 1**), montrent que parmi les traitements comparés, le rendement sur les parcelles témoin absolu (T_{abs}) est le plus faible ($4,431 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) et celui sur les parcelles Guanotsar à dose plus faible (T_{200}) est le plus élevé avec un rendement de $21,471 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Une différence significative est constatée entre ces deux traitements. Les rendements obtenus avec le témoin compost de déchet d'ordure d'Andralanitra sont plus élevés que ceux obtenus avec le témoin absolu mais sont plus faibles par rapport aux traitements Guanotsar quelle que soit la dose apportée. Avec le traitement Guanotsar, les rendements du concombre sont inversement proportionnels aux doses appliquées. Les résultats de l'effet du Guanobarren à dose croissante sur le rendement des bulbes d'oignon sont synthétisés dans la **Figure** suivante :

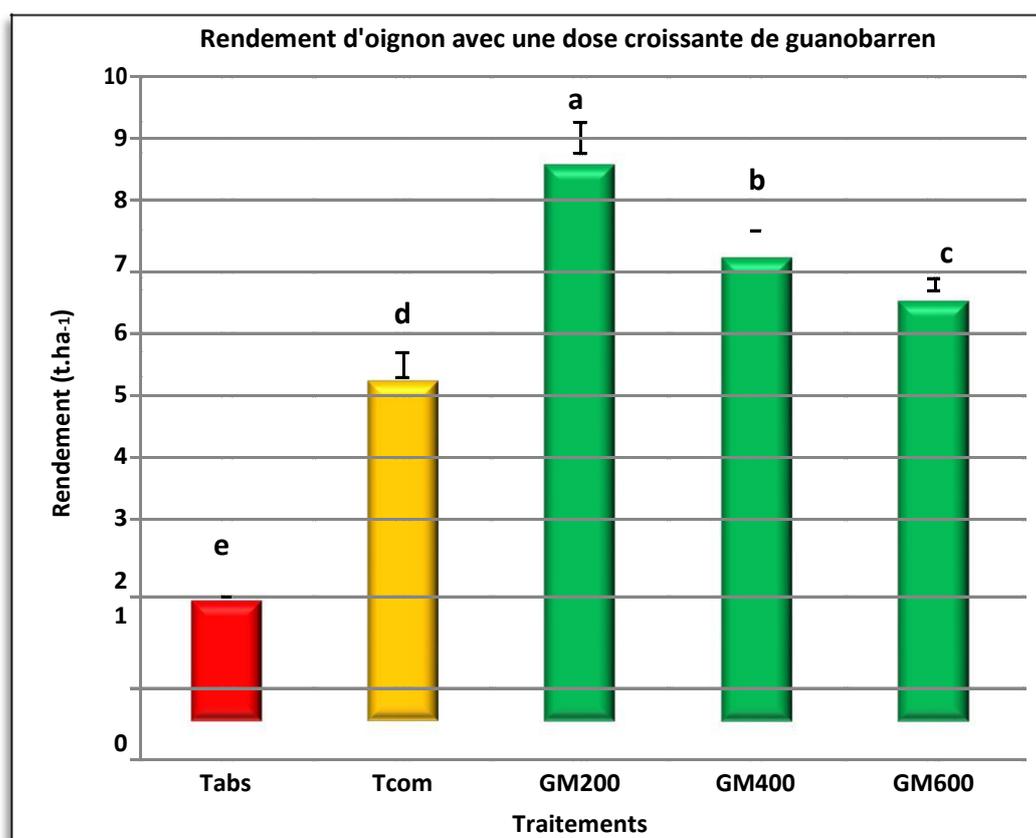


Figure 2 : Réponse de la culture d'oignon au traitement Guanobarren à doses croissantes $200 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, $400 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, et $600 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$

Les résultats obtenus (**Figure 2**), montrent que le rendement le plus élevé ($9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) est obtenu avec le traitement Guanobarren à dose plus faible (T_{200}) tandis que le rendement le plus faible appartient au témoin absolu (T_{abs}). Les différences entre les deux traitements sont significatives. Le témoin compost de déchet d'ordure d'Andralanitra a un rendement significativement plus élevés par rapport au témoin absolu mais significativement plus faibles qu'avec ceux issus du traitement Guanobarren quelle que soit la dose apportée. Avec Guanobarren, mis à part la dose la plus faible ($200 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), l'augmentation de la dose apportée n'a pas d'effet sur le rendement de bulbe d'oignon ($400 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ et $600 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Les résultats de l'effet du Guanotsar à dose croissante sur le rendement des petits pois sont synthétisés dans la **Figure** suivante :

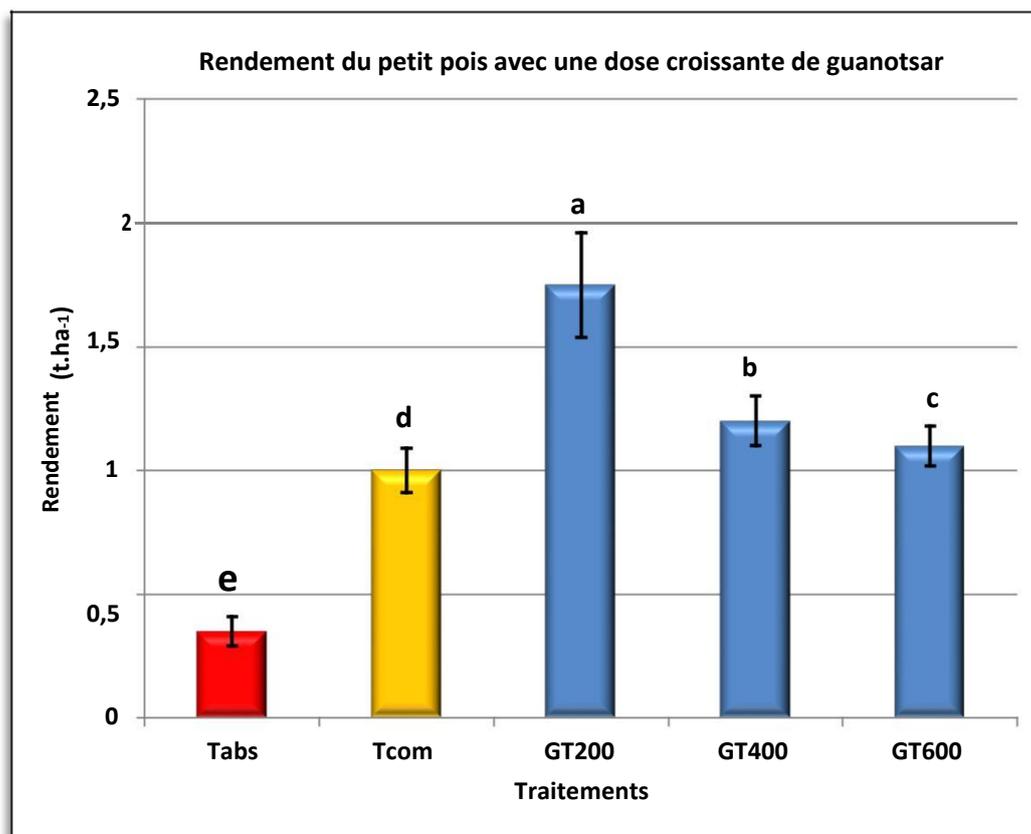


Figure 3 : Réponse de la culture de petit pois aux traitements Guanotsar à doses croissantes 200 kg.ha⁻¹, 400 kg.ha⁻¹, et 600 kg.ha⁻¹

Concernant l'effet de l'engrais phosphaté Guanotsar à dose croissante sur le rendement du petit pois (**Figure 3**), le témoin absolu donne du rendement significativement faible par rapport aux autres traitements car il n'atteint même pas le 0,5t.ha⁻¹ alors que tous les autres traitements donnent des rendements supérieurs ou égaux à 1t.ha⁻¹. L'engrais phosphaté Guanotsar augmente le rendement en petit pois à une certaine dose, c'est à dire à 200 kg.ha⁻¹ et au-delà de cette dose, le rendement diminue. Avec Guanotsar, comme dans le cas de la culture de concombre, l'augmentation de la dose fait diminuer les rendements. Bref, les trois graphes ont la même allure. Le témoin absolu donne le rendement le plus faible, suivi par le témoin compost de déchets urbains. L'apport des engrais phosphatés augmentent le rendement. En effet, les rendements obtenus avec ces engrais phosphatés sont supérieurs à ceux obtenus avec les deux témoins. Concernant l'effet de l'augmentation de la dose apportée, les résultats sont inversement proportionnels à la dose. Autrement dit, plus la dose d'engrais phosphaté apportée augmente, plus le rendement obtenu de chaque espèce diminue. Ainsi, pour les trois espèces, la dose la plus faible de 200 kg.ha⁻¹ donne le rendement le plus élevé. Pour les trois espèces, les traitements ont une probabilité $Pr > F$ inférieure au seuil significatif qui est de 0,05 d'une part (Concombre : $Pr > F = 0.0001$, Oignon : $Pr > F = 0.001$, Petit pois : $Pr > F = 0.028$) et un coefficient de corrélation R^2 très élevé d'autre part (Concombre : $R^2 = 0.973$, Oignon : $R^2 = 0.986$, Petit pois : $R^2 = 0.924$). Par conséquent, une différence significative entre les différents traitements appliqués est observée. Cette différence significative entre traitement est plus observée entre le témoin absolu et la dose la plus faible d'engrais phosphaté puisque c'est avec ce témoin que le rendement le plus faible s'observe.

4. Discussion

4-1. Effet de la fertilisation biologique et phosphatée sur les rendements

L'amélioration des rendements en concombre, bulbe d'oignon et petit pois sur les sols fertilisés en compost de déchet urbains, et en engrais phosphatés Guanotsar et Guanobarren montrent que les fertilisants appliqués présentent un effet positif sur le sol et sur les rendements des cultures maraichères par rapport aux rendements sur des sols non fertilisés (témoin absolu). Ces résultats sont conformes aux travaux de plusieurs auteurs, comme [7-11] qui ont mis en évidence des augmentations sensibles de rendements en cultures maraichères, et en maïs après des apports organiques, minéraux sur des sols ferrugineux tropicaux et des ferralsols acides. L'augmentation des rendements de culture sur les sols amendés en compost de déchets urbains d'Andralanitra, en engrais phosphaté Guanotsar et Guanobarren a occasionné des exportations d'éléments minéraux plus importants que celles observées sur le sol témoin sans aucun apport. Entre le traitement organique (témoin compost de déchet urbain), et le traitement mixte (Compost de déchet urbain associé aux engrais phosphatés Guanotsar et Guanobarren), les engrais phosphatés améliorent de façon significatives les rendements en culture maraichère. Ceci est conforme aux résultats de [11] en comparant l'effet de l'engrais organique local CETEP seul et l'engrais organique local CETEP associé aux engrais minéraux NPK.

Les faibles rendements obtenus dans les terrains amendés par la matière organique seule par rapport à ceux obtenus dans les parcelles fertilisés par la matière organique associée aux engrais phosphatés pourraient être expliqués par le fait que le phosphore et l'azote disponibles apportés par les engrais phosphatés furent en majeure partie à la base des bons rendements dans les parcelles étant donné que ces éléments font défaut ou sont présents à l'état libre en quantité infime ou immobilisés par les microorganismes dans la matière organique [4, 12, 13]. Par contre, malgré ce manque d'éléments minéraux majeurs dans la matière organique, elle améliore la structure du sol en contribuant à sa résistance contre l'action érosive des pluies ou du vent, en retenant l'eau et en la libérant lentement aux plantes (capacité d'emmagasinement de l'eau) pendant une période plus longue [14], mais aussi en retenant des substances nutritives du sol et en les libérant lentement aux plantes pendant une période plus longue [15]. Dès lors, la combinaison de ces effets bénéfiques de la matière organique à savoir l'amélioration de la structure du sol et de ceux des engrais phosphatés [14], l'amélioration de la fertilité du sol expliquerait les bons rendements qu'ont manifestés les parcelles fertilisées aux engrais phosphatés combinés à la matière organique.

4-2. Effet des doses d'engrais phosphatés apportées sur les rendements

L'allure des courbes de réponse des espèces maraichères aux engrais phosphatés a montré que l'accroissement du rendement est en corrélation négative avec l'augmentation de la dose de fertilisant apportée. L'indice de saturation du phosphore ainsi que le processus microbien peuvent expliquer l'allure de ces courbes. Le premier se passe dans le sol organique dont la pratique de fertilisation dépasse largement la capacité du sol à retenir le phosphore [17, 18]. Ceci ne peut être considéré comme élément expliquant ce fait parce que cet indice de saturation concerne le sol [19] alors qu'avec notre étude, nous considérons l'effet immédiat de l'apport des éléments aux plantes [20]. Donc, l'explication doit se focaliser sur le processus microbien qui tient un rôle important dans la décomposition des matières organiques contenues ici dans le compost de déchet et dans les engrais phosphatés. Le processus microbien peut être pris en compte puisque quand un engrais phosphaté hydrosoluble est appliqué au sol, il réagit rapidement avec les composantes du sol [21, 22].

Or, la disponibilité du phosphore est sujette à plusieurs processus physicochimiques comme la précipitation, l'adsorption et la réorganisation microbienne [16, 23] ; en plus les amendements organiques procurent une source de carbone qui stimule l'activité microbienne. Chacune des doses apportées sont additionnées de compost de déchet urbain (24,8 % de matière organique). Ainsi, un enrichissement du sol en matière organique augmente la contribution du P organique à la dynamique du phosphore [21] mais les différentes modalités influençant la décomposition de ces matières organiques apportées sont cependant liées à l'activité des microorganismes. Il y a donc interaction entre les microorganismes et la mobilité du phosphore [24]. Le critère biologique représentatif des processus microbiens peut être décrit par le rapport des formes organiques C/P, de façon analogue au rapport C/N [25]. Jusqu'à un rapport C/P critique, la biomasse microbienne immobilise le P, au-delà de cette valeur critique, le P peut être hydrolysé ou non selon le niveau d'activités enzymatiques (phosphatases produites par les microbes et les racines). Donc, plus on augmente le taux de phosphate, plus la valeur C/P atteint un niveau critique, c'est pourquoi la dose significativement forte diminue le rendement car l'immobilisation microbienne de P de l'engrais est importante que l'effet de l'ajout de MO sur la solubilité du P de l'engrais dans le sol acide réputé fixateur de P [16].

5. Conclusion

Le but de cette recherche est d'augmenter la production agricole; d'étudier l'effet de deux engrais biologiques phosphatés sur le rendement du concombre, d'oignon et du petit pois. Sur ceux, l'étude fait intervenir différents types de traitements composés de Guanotsar, Guanobarren, et compost de déchet urbain de la décharge. Parmi les deux engrais biologiques testés, le Guanotsar à la dose 200 kg.ha⁻¹ donne le meilleur rendement. Toutefois, le Guanobarren donne aussi de rendement important sauf à dose élevée (600 kg.ha⁻¹). On en déduit alors que la première hypothèse : « les engrais biologiques phosphatés augmentent le rendement surtout le Guanotsar », est confirmée. Par contre, la deuxième hypothèse : « le rendement en légume augmente proportionnellement avec la dose croissante » est rejetée. Pour conclure, l'apport d'engrais permet l'amélioration du rendement. Pourtant, il n'a pas encore été possible de déterminer avec précision la dose optimale d'apport correspondant à un maximum de rendement parce que les rendements obtenus n'atteignent même pas le rendement normal qu'on doit avoir pour le concombre et le petit pois, à cause du taux de germination qui n'est pas très fort et de l'attaque de la maladie. Aussi, la grille de fertilisation efficace ne peut pas être avancée par cette expérimentation. Toutefois, on peut affirmer que ces deux engrais biologiques améliorent le rendement et l'efficacité de chaque type d'engrais dépend de plusieurs facteurs comme l'espèce cultivée (légumineuse, graminée), le type de sol, les conditions climatiques.

Références

- [1] - Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche (MAEP). Lettre de Politique de Développement Rural à Madagascar, (2004).
- [2] - M. YEMEFACK, L. NOUNAMO, R. NJOMGANG, Influence des pratiques agricoles sur la teneur en argile et autres propriétés agronomiques d'un sol ferrallitique au sud du Cameroun. *Tropicultura* 22 (2004) 3-10.
- [3] - M. N'DIENOR, Fertilité et gestion de la fertilisation dans les systèmes maraîchers périurbains des pays en développement : intérêts et limites de la valorisation agricole des déchets urbains dans ces systèmes, cas de l'agglomération d'Antananarivo (Madagascar). Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, (2006).

- [4] - L. RABEHARISOA, Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des hautes terres de Madagascar. Thèse de Doctorat de l'Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Antananarivo, Madagascar. 202 pages, (2004).
- [5] - GERP. Préservation de la biodiversité de Maromizaha, 109 pages, (2008).
- [6] - GUANOMAD. Fiche technique de l'engrais biologique Guanotsar, Guanobarren, (2010).
- [7] - M. V. FALINIRINA, Valorisation en agriculture des apports organiques contenus dans les déchets urbains : qualité des matières organiques et services écosystémiques. Thèse de doctorat, (2010).
- [8] - B. DRIDI et C. TOUMI, Influence d'amendements organiques et d'apport de boue sur les propriétés d'un sol cultivé. *Etude et Gestion des Sols* 6, 7-14, (1999).
- [9] - G. Gascho et M. Parker. Long term liming effects on Coastal Plain soils and crops. *Agron. J* 93, 1305-1315, (2001).
- [10] - K. BAZOUMANA, T. OUOLA, D. HEHOU et N. Z. PROSPER, Effet des amendements locaux sur les rendements, les indices de nutrition et les bilans culturaux dans un système de rotation coton maïs dans l'Ouest de Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 13, 103-111, (2009).
- [11] - K. B. INNOCENT, C. ADRIEN, M. B. ESPOIR, J. M. CIZUNGU, M. A. TRESOR, M. M. PASCAL et I. MWAPU, Effet de l'engrais « CETEP » sur le rendement des cultures de haricot nain dans le Sud-Kivu. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], URL : <http://vertigo.revues.org/13914> ; DOI : 10.4000/vertigo.13914, (2013).
- [12] - C. MOREL, A. MOLLIER, P. DENOROY, D. PLÉNET, Dynamics of organic P, C and N within the plough layer of a sandy soil continuously cropped and fertilized for 28 years. p. 235. In: "Organic matter dynamics - from soils to oceans". Book of abstracts of the 3rd international symposium on soil organic matter (ISSOM). 11-14 July 2011, Leuven, Belgium (2011).
- [13] - N. ZIADI, A. J. MESSIGA, C. MOREL, R. LALANDE, G. TREMBLAY, Disponibilité du phosphore dans les sols de grandes cultures: état des connaissances au Québec. pp. 10-11. In: Journée d'information scientifique des Grandes cultures : Ensemble pour la diffusion de la recherche agronomique. Cahier des conférences. 17 février 2011 à Drummondville (Québec), (2011).
- [14] - H. ANDRIAMANIRAKA, L. RABEHARISOA, R. MICHELLON, N. MOUSSA et C. MOREL, Influence de différents systèmes de culture sur la productivité de sols cultivés des Hautes Terres de Madagascar et conséquences pour le bilan de phosphore. *Etude et Gestion des Sols*, Volume 17, 2, 2010, pages 115 à 126, (2010).
- [15] - J. W. MOLENAAR, J. J. KESSLER et H. BREMAN, L'agroforesterie dans le cadre de l'intensification agricole, IFDC catalyst. Kigali, 43 p, (2008).
- [16] - L. E. PARENT, A. PELLERIN ET L. KHIARI, Le flux et la dynamique du phosphore dans les sols agricoles québécois : Colloque sur le phosphore nov. 2002, 27p, (2002).
- [17] - J. C. FARDEAU, Le phosphore biodisponible des sols: sa représentation par un modèle fonctionnel à plusieurs compartiments. *Agronomie* 13, 317-331, (1993).
- [18] - E. FROSSARD, P. JULIEN, J.A. NEYROUD et S. SINAJ, Le phosphore dans les sols, les engrais, les cultures et l'environnement : Etat de la situation en Suisse. Cahier de l'environnement N° 368. Sol. Publié par l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEP) Berne, (2004).
- [19] - J. C. FARDEAU et E. FROSSARD, Processus de transformation du phosphore dans les sols de l'Afrique de l'Ouest semi-aride : application au phosphore assimilable. Dans : *Phosphorus Cycles IN terrestrial and Aquatic Ecosystems of Semi- Arid Africa*, pages 108-128. SCOPE/UNEP proceedings, (1992).

- [20] - C. MOREL, F. BUTLER, P. CASTILLON, L. CHAMPOLIVIER, P. DENOROY, R. DUVAL, D. HANOCQ, A. S. KOUASSI, E. KVARNSTRÖM, A. MESSIGA, M. METRAILLE, L. RABEHARISOA, N. RABOURDIN, C. RAYNAL, T. SAVOIE, S. SINAJ, N. ZIADI, Gestion à long terme de la dynamique du phosphore dans les sols cultivés. 10èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse, COMIFER-GEMAS, Reims, 23-24 novembre (2011).
- [21] - E. FROSSARD, B. TRUONG et F. JACQUIN, Influence de l'apport de composés organiques sur l'adsorption et de la désorption des ions phosphates en sol ferrallitique ; *Agronomie*, 6 : 503-508, (1986).
- [22] - FAO. « Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable », bulletin FAO Engrais et nutrition végétale, 13 pages, (2004).
- [23] - C. MOREL, 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 de P et du comportement des plantes dans les parcelles de grandes cultures. Mémoire d'HDR à l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 80 p, (2002).
- [24] - C. GRANT, S. BITTMAN, M. MONTREAL, C. PLENCHETTE, C. MOREL, "Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development"- *Can. J. Plant Sci.* 85: 3-14- 12pages, (2005).
- [25] - L. E. PARENT et L. KHIARI. «Nitrogen and phosphorus indicators of organic soil quality" *Organic soils and peat materials for sustainable agriculture*, (2003).

1.4. Razafindramananana N. C., Rakotoalibera M. H., Remamy R. R. N., ANDRIAMANIRAKA H., Douzet J. M., 2015. Effets des systèmes en semis direct sur l'érosion hydrique et les rendements des cultures pluviales sur les Hautes Terres centrales malgaches. AFRIQUE SCIENCE 11(5) (2015) 227 – 240.



Effets des systèmes en semis direct sur l'érosion hydrique et les rendements des cultures pluviales sur les Hautes Terres centrales malgaches

Noroso Christine RAZAFINDRAMANANA ^{1*}, Mamy Haingotiana RAKOTOALIBERA ¹
Razafimiroe Randzavola Nirina REMAMY ¹, Harilala ANDRIAMANIRAKA ¹
et Jean Marie DOUZET ²

¹ Université d'Antananarivo, Mention Agriculture Tropicale et Développement Durable (AT2D),
Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, BP 175 101 Antananarivo, Madagascar

² Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD),
Département PERSYST, UR AIDA, TA B 102/07, Avenue d'Agropolis, 34398 Montpellier cedex 5 France

* Correspondance, courriel : soamananjara@gmail.com

Résumé

Deux pratiques culturales, (i) semis direct sous couverture morte de résidus des cultures antérieures (SDm) et (ii) labour sans restitution des résidus des cultures (LABe), sont comparées, depuis six ans, dans un dispositif expérimental de mesure de l'érosion à Andranomanelatra-Antsirabe, Haute Terres centrales malgaches, sur un sol ferrallitique à caractère andique. Le système de culture est basé sur une rotation biennale de maïs (*Zea mays*. L) + haricot (*Phaseolus vulgaris*. L)/riz pluvial (*Oriza sp.* L). Les résultats obtenus ont montré l'effet positif des systèmes en semis direct sur couverture végétale pour réduire d'une manière significative l'érosion hydrique. Les pertes en terre moyennes durant six ans des mesures sur les parcelles en semis direct et labourées sont respectivement de 0,1 et 7,1 t.ha⁻¹.an⁻¹. Une tendance similaire est constatée sur les taux du ruissellement ; les taux du ruissellement sur les parcelles labourées sont huit fois plus élevés que ceux observés sur les parcelles en semis direct. Quant aux biomasses totales produites (grains plus résidus de cultures), aucune différence significative entre traitements n'a été observée. Pour conclure, les systèmes en semis direct sous couverture végétale permanente constituent une technique prometteuse pour la conservation durable des sols en versant de collines, tout en permettant des productions comparables aux parcelles labourées.

Mots-clés : conservation du sol, pertes en terre, ruissellement, couvertures végétales, maïs, haricot, riz pluvial.

Abstract

Effect of direct seeding mulch-based cropping system (DMC) on water erosion and rainfed agriculture yield in Madagascar central highlands

Two treatments, based on direct seeding mulch-based cropping system (DMC) and conventional tillage system without restitution of residue are compared for six years in the experiment design in Andranomanelatra, central Highlands of Madagascar.

The soil at this site is an andic Dystrustept. Systems are based on an annual rotation of maize (*Zea mays*. L) + common bean (*Phaseolus vulgaris*. L) and rainfed rice (*Oriza sp.* L). The result showed that soils losses under no tillage system were less than those under conventional tillage system. Average soil losses generated from no tillage and tillage system during the experiment were 0.1 and 7.1 t.ha⁻¹.yr⁻¹ respectively; a similar trend is observed on runoff rates. Runoff rates recorded in tillage treatment are eight times greater than those under no-tillage system. About, the total biomass produced (seed and crop residues) per treatment, no significant difference was observed between a conventional and no tillage system. Definitively, direct seeding systems are a promising technique for sustainable soil management, while ensuring production comparable to the tillage systems in the long term.

Keywords : *soil conservation, soils losses, runoff, crop mulching, corn, bean, rainfed rice.*

1. Introduction

Madagascar est un pays à vocation agricole, l'Agriculture contribue pour 28,3 % au produit intérieur brut (PIB) du pays et emploie environ 70 % de la main d'œuvre active et près de 75 % de la population malgache, est estimée à 22,3 millions en 2013-2014, habitent dans les zones rurales [1]. Selon la Banque mondiale [2], au cours de dernières années, une augmentation de la population d'environ 85 % est recensée à Madagascar. Dans les grandes zones de production agricole, surtout sur les Hautes Terres centrales malgaches, cette pression démographique entraîne de problèmes de gestion de sols agricoles qui vont de pair avec l'insécurité alimentaire, la paupérisation et par voie de conséquence entrave la croissance économique. De même, les surfaces planes présentant un grand intérêt pour l'agriculture, telles que les bas-fonds plus fertiles et les *baiboho*, qui sont des alluvions fluviales déposés le long de cours d'eau [3] ne suffisent plus pour subvenir au besoin de la population. La mise en culture de sols en versant de colline, appelés localement sols de « *tanety* » [4] est incontournable, car ils constituent la seule surface potentielle pour assurer l'augmentation de la production agricole. Ils représentent plus de 50 % de la surface agricole utile de la Région [5]. Or, dans la majorité de cas, la fertilité de sols en versants des collines est faible. Elle tend à diminuer au fil du temps [6], des multiples raisons pourraient avancer pour expliquer leur déclin. Celle la plus probable est l'effet du phénomène d'érosion hydrique.

En effet, Madagascar est un pays où le risque de l'érosion hydrique n'est pas négligeable. L'effet combiné de l'agressivité de la pluie tropicale, l'absence de la couverture végétale durant une certaine période de l'année et la pratique de labour itératif sans restitution de résidus des cultures concourent à fragiliser le *tanety*. L'accroissement de l'agriculture pluviale (promotion de l'agriculture sur *tanety*) et le maintien des capacités productives des agrosystèmes constituent donc les grands enjeux des agricultures familiales d'Afrique et de Madagascar [7]. Pour pallier ce problème, les systèmes des cultures en semis direct sur couvertures végétales permanentes (systèmes SCV) ont été testés dès le début des années 1990 à Madagascar, ils ont pour principal objectif d'améliorer la fertilité de sols de *tanety*, associant une gestion intégrée de sols en versants des collines [8]. Ces systèmes SCV obéissent aux trois principes de l'agriculture de conservation [9]: (i) l'absence de perturbation du sol (suppression du labour, de sarclage, du binage etc.) ; (ii) la protection de sols par une couverture végétale permanente ; et (iii) la rotation culturale associant céréales et légumineuses. Les études antérieures réalisées à Madagascar montrent des multiples effets bénéfiques des systèmes SCV. En fait, ils limitent le développement des mauvaises herbes et maintiennent l'humidité du sol [10]; augmentent la teneur en matière organique du sol [11] ; limitent l'érosion hydrique [12, 13]; et augmentent et améliorent la diversité faunistique et floristique du sol [14, 15]. Dans ce contexte, ils constituent un moyen efficace pour lutter contre la dégradation du sol et participe à améliorer sa fertilité [16].

Mais les revues de la littérature scientifique, montrent que les informations quantitatives et les études à long terme (plus de 5 ans) traitant l'effet des systèmes SCV, sur les rendements des cultures et l'érosion hydrique sur les Hautes Terres centrales malgache sont rares. La question scientifique étudiée ici est la suivante : *dans le contexte spécifique des Hautes Terres centrales malgaches sur sols de Tanety à caractère andique, les systèmes SCV ont-ils des effets significatifs sur la conservation des sols en versants de collines et/ou les rendements des cultures durant les six années des mesures ?* Cette étude originale pour la Grande-Ile a pour objectif principal de comparer le taux d'érosion (c'est-à-dire les pertes en terre et les taux du ruissellement) et la quantité totale de biomasse produite (partie récoltable et non récoltable) entre les systèmes SCV et labourés durant plusieurs années des mesures. Cette activité de recherche reprend les données collectées sur un même dispositif expérimental d'érosion à Andranomanelatra-Antsirabe depuis six campagnes culturales consécutives.

2. Matériel et méthodes

2-1. Description du dispositif expérimental

L'essai est conduit à Andranomanelatra, situé à 15 km au Nord-Est d'Antsirabe (19°53'46" Sud, 47°14'48" Est, 1645 m d'altitude). La pluviosité et la température moyennes annuelles, enregistrées entre 2004 et 2009 sont respectivement de 1373 mm et 17°C. D'après la classification climatique de Köppen, le site d'Andranomanelatra est doté d'un climat subtropical humide avec un été doux [17]. Ce climat est marqué par une alternance d'une saison froide et sèche de mai à septembre et d'une saison humide et chaude d'octobre à avril. D'après [18], le sol d'Andranomanelatra est un sol ferrallitique à caractère andique. Le détail des caractéristiques du sol à l'état initial est présenté dans la partie résultat de l'article en cours (**Tableau 1**). Le dispositif expérimental a été mis en place en novembre 2004, sur un versant exposé au nord, avec une pente variant de 10 à 13 %, et a été installé sur une jachère spontanée à *Cynodon dactylon* d'une dizaine d'années. Le dispositif expérimental est composé de 16 parcelles élémentaires de 48 m² chacune, placées les unes à cotés des autres. Les parcelles sont groupées en quatre blocs randomisés de façon à avoir 4 répétitions et 4 traitements. Pour mesurer le taux d'érosion, de parcelles d'érosion (21 m²) ont été intégrées sur chaque parcelle élémentaire. Elles sont ceinturées par de tôles légèrement enfoncées dans le sol pour éviter les entrées d'eau de l'extérieur et les sorties des eaux du ruissellement de l'intérieur. Par le biais d'un exutoire-tuyau, les eaux ruisselées dans les parcelles d'érosion sont déversées directement dans des fûts collecteurs équipés de partiteurs 1/5 [19]. Une partie de chaque parcelle élémentaire n'est pas ceinturée de tôles, afin de réaliser des prélèvements et mesures sans perturber l'autre partie de la parcelle, en occurrence les rendements des cultures.

2-2. Traitements étudiés

Une rotation biennale est appliquée sur toutes les parcelles, en première année le maïs (*Zea mays L.*) est associé au haricot (*Phaseolus vulgaris L.*), et en deuxième année, le riz pluvial (*Oriza sp L.*) est cultivé en pure. Le dispositif expérimental comporte quatre traitements, faisant varier travail du sol et restitutions de résidus de cultures. Mais dans la présente étude deux traitements sont étudiés à savoir :

- le traitement LABe : les parcelles LABe sont labourées manuellement à l'aide de l'*angady* (une sorte de bêche avec une lame de 30-40 cm de long et 15 cm de large, munie d'une longue manche en bois de 1 à 1,5 m de long) jusqu'à 20 cm de profondeur et les résidus des cultures sont exportés de parcelles ;
- le traitement SDm : les parcelles SDm ne sont pas labourées et les résidus des cultures précédentes sont coupés et laissés en surface.

2-3. Itinéraire technique

Afin d'évaluer l'effet du mode de gestion et de l'année, durant la période d'expérimentation, les deux traitements comparés reçoivent le même niveau d'intrants. L'épandage de fumier de bovin à raison de 5 t.ha⁻¹ et de dolomie à raison de 500 kg.ha⁻¹ est effectué au moment du labour pour le traitement LABe et après les coupes des résidus des cultures pour le traitement SDm. Un apport de 300 kg.ha⁻¹ de N₁₁P₂₂K₁₆ est effectué au semis ; et deux apports sont effectués respectivement au moment de la levée (50 kg.ha⁻¹) et 40 jours après la levée (50 kg.ha⁻¹). Les semences sont traitées avec du Gaucho T45WS à 5 g.kg⁻¹. Les graines du riz sont ensuite mises en poquets (5 à 7 grains) avec des espacements de 20 cm entre lignes et 20 cm entre les poquets. Pour l'association maïs/ haricot, les graines sont toujours mises en poquet, avec des espacements de 1 m entre lignes et 40 cm entre les poquets pour le maïs ; entre les lignes de maïs se trouvent deux lignes de haricots à 40 cm et des poquets à 20 cm.

2-4. Prélèvements et mesures sur terrain**2-4-1. Prélèvement du sol**

L'échantillonnage s'est fait sur un dispositif expérimental avant l'expérimentation, un prélèvement du sol en place est effectué à l'aide d'un cylindre métallique à différentes profondeurs (0-5, 5-10, 10-20, 20-30 et 30-40 cm). Afin de tenir compte l'hétérogénéité du terrain, pour chaque parcelle, deux points de prélèvements sont réalisés, respectivement en haut et en bas de la pente. Les échantillons des sols sont utilisés pour déterminer les caractéristiques du sol en place du dispositif expérimental à l'état initial.

2-4-2. Mesures de caractéristiques des pluies

L'expérimentation est réalisée sous condition naturelle, les données sur la hauteur des pluies (mm) et leur intensité maximale (mm.h⁻¹) sont recueillies sur une station météorologique automatique de type Enerco 408 GSM de Cimel Technologies, située à côté du dispositif expérimental d'érosion à Andranomanelatra-Antsirabe. La station Cimel répond aux recommandations de l'organisation mondiale de la météorologie. La station est un poste autonome avec un capteur solaire, une mémoire interne et un système de transfert des données sur un ordinateur.

2-4-3. Mesures des taux du ruissellement et des pertes en terre

Après chaque événement pluvial érosif, des mesures du ruissellement et de récupération de particules solides sont effectuées systématiquement. L'opération de mesures du ruissellement est réalisée avant le nettoyage du fût. La hauteur d'eau collectée dans le fût est mesurée. Le rapport entre le volume ruisselé (L) et la superficie de la parcelle d'érosion (m²) donne le ruissellement (mm). La hauteur du ruissellement est ensuite cumulée sur une campagne et rapportée à la hauteur des pluies pour donner les taux du ruissellement, exprimés en mm.mm⁻¹. Après homogénéisation manuelle du fût, deux échantillons de 1,5 L représentatifs de la solution ruisselée sont prélevés dans chaque fût. Les échantillons sont ensuite passés au filtre de type millipore d'une porosité de 0,45 µm. Les filtres sont ensuite séchés à l'étuve réglé à 105°C pendant 24 heures. Le rapport entre le poids des sédiments secs et la surface d'une parcelle d'érosion donne les pertes en terre, exprimées en t.ha⁻¹.

2-4-4. Mesure du taux de la couverture végétale

Le taux de la couverture végétale est évalué par la méthode de la grille qui consiste à placer un cadre placé à deux emplacements par parcelle. Un cadre de 1,1 m², sur lequel sont tendus des fils se croisant tous les 10 cm, est utilisé. Cette grille est disposée horizontalement au-dessus de la parcelle, et la nature de ce qui se trouve au point situé à la verticale de chaque intersection est notée (sol nu, résidus de différentes natures, plante vivante cultivée ou non) [20, 21]. Pour suivre l'évolution du taux de couverture, deux mesures sont effectuées durant les trois premières campagnes culturales (A1, A2, et A3). La première mesure est effectuée à partir de soixante cinquième jours après le semis du riz ou une trentaine de jours après le semis du maïs-haricot. La deuxième mesure a lieu généralement vers la fin de la pleine saison des pluies (entre mi et fin janvier).

2-4-5. Mesure de la biomasse végétale

La méthode de la récolte intégrale ou méthode de surface [22] est appliquée pour mesurer les biomasses aériennes, sur une parcelle de 48 m² pour l'association maïs-haricot, sur une parcelle de 36 m² pour le riz. Le poids de la matière fraîche est mesuré sur terrain et un aliquote est recueilli, et mis à l'étuve réglée à 60°C durant 72 heures. Les parties récoltables (graines) et non récoltables (tiges et feuilles) sont séparées.

2-5. Analyses au laboratoire

Les analyses physico-chimiques sont effectuées au laboratoire de Radio-isotope (LRI) à Ampandrianomby-Antananarivo-Madagascar et au laboratoire de l'UMR Eco & Sols (Ecologie Fonctionnelle & Biogéochimie des Sols)-Montpellier -France. Le pH 1M est mesuré sur des suspensions de sols dans une solution, avec une proportion en poids égal à 1/2,5 ; la densité apparente est calculée après séchage d'échantillons du sol à l'étuve à 105°C durant 48 heures ; l'analyse granulométrie est réalisée selon la méthode de la pipette de Robinson ; la méthode proposée par [23] est employée pour déterminer la stabilité structurale des agrégats ; le carbone total (C_{tot}) et l'azote total (N_{tot}) est mesurés par combustion au microanalyseur élémentaire CHN Fisons/Carlo Erba NA 2000, Milano, Italy.

2-6. Traitements des données statistiques

L'analyse statistique des données est effectuée à l'aide du logiciel XLSTAT. L'effet particulier des systèmes de culture sur les rendements de cultures est analysé statistiquement par une analyse de variance à deux critères de classification : (i) effets du mode de gestion et (ii) de l'année [24]. Les données sont comparées entre elles par le test de Tuckey (test de comparaisons multiples pour la variable moyenne). Pour l'acceptabilité ou le rejet de l'hypothèse nulle, le seuil de probabilité est fixé à 5 %.

3. Résultats**3-1. Caractéristiques du sol en place**

Les résultats montrent que le pH du sol est légèrement acide. La densité apparente est faible, avec une valeur moyenne inférieure à 1t.m⁻³. La texture de l'horizon de surface est argileuse, avec une teneur en éléments fins (argiles + limons fins) de l'ordre de 75 %. Le résultat du test de stabilité structurale indique une forte teneur en macro agrégats qui représentent plus de 75 % de l'ensemble de fractions d'agrégats du sol, alors que les méso agrégats et micro agrégats représentent respectivement 20 et 5 % de cette fraction. L'horizon superficiel du sol est également riche en carbone organique, avec une teneur moyenne de 38 g C.kg⁻¹ sol (*Tableau 1*).

Tableau 1 : Caractéristiques du sol avant la mise en place du dispositif expérimental

Paramètres mesurés	Unités	Valeurs
pH	-	5,2
Densité apparente	t.m ⁻³	0,96
Granulométrie		
- Argiles : 0-2 µm	%	41
- Limons fins : 2-20 µm	%	34
- Limons grossiers : 20 à 50 µm	%	4
- Sables fins : 50 à 200 µm	%	11
- Sables grossiers : 200 à 2000 µm	%	10
Distribution des agrégats stables		
- Macroagrégats : 200-2000 µm	g.kg ⁻¹ sol	755
- Mésoagrégats : 20-200 µm	g.kg ⁻¹ sol	201
- Microagrégats : 0-20 µm	g.kg ⁻¹ sol	44
Carbone (C) organique total	gC.kg ⁻¹ sol	38
Azote (N) total	gN.Kg ⁻¹ sol	3

3-2. Caractéristiques des pluies

Les caractéristiques des pluies durant la période d'expérimentation sont résumées dans le **Tableau 2**. L'analyse de la pluviosité annuelle a montré une variabilité annuelle de la hauteur de la pluie, allant de 905 (A5) à 1540 mm (A4). Le pic de l'intensité des pluies (sur un événement le plus érosif de l'année) au cours d'une saison des pluies varie aussi suivant l'année, entre 105 (A3) et 170 (A4) mm.h⁻¹. Quant au nombre de jours des pluies, il varie de 157 (A1) à 227 (A4) jours.

Tableau 2 : Caractéristiques des pluies durant la période d'essai

Paramètres	Unités	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Cumul des pluies	mm	1069	1540	1059	1520	905	1262
Intensité des pluies*	mm.h ⁻¹	150	115	105	170	115	125
Jours des pluies	jours	157	195	220	227	188	198

* Intensité des pluies enregistrée pour un événement le plus érosif durant une saison des pluies.
A1, A2, A3, A4, A5 et A6 : les six années des mesures

La **Figure 1** (à gauche) montre l'histogramme de distribution moyenne mensuelle du cumul de la précipitation durant la période d'essai.

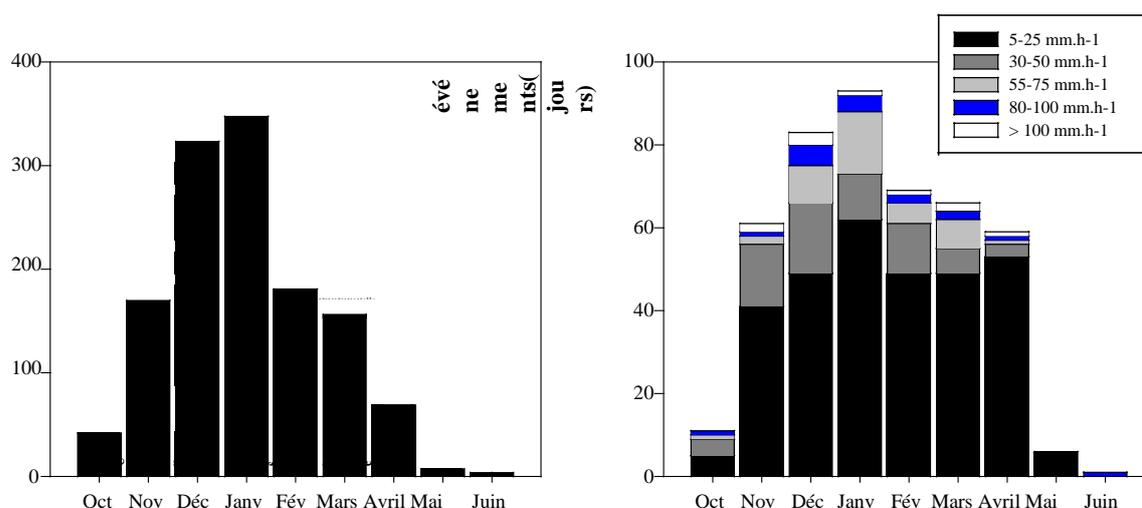


Figure 1 : Histogrammes de cumul mensuel des pluies (à gauche) et de fréquence mensuelle de l'intensité maximum de pluies durant la période d'expérimentation (à droite)

L'histogramme met en évidence le caractère monomodal du régime des pluies. En moyenne, plus de la moitié (52 %) des précipitations cumulées durant la saison des pluies sont enregistrées entre décembre et janvier. La période la plus érosive de la saison des pluies coïncide également à cette période, en moyenne plus de 52 % des événements d'intensité maximum supérieure à 55 mm.h⁻¹ se situent entre décembre et janvier (*Figure 1* à droite).

3-3. Taux d'érosion

Les résultats concernant les pertes en terre durant l'expérimentation sont repris dans *la Figure 2*. Durant six années des mesures, les pertes en terre sur les parcelles LABe sont nettement supérieures à celles enregistrées sur les parcelles SCVm. Les pertes en terre moyennes durant la période d'expérimentation sont de $7,33 \pm 3,44$ t.ha⁻¹.an⁻¹ sur les parcelles LABe alors que sur les parcelles SDm, elles sont de $0,10 \pm 0,04$ t.ha⁻¹.an⁻¹. Quant à l'évolution des pertes en terre au cours du temps ; sur les parcelles LABe, une variabilité interannuelle est enregistrée, les pertes en terre varient de 2,70 (A2) à 15,29 (A4) t.ha⁻¹.an⁻¹, alors sur les parcelles SDm, d'une manière générale la variation est très faible (entre 0,50 et 3,20 t.ha⁻¹.an⁻¹), bien qu'il ait une différence significative entre les saisons des pluies en A4 et en A2/A6.

Concernant les taux du ruissellement durant l'expérimentation les résultats obtenus (*Figure 3*) montrent clairement l'existence d'une différence significative entre les deux traitements comparés (LABe vs SDm). La moyenne des taux du ruissellement sur les parcelles LABe est huit fois (8 %) plus importante que celle des parcelles SDm (1 %). En termes d'évolution des taux du ruissellement durant la période d'essai sur les parcelles LABe, d'une manière générale aucune différence significative n'est observée, sauf pour les saisons des pluies A2 et A4 où une différence significative est constatée. Pour les parcelles SDm, durant les trois premières saisons des pluies, les taux du ruissellement sont faibles (1 %) par rapport à ceux de trois dernières années des mesures (2 %). Quoi qu'il en soit, les taux restent négligeables durant la période d'essai.

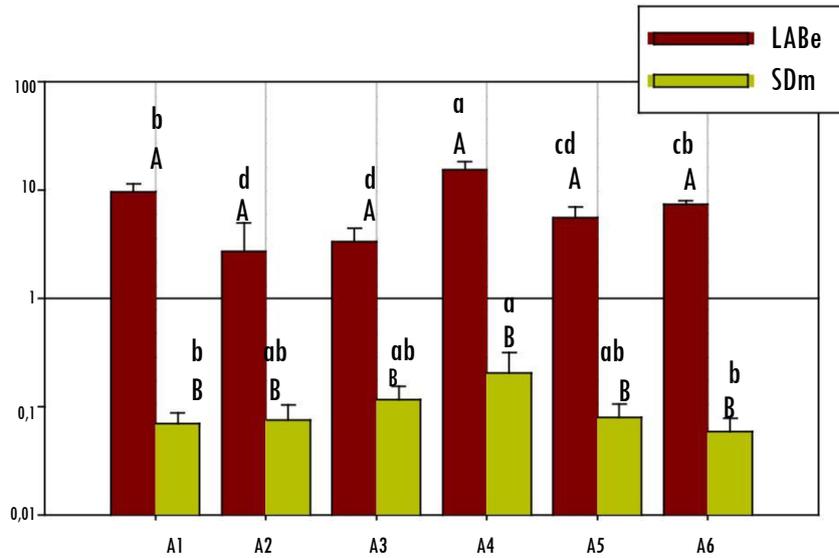


Figure 2 : Pertes en terre durant la période d'essai (à l'échelle logarithmique)

Les lettres majuscules se rapportent aux différences entre LABe et SDm pour une même année, les lettres minuscules indiquent la différence entre le même traitement (LABe ou SDm) au cours de la période d'expérimentation. Une même lettre indique une absence de différence significative au seuil de 5% d'après le test de Tukey.

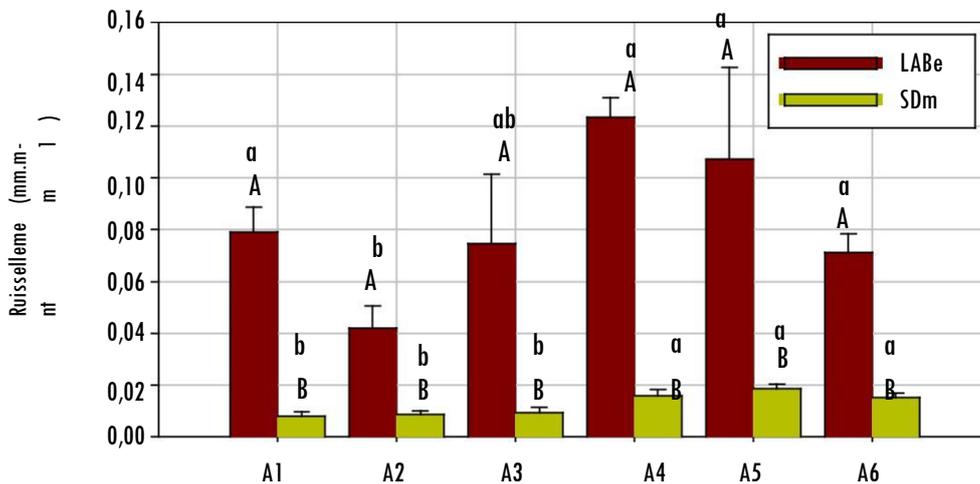


Figure 3 : Taux du ruissellement durant la période d'expérimentation

Les lettres majuscules se rapportent aux différences entre LABe et SDm pour une même année, les lettres minuscules indiquent la différence entre le même traitement (LABe ou SDm) au cours de la période d'expérimentation. Une même lettre indique une absence de différence significative au seuil de 5% d'après le test de Tukey.

3-4. Taux de la couverture végétale

L'évolution des taux de la couverture végétale est présentée dans la **Figure 4**.

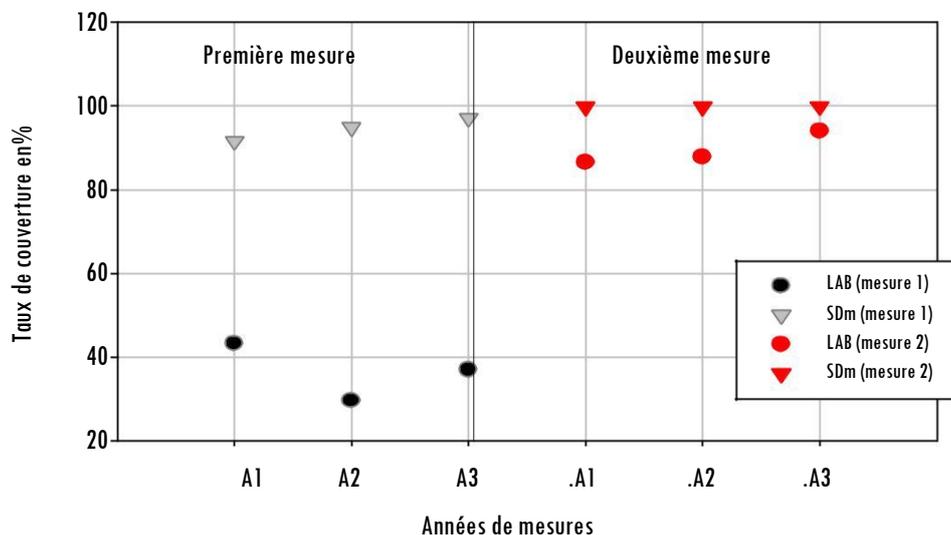


Figure 4 : Evolution des taux de la couverture végétale suivant le mode de gestion

Les mesures des taux de couverture végétale effectuées jusqu'à 70 jours après le semis (semis effectué entre novembre et début décembre) montrent que les taux de couverture du sol par la végétation sur les parcelles LABe varie entre 29 et 43 %. En revanche, sur les parcelles SDm, dès le début du prélèvement, le taux moyen de couverture du sol par la végétation est plus de 92 %. Les mesures effectuées à partir de 73 jours après le semis montrent que les taux de couverture du sol par la végétation sur les parcelles LABe dépassent 75 %, et sur les parcelles SDm, il peut aller jusqu'à 100 %.

3-5. Rendements des cultures

Les rendements des cultures obtenus sur une période d'essai sont présentés dans le **Tableau 3**. Les rendements en grains et en pailles du riz montrent une absence de différence significative entre les deux traitements comparés, sauf pour les pailles du riz durant la première campagne culturale (A1), où les rendements sur les parcelles labourées sont nettement supérieurs par rapport à ceux obtenus sur les parcelles SDm. Les rendements en grain de haricot sont supérieurs pour le traitement SDm que pour le traitement LABe, sauf à la fin de l'expérimentation, où une différence significative est signalée entre eux. Pour les rendements en pailles, d'une manière générale, une absence de différence significative est observée sur les deux traitements, sauf pour la quatrième campagne culturale (A4), où les rendements en pailles sur les parcelles SDm sont plus importants. Pour le maïs, les rendements en grains et en pailles ne diffèrent pas significativement entre traitements au cours de la période d'essai. En termes d'évolution des rendements des cultures, pour les deux traitements étudiés, les rendements en grains du riz et de maïs connaissent une augmentation au fil du temps. Une observation similaire est constatée au niveau des rendements en pailles. Contrairement à ce qu'on a pu obtenir sur les rendements en grains de haricots, où une diminution est enregistrée. Pour les rendements en paille du haricot, ils sont constants, sauf pour la quatrième campagne culturale (A4) où une diminution de rendements est enregistrée.

Tableau 3 : Influence du mode de gestion du sol sur la quantité de la biomasse totale produite pour le riz, le maïs et le haricot en t.ha⁻¹

Années	Culture	Biomasse	LABe	SDm
A1	RIZ	Grains	1,47 ± 0,49 a B	0,76 ± 0,31 a C
A3			1,47 ± 0,10 a B	1,80 ± 0,28 a B
A5			3,00 ± 0,26 a A	3,39 ± 0,36 a A
A1		*Paille	3,44 ± 0,42 a A	1,45 ± 0,39 b C
A3			6,42 ± 2,64 a A	6,63 ± 2,05 a A
A5			3,64 ± 0,48 a A	3,75 ± 0,44 a B
SOUS-TOTAL			19,43	17,77
A2	HARICOT	Grains	0,49 ± 0,20 b A	0,86 ± 0,06 a A
A4			0,32 ± 0,05 b A	0,69 ± 0,10 a B
A6			0,23 ± 0,02 a B	0,26 ± 0,05 a C
A2		*Paille	0,87 ± 0,16 a A	0,88 ± 0,15 a A
A4			0,34 ± 0,08 b B	0,55 ± 0,09 a B
A6			0,83 ± 0,13 a A	0,89 ± 0,23 a A
SOUS-TOTAL			3,09	4,12
A2	MAIS	Grains	1,84 ± 0,54 a B	1,70 ± 0,21 a B
A4			1,84 ± 0,29 a B	2,92 ± 1,07 a B
A6			3,19 ± 0,43 a A	3,01 ± 0,82 a A
A2		*Paille	2,82 ± 0,48 a B	2,52 ± 0,43 a B
A4			5,41 ± 1,43 a A	6,57 ± 1,21 a A
A6			5,08 ± 0,71 a A	5,88 ± 0,88 a A
SOUS-TOTAL			20,18	22,59
TOTAL			42,70	44,48

Les lettres minuscules comparent les deux modes de gestion pour une même année, les lettres majuscules montrent l'évolution des rendements durant la période d'essai pour le même traitement et même culture. Les mêmes lettres ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 % ($p < 0,05$) selon le test de Tuckey
*Paille : ce sont les produits non récoltables (feuilles, tiges, branches etc.), qui peuvent être restitués au sol.

4. Discussion

4-1. Effets de la restitution des résidus des cultures sur l'érosion hydrique.

La connaissance de la bonne pratique agricole est indispensable pour la conservation durable des sols agricoles. Cette étude a permis de mettre en évidence une pratique permettant de limiter la dégradation du sol sur les versants des collines (*Tanety*). En effet, dans la présente étude, la restitution des résidus des cultures en surface permet de contrôler l'érosion hydrique sur les sols ferrallitiques à caractère andique de Hautes Terres centrales malgaches. Les pertes en terre et les taux du ruissellement sur les parcelles SDm sont négligeables, voire nuls, par rapport à ceux sur les parcelles LABe. Cette observation est valable durant les six saisons des pluies consécutives et quelques soient les types des plantes cultivées (riz en pur ou association maïs-haricot).

L'effet positif de systèmes SDm pour contrôler l'érosion hydrique est aussi bien visible dès la mise en place de la pratique culturale. Ces résultats sont en accord avec ceux observés par [25-29]. Deux paramètres déterminants permettent de mieux expliquer la différence du taux d'érosion entre les deux modes de gestion. *Primo*, la présence de la couverture végétale permanente et la restitution des résidus en surface qui assurent une protection quasi totale du sol contre l'impact des gouttes des pluies et qui constituent une barrière de la vitesse du ruissellement [30, 31]. Dans la présente étude, pendant la période la plus érosive de l'année (décembre et janvier), le pourcentage moyen de surface couverte par la végétation sur les parcelles SDm est supérieur à 90 %, contre 30 % sur les parcelles LABe. Dans la littérature, le seuil des taux des couvertures végétales considéré comme nécessaire pour protéger efficacement la surface du sol contre l'agressivité des pluies est généralement supérieur à 40 % selon [32]; 55% selon [33]; voir plus de 70 % d'après [34, 35]. La vitesse d'infiltration de l'eau y est également en jeu. La mesure effectuée sur le même dispositif par [36] montre une différence significative entre la vitesse d'infiltration de deux parcelles comparées (LABe vs SDm), au profit des parcelles SDm.

Secundo, le non retournement du sol participe également à la réduction des taux d'érosion sur les parcelles SDm. L'absence de perturbation du sol limite la quantité de particules solides disponibles à la surface du sol qui pourraient être transportées par le ruissellement vers l'exutoire. Il en résulte que les taux du ruissellement annuel moyens et les pertes en terre annuelles moyennes y restent faibles, voire nuls, quelles que soient les caractéristiques des pluies durant la période d'expérimentation. Ce qui n'était pas le cas des parcelles LABe, où les taux du ruissellement annuel moyen et les pertes en terres annuelles moyennes varient en fonction des caractéristiques annuelles des pluies. Ce taux d'érosion sur parcelles labourées est surtout lié à l'intensité maximale des pluies; puisque le nombre de jours de pluie pendant une saison pluvieuse et la hauteur de pluie n'ont pas d'influence majeure sur le taux d'érosion

(**Tableau 2 et Figure 1**). Par exemple, au cours de la quatrième saison des pluies (A4), les averses érosives ayant une intensité maximale supérieure à 55 mm.h^{-1} sont plus importantes (**Figure 1**), il en résulte que les pertes en terre moyennes durant cette saison de pluies sont plus élevées que pour les autres années de mesures. Lors de la quatrième saison pluvieuse (A4), les pertes en terre sur les parcelles labourées atteignent jusqu'à plus de $15 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$. Ces pertes en terres dépassent le seuil de tolérance classique accepté dans les pays tropicaux, qui est estimé entre $2,2$ et 12 t.ha^{-1} , avec une moyenne de l'ordre de 10 à 11 t.ha^{-1} [37]. Le seuil de tolérance est défini par Wischmeier & Smith (1978) comme «*a maximum level of soil erosion that will permit a high level of crop productivity to be obtained economically and indefinitely*». C'est une raison pour laquelle les conditions climatiques contrastées enregistrées (**Tableau 2**) durant la période d'expérimentation n'ont pas d'effet notable sur le taux d'érosion des parcelles SDm (différence de $3 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ pour les années moins et plus érosifs). Alors que sur les systèmes LABe, la démarcation des pertes en terre entre les années la moins (A2) et la plus érosive (A4) est bien visible ($13 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$).

4-2. Effets de la restitution des résidus des cultures sur les rendements en biomasse végétale

Après une longue année des mesures (six ans), le mode de gestion n'a pas d'effet significatif sur la production de la biomasse totale; bien qu'il y ait des exceptions sur les rendements en grains du haricot sur SDm (plus élevés au début de l'expérimentation, en deuxième et en quatrième année). L'absence de la différence significative de rendements entre les deux systèmes comparés (SDm vs LABe) laisse supposer que dans le contexte étudié : cas du sol ferrallitique argileux à caractère andique, stable, filtrant, riche en matière organique (**Tableau 1**), et fortement fertilisé, les systèmes SDm n'ont pas d'effet dépressif sur les cultures, surtout dans la production du riz et du maïs.

L'avantage tiré des systèmes SDm réside au niveau de la quantité de la biomasse restituée au sol, plus importante par rapport aux systèmes conventionnels de labour avec exportation des résidus des cultures (LABe). En se référant, aux résultats de l'étude en cours, la totalité de la quantité de la biomasse restituée est de $29,12 \text{ t.ha}^{-1}$ soit une moyenne annuelle de l'ordre de $4,9 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$, contre $0 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ pour les systèmes LABe. La restitution de ces résidus de cultures va améliorer le statut organique des sols sous-systèmes SDm [11, 38]. Par rapport aux études antérieures sur les rendements des cultures en systèmes SCV et labourés, les résultats en cours vont à l'encontre de la majorité. [39] a trouvé une augmentation des rendements moyens en riz pluvial dès la première année de transition en systèmes SCV et par la suite une augmentation progressive au fil du temps; [40] a avancé qu'à partir de la troisième année de la mise en place des systèmes SCV, une augmentation significative des rendements en riz pluvial de 10 à 15 % est constaté par rapport au pratique traditionnel de labour. Par suite de la divergence des résultats obtenus; les effets des systèmes SCV et de labour conventionnel sur les rendements des cultures restent encore une question complexe, et méritent une mise en place des dispositifs expérimentaux sur des milieux contrôlés et des milieux paysans ; tout en tenant compte les diversités pédoclimatiques, les natures des cultures, les types d'association et de rotation, les niveaux de la fertilisation (sans apport, faibles, moyens et forts), et la toposéquence. Des études plus fines sur la croissance et le développement des plantes cultivées seraient également sollicitées.

5. Conclusion

Après six années d'études de rotation biennale maïs+haricot/riz sur la station expérimentale à Andranomanelatra-Antsirabe, Madagascar, il a été déduit que les systèmes des cultures en semis direct sous couverture végétale permanente (SDm) sont une des pratiques agricoles proposées pour une gestion conservatoire des sols et des eaux. Ils réduisent d'une manière significative le ruissellement et les pertes en terre. L'effet de la pratique est plus efficace sous des pluies intenses. L'adoption d'un tel système est considérée comme un outil prometteur pour limiter la dégradation du sol sur le continuum colline bas-fonds, où cet endroit est régulièrement confronté aux problèmes d'inondation, d'ensablement (zones basses), d'érosion (zones des montagnes) et du cyclone (en moyenne, trois à quatre cyclones touchent annuellement la Grande-Ile). Quant aux rendements des cultures, dans le contexte étudié, une absence de différence significative est constatée entre les deux systèmes comparés (SDm vs LABe). Mais pour obtenir des informations plus fines sur l'effet des systèmes SDm sur les rendements des cultures à Madagascar, des études menées sur des milieux ayant des conditions pédoclimatiques contrastées seront fortement sollicitées.

Références

- [1] - FAOSTAT (<http://faostat.fao.org/>), in Rapport spécial : mission FAO/PAM d'évaluation de la sécurité alimentaire à Madagascar (octobre 2013).
- [2] - www.banquemondiale.org/fr/country/madagascar (2012).
- [3] - P. SEGALIN, « *Les sols ferrallitiques, en Afrique et en Extrême-Orient, Australie, Océanie. Conclusions Générales* », Etudes et Thèses, ORSTOM, Paris, *Tome 3, 204 pages (1995)*.
- [4] - J. P. RAISON, « *Les Hautes Terres de Madagascar et leurs confins occidentaux* ». Paris, ORSTOM KARTHALA, *2t, 605pages (1984)*.
- [5] - E. RAMANANKASINA and L. RABEHARISOA, « La terre, un héritage à bien gérer ». Actes du Colloque scientifique international « Sol, environnement et développement » organisé dans le cadre de la célébration du centenaire de l'AcNALS (Académie Nationale des Arts, des Lettres et des Sciences), (49), (2003), 43-50.
- [6] - B. MINTEN and E. RALISON, « Environnement, agriculture et pauvreté ». In: *Agricultures, pauvreté rurale et politiques économiques à Madagascar : Randrianarison L. (Ed.). (2003)*.

- [7] - C. M. COUGHENOUR and S. CHAMALA, «Conservation tillage and cropping innovation. Constructing the new culture of agriculture». Ames (USA): Iowa State University Press, (2000).
- [8] - O. HUSSON and RAKOTONDRAMANANA, « Voly rakotra : Mise au point, évaluation et diffusion des techniques agro-écologiques à Madagascar ». Articles et posters présentés au troisième congrès mondial d'agriculture de conservation, Nairobi, Kenya, Groupement Semis Direct de Madagascar, 67 pages, Octobre (2005).
- [9] - L. SEGUY, S. BOUZINAC, A. MARONEZZI, E. SCOPEL, J. L. BELOT and J. MARTIN, «The success of no tillage with cover crops for savannah regions from destructive agriculture with soil tillage to sustainable agriculture with direct seeding mulch based systems: 20 years of research of Cirad and its brazilian partners in cerrados in Brazil». In "Il Congresso Mundial sobre Agricultura conservacionista", Ponta Grossa, Brazil, (2003).
- [10] - F. REY, J.L. BALLAIS, A. MARRE and G. ROVERA, «Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface», Geoscience de surface, (336), (2004), 991-998.
- [11] - T. RAZAFIMBELO, A. ALBRECHT, I. BASILE, D. BORSCHNECK, G. BOURGEON, C. FELLER, H. FERRER, R. MICHELLON, N. MOUSSA, B. MULLER, R. OLIVER, C. RAZANAMPARANY, L. SEGUY and M. SWARC, «Effet de différents systèmes de culture à couverture végétale sur le stockage du carbone dans un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar», Etude et Gestion des sols, (13), (2), (2006), 113-127.
- [12] - A. FINDELING, S. REY and E. SCOPEL, « Modeling the effects of partial residue mulch on runoff using a physically based approach», J.Hydrol, (275), (2003), 49-66.
- [13] - E. SCOPEL, J. M. DOUZET, F.A. MACENA DA SILVA, A. CARDOSO, J.A. MOREIRA, A. FINDELING and M. BERNOUX, « Impacts des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale (SCV) sur la dynamique de l'eau, de l'azote minéral et du carbone du sol dans les Cerrados brésiliens ». Cahiers Agricultures, (14), (2005), 71-75.
- [14] - E. BLANCHART, M. BERNOUX, X. SARDA, M. SIQUEIRA NETO, C. C CERRI, M. PICCOLO, J. M. DOUZET, E. SCOPEL and C. FELLER, « Effect of direct seeding mulch-based systems on soil carbon storage and macrofauna in Central Brazil », Agriculture Conspectus Scientificus, (72), (1), (2007), 81-87.
- [15] - B. RABARY, S. SALL, P. LETOURMY, O. HUSSON, E. RALAMBOFETRA, N. MOUSSA and J. L. CHOTTE, « Effects of living mulches or residue amendments on soil microbial properties in direct seeded cropping systems of Madagascar », Applied soil Ecology, (39), (2008), 236-243.
- [16] - Collectif SOL-SCV, « Sols tropicaux, pratiques SCV, Service éco systémique », acte de séminaire international sur le SCV à Antananarivo, (2008), 39 pages.
- [17] - M. C. PEEL, B. L. FINLAYSON and T. A. MCMAHON, « Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification », Hydrology and Earth System Sciences, (11), (2007), 1633-1644.
- [18] - World reference base for soil resources, « International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps », World Soil Resources Reports N°106. FAO, Rome. 181 pages (2014).
- [19] - N. W. HUDSON, « Field measurement of soil erosion and runoff », FAO soils bulletin, N °68, 139 pages (1993).
- [20] - C. D. BONHAM, « Measurements for Terrestrial Vegetation », John Wiley and Sons, New York, USA, 352 pages (1989).
- [21] - J. GUTIERREZ and I. I HERNANDEZ, « Runoff and interrill erosion as affected by grass cover in a semi-arid rangeland of northern Mexico », Journal of Arid Environments, (34), (1996), 287-295.
- [22] - P. LEVANG and M. GROUZIS, « Méthode d'étude de la biomasse herbacée des formations Sahéliennes: application à la Mare d'Oursi, Haute-Volta », Acta Oecologica, Oecol. Plant, 1(15), (3), (1980), 231-244.
- [23] - W. D. KEMPER and R. C. ROSENEAU, « Aggregate stability and size distribution », In A. Klute (édition) "Methods of soil analysis". Part, 2ème édition. Agronomie Monograph, 425-441 (1986).
- [24] - P. DAGNELIE, « Théorie et méthodes statistiques », 463 pages (1975).
- [25] - R. LAL, « Soil erosion on alfisols in Western Nigeria: I. Effects of slope, crop rotation and residue management », Geoderma, (16) (5) (1976), 363-375.

- [26] - E. ROOSE, « *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)* » Bulletin pédologique de la FAO, Vol 70, 420 pages, (1994).
- [27] - B. BARTHÈS and E. ROOSE, « *Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels* », Catena, (47), (2002), 133-149.
- [28] - K. JIN K, W.M. CORNELIS, D. GABRIELS, W. SCHIETTECATTE, D. DE NEVE, J. LU, T. BUYSSE, H. WU, D. CAI, J. JIN and R. HARMANN, « *Soil management effects on runoff and soil loss from field rainfall simulation* », Catena, (75), (2008), 191-199.
- [29] - J. A. GÓMEZ, T. O. SOBRINHO, J. V. GIRÁLDEZ and E. FERERES, « *Soil management effects on runoff, erosion and soil properties in an olive grove of Southern Spain* » Soil & Tillage Research, (102), (2009), 5-13.
- [30] - A. FINDELING, S. RUY and E. SCOPEL, « *Modeling the effects of partial residue mulch on runoff using a physically based approach* », J.Hydrol, (275), (2003), 49-66.
- [31] - K. P. C RAO, T. S. STEENHUIS, A. L. COGLE, S. T. SRINIVASAN, D. F. YULE and G. D SMITH,, Rainfall infiltration and runoff from an Alfisol in semi-arid India. I. No-till systems. Soil Till. Res. (48), (1998), 51-59.
- [32] - J. G. MCIVOR, J. WILLIAMS and C. J. GARDENER, « *Pasture management influences runoff and soil movement in the semi-arids tropics* », Australian Journal of Experimental Agriculture, Vol 35, (1995), 55-65.
- [33] - D. J. SNELDER and R. B. BRYAN, « *The use of rainfall simulation tests to assess the influence of vegetation density on soil loss on degraded rangelands in the Baringo District, Kenya* », Catena, vol. 25 (1995), 105-116.
- [34] - K. JIN, W. M. CORNELIS, D. GABRIELS, M. BAERT, H. J. WU, W. SCHIETTECATTE, D. X. CAI, S. DE NEVE, J. Y. JIN, R. HARTMANN and G Hofman, « *Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses* », Catena, 78, (2009) 81-86.
- [35] - G. SANJARI, B. YU, H. GHADIRI, C. A. A. CIESIOLKA and C. ROSE, « *Effects of time-controlled grazing on runoff and sediment loss* », Australian Journal of Soil Research, (47), (2009) 796-808.
- [36] - J. M. DOUZET, E. SCOPEL, B. MULLER, J. RAKOTOARISOA, A. ALBRECHT and N. C. RAZAFINDRAMANANA, « *Effets des systèmes de cultures en semis direct avec couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des cultures pluviales des Hautes-terres de Madagascar* », Étude et Gestion des Sols, 17, (2) (2010), 131-142.
- [37] - D. MANDAL, K. S. DADHWAL, O. P. S KHOLA, and B. L. DHAYNI, « *Adjusted T values for conservation planning in Northwest Himalayas of India. Journal of Soil and Water Conservation* », (61), 6, (2006), 391-397.
- [38] - J. RAKOTOARISOA, R. OLIVER, J. DUSSERRE, B. MULLER, J.-M. DOUZET, R. MICHELLON, N. MOUSSA, L. A. RAZAFINJARA, C. RAJERARISON and E. SCOPEL, « *Bilan de l'azote minéral au cours du cycle du riz pluvial sous-systèmes de culture en semis direct sous couverture végétale en sol ferrallitique argileux à Madagascar* », Étude et Gestion des Sols, 17 (2) (2010) 169-186.
- [39] - G. BRUELLE, « *Pertinence de l'agriculture de conservation pour tamponner les aléas climatiques: cas des systèmes de culture en riz pluvial au Lac Alaotra, Madagascar* », Thèse, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques-Université d'antananarivo-Montpellier SupAgro, 92 pages (2014).
- [40] - E. PENOT and T. ANDRIATSITOHAINA, « *Savoirs, pratiques, innovations et changement de paradigme de l'agriculture dans la région du lac Alaotra (Madagascar)* » Géoconfluences.(Dossier Afrique subsaharienne, territoires et conflits), (2011).

II. PUBLICATIONS DANS DES REVUES SANS COMITE DE LECTURE

2.1. ANDRIAMANIRAKA H., Rabeharisoa L., Michellon R., Moussa N., Morel C., 2008. Bilan des apports et des exportations de phosphore dans des sols Malgaches cultivés selon deux systèmes de culture, l'un avec semis direct sur couvert végétal et l'autre avec labour. Terre malgache (26, sp) : 61-63.

Bilan des apports et des exportations de phosphore dans des sols Malgaches cultivés selon deux systèmes de culture, l'un avec semis direct sur couvert végétal et l'autre avec labour

H. Andriamaniraka^{1*}, L. Rabearisoa², R. Michellon³, N. Moussa⁴, C. Morel⁵

(1) Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Agriculture, BP 175 Ankatso 101 Antananarivo, Madagascar, i_harilala@yahoo.fr ou handriam@bordeaux.inra.fr

(2) Université d'Antananarivo, Laboratoire des Radio Isotopes, Service de la Radioagronomie, BP 3383, Route d'Andraisoro, 101 Antananarivo, Madagascar, lrabehar@refer.mg

(3) CIRAD/ONG Tafa, BP 266, 110 Antsirabe, Madagascar, michellon@cirad.mg

(4) ONG Tafa, BP 266, 110 Antsirabe, Madagascar

(5) UMR INRA-ENITAB Transfert sol-plante et Cycle des Eléments Minéraux dans les écosystèmes cultivés (TCM), BP 81, 33883 Villenave-d'Ornon cedex, France, morel@bordeaux.inra.fr

Introduction

Madagascar est une île-continent de 581 000 km² avec 17 millions d'habitants dont les ¾ sont impliqués dans une activité agricole essentiellement manuelle. La surface agricole utile n'est actuellement que d'environ 3,5 millions d'hectares et la production agricole est loin de couvrir les besoins alimentaires de la population. La région des Hautes Terres, localisée autour de la capitale Antananarivo, possède de larges superficies encore peu valorisées pour l'agriculture. Si les fonds de vallée sont déjà largement occupés et cultivés principalement en riz inondé, les versants des collines, appelées « tanety », sont encore très peu exploités et constituent un gisement important de surfaces cultivables qui permettrait d'augmenter significativement le potentiel de la production agricole de Madagascar.

Des chercheurs du CIRAD et leurs partenaires ont proposé et étudié depuis plusieurs années des systèmes de cultures avec semis direct sur couverture végétale (SCV) conçus pour augmenter et maintenir la productivité de ces sols tout en les protégeant afin de minimiser les pertes par érosion des nutriments (Séguy et al., 2006 ; Husson et al., 2006).

Les facteurs susceptibles de limiter la production agricole naturelle de ces écosystèmes sont probablement multiples. Mais le phosphore est souvent désigné comme un facteur clé de l'amélioration de la fertilité de ces sols et nombreuses études mentionnent des gains importants de productivité obtenus de systèmes de culture incluant des apports de phosphore, même modérés (Oberson et al., 1996).

L'objectif de cet article est de présenter les différents flux impliqués dans le cycle du phosphore afin de calculer et comparer le bilan annuel et cumulé de P en fonction des différents systèmes de culture.

Matériels et méthodes

Les dispositifs utilisés sont les dispositifs d'Andranomanelatra, de Bemasoandro (les deux sur un sol ferrallitique argileux) et de Betafo (sur une zone de volcanisme récent) qui ont été mis en place et suivis par l'ONG Tafa avec l'appui du CIRAD, depuis de nombreuses années. De plus, ces dispositifs ont été récemment étudiés par Razafimbelo (2005) sur le thème de l'effet du système de cultures sur le stockage de carbone dans le sol.

Les dispositifs expérimentaux comprennent de nombreux systèmes de culture incluant le mode de préparation et de semis des sols (Semis direct ou Labour : Lb), des niveaux et des types de fertilisations variables (F1 : fumier de ferme et F2 : fumier de ferme+engrais minéraux+dolomie) ainsi que de nombreuses variantes de couverture végétale. Dans le cadre de ce travail nous avons sélectionné quatre traitements (SCV_F2, SCV_F1, Lb_F2 et Lb_F1) présents dans les trois dispositifs.

Pour la détermination du bilan de phosphore à l'échelle de la parcelle cultivée, une méthode de calcul du bilan de phosphore implique le suivi des flux d'entrées de P dans la parcelle (fertilisants organiques ou minéraux) et des flux de sorties de P sous forme de produits récoltés (grain, tige, feuille, gousses...) ou de pertes vers l'environnement.

L'effet du système de culture sur le rendement annuel et cumulé ainsi que sur le bilan annuel et cumulé ont été analysés statistiquement par une analyse de variance à deux facteurs (SCV et Lb) et deux modalités de fertilisation (F1 et F2). Les écarts sont considérés comme significatifs pour un seuil de probabilité inférieur à 0.05.

Résultats

Tableau 1 : Moyenne et écart type (n=3) du rendement en grains ($t\ ha^{-1}$) cumulés pour les différents traitements

Traitement	Andranomanelatra		Bemasoandro		Betafo	
	$t\ ha^{-1}$	$\Delta\%$ SCV_F1	$t\ ha^{-1}$	$\Delta\%$ SCV_F1	$t\ ha^{-1}$	$\Delta\%$ SCV_F1
SCV_F1	14.7 (± 1.0) b	0%	3.8 (± 0.9) c	0%	8.0 (± 0.5) b	0%
SCV_F2	24.7 (± 1.9) a	+68%	12.1 (± 0.6) a	+222%	12.3 (± 2.1) a	+54%
Lb_F1	7.2 (± 2.2) c	-51%	2.2 (± 1.5) c	-43%	7.3	-10%
Lb_F2	13.1 (± 0.7) b	-11%	9.8 (± 0.9) b	+160%	11.2	+40%

Tableau 2 : Moyenne et écart type (n=3) du bilan cumulé de P ($kg\ P\ ha^{-1}$) pour les différents traitements

Traitement	Andranomanelatra	Bemasoandro	Betafo
SCV_F1	8.9 (± 2.8) c	21.7 (± 2.2) b	3.3 (± 2.1) b
SCV_F2	217.5 (± 4.1) b	145.8 (± 1.2) a	87.4 (± 6.6) a
Lb_F1	22.7 (± 7.2) c	22.9 (± 5.1) b	0.7
Lb_F2	236.5 (± 3.1) a	142.6 (± 2.1) a	81.3

ANDRIAMANIRAKA Harilala et al./Terre Malgache 26 (2008) : 61-63

Les valeurs cumulées ont été obtenues en sommant les récoltes obtenues de 1996 à 2003 pour le dispositif d'Andranomanelatra et de 1999 à 2003 pour Bemasoandro et Betafo.

Pour les trois dispositifs, le bilan cumulé de P est toujours positif mais diffère significativement entre les deux régimes de fertilisation : la modalité F1 permet d'obtenir des bilans cumulés de P légèrement positif, alors que pour F2 le bilan cumulé de P est très excédentaire puisque le surplus de P apporté est très supérieur au surplus de P exporté dans le gain de rendement.

L'effet du système de culture n'est significatif que dans une seule situation : le régime F2 du système SCV dans le dispositif Andranomanelatra qui est le plus ancien.

Conclusion

Le bilan de P, cumulé sur la période d'expérimentation, varie d'un facteur proche de 10 à 20 avec le régime de fertilisation mais n'est que peu affecté par les systèmes SCV ou labour. L'effet du système SCV n'est vraiment remarquable qu'après plusieurs années de son installation, c'est le cas du dispositif d'Andranomanelatra par rapport aux deux autres qui sont plus récents.

Références bibliographiques

- Husson, O., L. Séguy, R. Michellon and S. Boulakia, 2006. Restoration of acid soil systems through agroecological management. Pp. 343-356. In: Biological approaches to sustainable soil systems. Ed. N. Uphoff et al. CRC Taylor & Francis.
- Oberson A., 2006. . In: Biological approaches to sustainable soil systems. Ed. N. Uphoff et al. CRC Taylor & Francis.
- Michellon R., Razanaparany C., Moussa N., Andrianasolo H., Fara Hanitriniaina J. C., Razakamanantoanina R., Rakotovazaha L., Randrianaivo S., Rakotoniaina F., 2004. Rapport de campagne 2002-2003 Hautes Terres et Moyen Ouest, 98p
- Morel C., 2002. Caractérisation de la phytodisponibilité du phosphore du sol par la modélisation du transfert des ions phosphates entre le sol et la solution. HDR, 80p
- Rabeharisoa L., 2004. Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des hautes terres de Madagascar. Thèse de Doctorat de l'Université D'Antananarivo, Spécialité : science du sol. 202p.
- Razafimbelo T., 2005. Stockage et protection du carbone dans un sol ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des hautes terres malgaches. Thèse de Doctorat en Science du Sol de l'ENSAM, 123p.
- Séguy L., Bouzinac S. and Husson O., 2006. Direct-seeded tropical soil systems with permanent soil cover. Pp. 323-342. In: Biological approaches to sustainable soil systems. Ed. N. Uphoff et al. CRC Taylor & Francis.

III. COMMUNICATIONS POSTERS DANS DES CONGRES INTERNATIONAUX

3.1. Morel C., ANDRAMANIRAKA H., Castillon P., Denoroy P., Ericson L., Hanocq D., Kvarnström E., Michellon R., Moussa N., Plénet D., Rabeharisoa L., 2009. Predicting soil phosphorus availability to plants in cropped soils. L'Europe de la fertilisation 3-4 février 2009, Rennes, France.

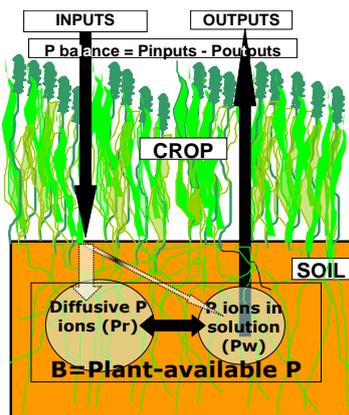
Predicting soil phosphorus availability to plants in cropped soils

C. MOREL^{*}(morel@bordeaux.inra.fr), H. ANDRIAMANIRAKA, P. CASTILLON, P. DENOROY, L. ERICSON, D. HANOCQ, E. KVARNSTRÖM, R. MICHELLON, N. MOUSSA, D. PLÉNET, L. RABEHARISOA
^{*}UMR 1220 INRA TCEM BORDEAUX, FRANCE

Phosphorus (P) loss from agricultural soils to surface waters are linked to excessive accumulation of available P in soils. To improve soil P management, it is necessary to gain insight the understanding of biological and physico-chemical processes that control the soil P availability to plants. Currently, limitations are due to the way we assess plant-available soil P by chemical extractions. Advances has been gained using a biogeochemical assessment in which (1) the P forms that are absorbed are the phosphate ions (Pi) both $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} ; and (2) the driving force that timely governs the replenishment of Pi in solution is the diffusion at the solid-to-solution interface of soil. The diffusive Pi corresponds to soil P that replenish solution under a gradient of Pi concentration between both soil phases.

This study examines the ability of an integrative and mechanistic model that described the functioning of P cycling to simulate and predict changes in plant-available soil P (dissolved plus diffusive Pi) at the field scale after about a decade of cropping for different soil types.

Simplified P cycling representation



P inputs: fertilization (atmospheric deposition, seeds, irrigation were neglected)

P outputs: P exported in grain (loss of P by leaching, run-off and erosion, subsurface flow were neglected).

Plant-available soil P: the fraction of total P in soil that can participate to the plant nutrition.

MATERIAL AND METHODS

Plant-available soil P

was assessed using a biogeochemical sound approach as the sum of Pi in solution (Pw) plus diffusive soil Pi (Pr) for one year (1yr).

$$B = Pw + Pr \quad [1]$$

Both Pr and Pw (mg P kg⁻¹) were determined in soil suspensions at steady-state (Volume-to-Mass ratio=10) using an isotopic labeling and dilution kinetic method. Dynamics of Pr vs. Pi concentration in solution (Cp, mg P/L) and time (t) were described by the following kinetic Freundlich equation:

$$Pr = v Cp^w t^p \quad (\text{with } Pr < P_{min}).$$

Then, we calculate the values after one year (Pr_{1yr}), the amount of soil diffusive Pi that equilibrates Pi in solution for one year under the gradient of concentration between both phases

Field experiments

8 field experiments on P fertilization were considered. All were tilled and cultivated under annual crops (maize, wheat) for about a decade. Soil samples were collected from the arable layer, air-dried, sieved (<2mm) and stored before determining Pr vs. (Cp,t) dynamics.

Among experiments, five were located in France, one in Sweden and two in Madagascar.

SYMBOLS for field experiments

- ▲: French soil (Aquitaine area, Tartas)
- and ○: French Podzols (Aquitaine (Pierroton) and Sologne area (Presly))
- ◇: French Luvisol (Champagne area, Janvilliers)
- ◆: French soil (Britannia area (Bignan))
- △: Swedish Podzol (North-west area, Umea)
- and □: Ferralsols of Malagasy Highlands

Modeling P cycling at the ecosystem scale

P cycling was described applying the mass conservation law to the plant-available soil P. We use bulk density and depth of arable layer to convert mg P kg⁻¹ into kg P ha⁻¹.

The unknown final B value (Bf) after P balance affected the initial B value (Bi) was determined as follows:

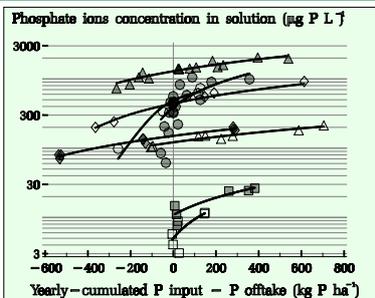
$$Bi + (P \text{ balance}) = Bf \quad [2]$$

Bi was calculated considering initial Cp value (the Cp values when P balance is nil), a timescale of 1 year and the kinetic Freundlich equation.

We consider a P balance of +1 kg P ha⁻¹.

We calculate final Cp value solving Eq. [2] by an iterative procedure.

Finally, the simulated Cp change (μg P L⁻¹)/(kg P ha⁻¹) was obtained as the variation between Cpf and Cpi, and compared to field-observed value.



Dynamics of Cp vs. P balance in fields

For all experiments, the measured Cp values were highly and closely correlated to the cumulated P balance by linear regressions. Both slope and intercept varied between sites. The experimental Cp change per unit of P balance, the slope, ranged from 0.04 in Madagascan Ferralsols (■, □) to 2.25 (μg P L⁻¹)/(kg P ha⁻¹) for the highly sandy French podzol (●). The Cpi value defined as the y intercept, ranged from 5 to 1289 μg P L⁻¹.

RESULTS

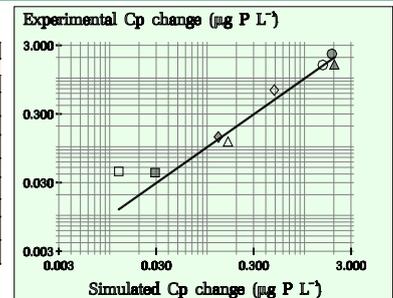
Results derived from laboratory experiences									
Site	v	w	p	Pr(Cp,1yr)	Bi	Bi	Cpf	Cpf-Cpi	
				mg/kg soil	mg/kg soil	kg P/ha	μg P/L	μg P/L	
●	0.67	0.27	0.45	186	190	3750	712	392	1.91
▲	1.88	0.72	0.36	243	256	3400	871	1291	2.03
○	1.67	0.54	0.36	127	132	4200	555	474	1.54
◇	21.0	0.45	0.26	461	465	4200	1955	440	0.49
◆	16.8	0.33	0.34	832	834	4200	3502	150	0.13
△	8.1	0.39	0.39	628	629	3000	1888	122	0.16
■	21.6	0.45	0.39	454	454	1800	817	11	0.03
□	40.0	0.38	0.35	538	538	2000	1075	5	0.01

Dynamics of diffusive soil P in laboratory

As usual for a given soil, the Pr and Cp experimental values obtained in batch experiments highly and significantly fitted to kinetic Freundlich equations with (v,w,p) parameters depending on soil types (Table). These (calibrations were used to calculate Pr after 1 year when Cp=Cpi and then the sum of Pw+Pr(1yr) to assess initial plant-available soil P (Bi) expressed in kg P ha⁻¹.

Simulations of changes in available soil P

We then considered that 1 kg P ha⁻¹ was added to Bi to obtain Bf. We calculated iteratively with Eq. [1] and [2], the Cpf value associated to Bf. Finally, the simulated change in Cp, Cpf-Cpi, was obtained (last column of table) and compared to experimental Cp change (slope)



Modeling changes in plant-available soil P

We compared the laboratory-simulated and field-measured changes in Cp (Fig. 2). The log-log scales of this figure was used to clearly visualize all data since two orders of magnitude was explored on Cp change. The full black line is the following linear regression: $y=0.984(0.070)x$, 8 obs., $r^2=0.967$. This regression is not significantly different to the 1:1 line. The proposed biogeochemical assessment of soil P bioavailability in laboratory experiments, Pi in solution plus diffusive Pi, is capable to predict observed modifications in field conditions after long periods of cultivation.

CONCLUSIONS

This study emphasized for different soils types, cropped for about a decade, that the plant-available soil P can be assessed as the sum of ionic P in solution plus ionic P on soil that can diffuse to solution. This model is regarded as an interesting, relevant and reliable tool to calculate P inputs for all cropped soils.



3.2. ANDRIAMANIRAKA H., Andriampenomanana S. V., Falinirina M. V., Rasoamanana A., 2013. Détermination d'une dose efficace de l'engrais biologique phosphaté Guanotsar pour une meilleure productivité dans la culture de concombre. 11^{èmes} Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse au Palais des Congrès du Futuroscope à Poitiers, 20 et 21 novembre 2013, Poitiers, France.

DÉTERMINATION D'UNE DOSE EFFICIENTE DE L'ENGRAIS BIOLOGIQUE PHOSPHATÉ GUANOTSAR POUR UNE MEILLEURE PRODUCTIVITÉ DANS LA CULTURE DE CONCOMBRE

Jaona Harilala ANDRIAMANIRAKA⁽¹⁾ [jharilala@gmail.com], Samoelina Vononantenaina ANDRIAMPENOMANANA⁽²⁾, Marie Virginie FALINIRINA⁽³⁾, Alexandra RASOAMANANA⁽¹⁾

(1) : Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Agriculture, BP 175 Ankato Antananarivo 101,

(2) : Société GUANOMAD Madagascar, BP 3438 Antananarivo 101,

(3) : Université de Fianarantsoa, Institut Supérieur de Technologie Amboitra (ISTA).

INTRODUCTION

Dans le souci de la préservation de l'environnement tout en produisant mieux, la fertilisation biologique est la solution incontournable dans le domaine de la culture annuelle comme la culture légumière. L'accès à ce type d'engrais n'est pas toujours facile et la connaissance de la dose qui correspond aux besoins de la plante n'est pas non plus évidente surtout pour les paysans.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'expérimentation au champ a été menée à Anevoaka dans le district de Moramanga, région Alaotra Mangoro. Deux variétés de concombre étaient utilisées : variété locale « Vanga » et variété introduite « Marketer ». Le concombre, qui est une plante à cycle court, a été utilisé pour éviter tout problème lié aux contraintes climatiques. L'essai au champ comporte 3 blocs correspondant aux 3 répétitions des traitements étudiés où ils sont repartis au hasard dans chaque bloc.

Les engrais utilisés et leurs caractéristiques

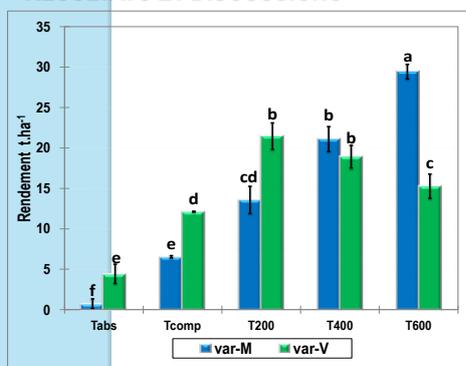
Le **GUANOTSAR**, engrais biologique, est un subtil mélange de Bat Guano de très haute qualité et de Phosphate naturel.

Tableau : Les différents traitements avec les quantités d'engrais apportées

TRAITEMENTS	CARACTERISTIQUES	GUANO (Kg.ha ⁻¹)	COMPOST (t.ha ⁻¹)
T abs	Témoin absolu	0	0
T comp	Témoin à compost	0	5
T200	Guanotsar + compost	200	5
T400	Guanotsar + compost	400	5
T600	Guanotsar + compost	600	5

Le **COMPOST** utilisé provient du terreau d'Andralanitra, produit issu d'un criblage de déchets urbains âgés de plus de quarante ans.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS



La variété introduite Marketer a un rendement proportionnel à l'accroissement de la dose. Elle a donné des rendements meilleurs avec la dose la plus élevée, alors que pour la variété locale ce meilleur rendement a été obtenu avec une dose faible. En effet, pour le Marketer avec la dose 600 kg.ha⁻¹ le rendement enregistré était de 29,44 t.ha⁻¹ contre 21,47 t.ha⁻¹ pour le Vanga à seulement 200 kg.ha⁻¹. Ces différences s'expliquent par la faculté d'adaptation de la variété locale.

La dose efficiente qui peut donner des meilleurs rendements et plus rentable était la 600 kg.ha⁻¹ avec la variété Marketer. En effet, pour cette dose d'engrais la différence de gain obtenu par rapport à celui obtenu avec la variété Vanga en terme de valeur ajoutée est de 4 092 600 Ar par hectare. La dose 200 kg.ha⁻¹ pour la variété Vanga a été identifiée comme optimale même si le rendement obtenu est moins faible par rapport à celui obtenu avec la variété Marketer.

Trait	MO	Var	Rdt (kg/ha)	Capital Investi (CI) (Ar)	Produit brut (PB) (Ar)	Valeur Ajoutée Brute (VAB) (Ar)	Ratios	
							VAB/CI	VAB/MO
T abs	724	M	733	5 266 600	439 800	-4 826 800	-0,92	-6 666,85
		V	4 431	4 977 800	2 658 600	-2 319 200	-0,47	-3 203,31
T comp	741	M	6 534	5 809 100	3 920 400	-1 888 700	-0,33	-2 548,85
		V	12 120	5 520 300	7 272 000	1 751 700	0,32	2 363,97
T200	741	M	13 572	6 009 100	8 143 200	2 134 100	0,36	2 880,03
		V	21 471	5 720 300	12 882 600	7 162 300	1,25	9 665,72
T400	741	M	21 103	6 209 100	12 661 800	6 452 700	1,04	8 708,10
		V	18 927	5 920 300	11 356 200	5 435 900	0,92	7 335,90
T600	741	M	29 440	6 409 100	17 664 000	11 254 900	1,76	15 188,80
		V	16 628	6 120 300	9 976 800	3 856 500	0,63	5 204,45

D'après l'analyse économique des coûts de productions et du rapport de la valeur ajoutée brute avec les charges de la production (ou capital investi), l'investissement à la variété Marketer avec la dose à T₆₀₀ augmente le plus le capital investi du fait que le rendement est de 29 t.ha⁻¹ avec une différence de 8 t.ha⁻¹ avec le rendement optimum de la variété Vanga.

CONCLUSION

Aux termes de nos essais, on a pu révéler que la dose efficiente de l'engrais biologique phosphaté Guanotsar dépend de la variété des cultures utilisées suite à sa faculté d'adaptation.

3.3. Falinirina M. V., Masse D., ANDRIAMANIRAKA H., Rabeharisoa L., 2013. Effets de la quantité et de la qualité de l'apport de résidus organiques sur la minéralisation du carbone et de l'azote organique dans les ferralsols. 11^{èmes} Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse au Palais des Congrès du Futuroscope à Poitiers, 20 et 21 novembre 2013, Poitiers, France.

Effets de la quantité et de la qualité de l'apport de résidus organiques sur la minéralisation du carbone et de l'azote organique dans les ferralsols

Marie Virginie Falinirina⁽¹⁾, Dominique Masse⁽²⁾, Harilala Andriamaniraka⁽³⁾, Lilia RABEHARISOA⁽⁴⁾

(1) Université de Fianarantsoa, Institut Supérieur de Technologie d'Ambositra (ISTA), Batiment ex HODIMA Ambositra 306, MADAGASCAR

(2) UMR Eco&Sols - Ecologie Fonctionnelle & Biogéochimie des Sols & des Agroécosystèmes - (IRD SENEGAL)

(3) Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Agriculture, BP 175 Ankatso 101Antananarivo, Madagascar

(4) Laboratoire des Radio Isotopes, Service de la Radioagronomie, BP 3383, Route d'Andraisoro, 101 Antananarivo, Madagascar

CONTEXTE

A Madagascar, les pratiques agricoles de fertilisation et d'amendement des sols cultivés sont traditionnellement basées sur le recyclage de résidus organiques. La qualité des produits utilisés et les modes d'apports au sol sont très divers. Peu d'études sur la dynamique d'apport organique dans le sol ont abordé la question sous l'angle de la technique de l'apport localisé dans le sol. Ce mode d'apport permet de réduire les quantités de résidus organiques nécessaires par unité de surface.

METHODOLOGIE

1-Incubation des sols et 3 types de résidus organiques à dose d'apport croissante pendant 60 jours à 28°C. Les matières testées sont:

- **Fumier** de bovin

- **Terreau** de la décharge de déchets solides urbains d'Andralanitra (t). Un produit du criblage des déchets prélevés dans les zones de stockage des déchets urbains, ayant subi un compostage naturel

- **Compost** Zinabio (c) : composé de déchets d'abattoir (93,5%), sciure de bois (2,6%), de déchets verts (1,29%) et de refu (2,59%)

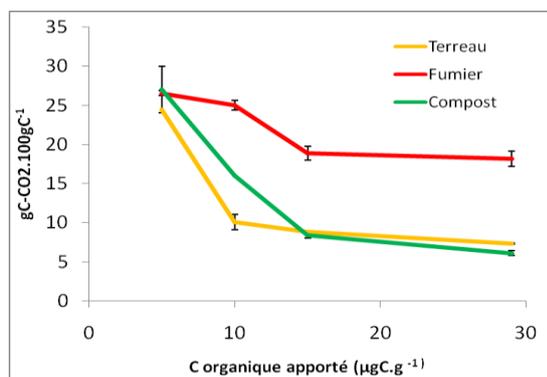
Dose d'apport: 5 $\mu\text{g C.g}^{-1}$, 10 $\mu\text{g C.g}^{-1}$, 15 $\mu\text{g C.g}^{-1}$ et 29 $\mu\text{g C.g}^{-1}$ respectivement pour les doses 0 ; 0,5 ; 1 ; 1,5 et 3.

2-Mesure de minéralisation de carbone par piégeage de CO_2 dans la soude, -Mesure d'azote minérale par extraction au KCL.

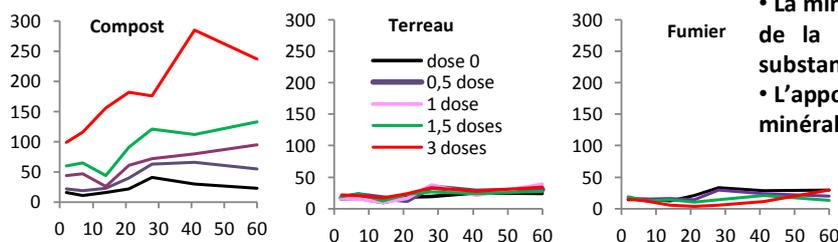
Les CO_2 piégés dans la soude et la concentration de NH_4^+ et NO_3^- dans le KCL sont analysées par colorimétrie en flux continu

RESULTATS

C-CO₂ respiré après 60 jours par unité de C apporté sous forme organique en fonction de la quantité de C organique apporté



NO₃+NH₄ en fonction du nombre de jour d'incubation pour des doses d'apport croissantes et des 3 types de résidus organiques



OBJECTIF

Etudier la minéralisation de résidus organiques apportés dans un sol en fonction de leurs caractéristiques et des quantités apportées afin d'évaluer leur valeur agronomique.

DISCUSSION ET CONCLUSION

- A dose d'apport faible ($5\mu\text{g C.g}^{-1}$), les taux de minéralisation de carbone sont identiques quelque soit le type de résidus organiques apportés (26%).

- Si on augmente la dose d'apport de 10 au $29\mu\text{g C.g}^{-1}$, le taux de minéralisation diminue avec les quantités apportées; L'augmentation des apports organiques impliquent des besoins croissants en azote. Si les quantités d'azote ne sont pas suffisante, cela limite la croissance microbienne et la minéralisation du C_{org}

- Les matières les plus stables présentent des diminutions du taux de minéralisation plus importantes.

* **Les C organiques apportés par le terreau et le compost se minéralisent lentement et assurent l'entretien de la matière organique du sol.**

* **L'apport en grande quantité, de façon localisée dans un sol implique une diminution de taux de minéralisation.**

- La quantité d'azote minérale est plus élevée pour le compost et augmente avec la dose d'apport

• **La minéralisation d'azote organique est fonction de la nature et de la quantité d'apport de substances organiques**

• **L'apport de compost accroît la quantité d'azote minéral du sol dont les plantes ont besoin.**

3.4. Falinirina M. V., ANDRIAMANIRAKA H., Rabeharisoa L., Razaivaovololoniaina D., Razafintsalama V., Randriamandratonirina N., Masse D., 2014. Amélioration de la qualité chimique des sols de tanety mis en culture par apport des matières organiques exogènes. 2nd international conference and immersion program, SAPREJ 28 April - 3 May 2014, Antananarivo, MADAGASCAR.

Amélioration de la qualité chimique des sols de tanety mis en culture par apport des matières organiques exogènes.

Marie Virginie Falinirina⁽¹⁾, Harilala Andriamaniraka⁽²⁾, Lilia Rabeharisoa⁽³⁾, Diamondra RAZAIVAOVOLOLONIAINA⁽¹⁾, Voahiraniaina RAZAFINTSALAMA⁽¹⁾, Nicolas RANDRIAMANDRATONIRINA⁽¹⁾, Dominique Masse⁽⁴⁾

(1) Université de Fianarantsoa, Institut Supérieur de Technologie d'Ambositra (ISTA), Ambositra 306, Madagascar,

(2) Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Agriculture, BP 175 Ankatso 101 Antananarivo, Madagascar,

(3) Laboratoire des Radio Isotopes, Service de la Radioagronomie, BP 3383, Route d'Andraisoro, 101 Antananarivo, Madagascar

(4) UMR Eco&Sols - Ecologie Fonctionnelle & Biogéochimie des Sols & des Agroécosystèmes - (IRD), Sénégal.

CONTEXTE

L'augmentation de la production alimentaire durable exigera une prévention de la dégradation des sols et restauration des sols dégradés. A Madagascar, les pertes en matières organiques des sols, suite à une mauvaise gestion des résidus organiques et aux faibles restitutions de résidus de récolte généralement brûlés ou exportés des parcelles pour l'alimentation du bétail en période de sécheresse induit une détérioration de la fertilité chimique des sols et de leur stabilité structurale.

METHODOLOGIE

1-Mise en place d'une culture de maïs sur ferralsols de tanety. Sol en jachère depuis 30 ans, de texture argileuse, de pH 6,59. La teneur en N total du sol est de 1,46 mg.g⁻¹, le COT est de 21,55 mg.g⁻¹ et le P total est de 275 mg.kg⁻¹.

2-Etude des facteurs matières organiques et facteurs engrais minéraux sur les ferralsols de tanety : Les matières organiques testées sont :

Fumier de bovin (**fum**) ; **Terreau** de la décharge de déchets solides urbains d'Andralanitra (**ter**) ; et le **Compost** (**co**) : composé de déchets d'abattoir (93,5%), de sciure de bois (2,6%), de déchets verts (1,29%) et de refu (2,59%)

3-Mesure de Carbone total (Walkley&black), d'azote total (Kjeldhal) et de phosphore Olsen des sols avant labour et après récolte pendant 3 ans.

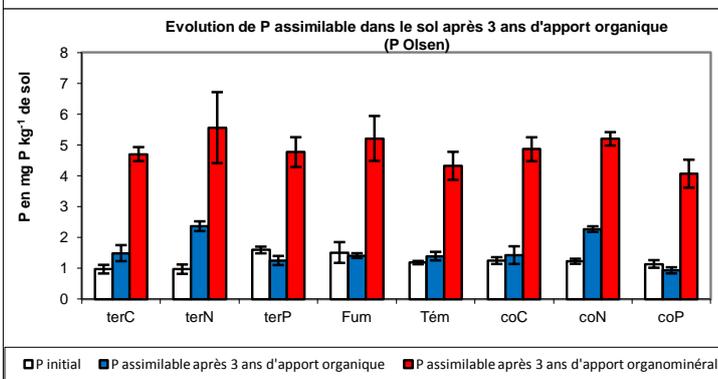
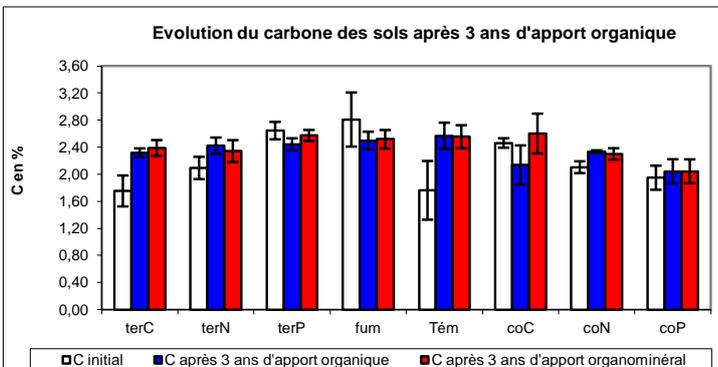
OBJECTIF

Etudier l'effet des apports organiques associés ou non à des apports d'engrais minéraux sur l'évolution des propriétés chimiques des sols.

4- Doses d'apport : Les doses de compost et terreau correspondent à la quantité de carbone, azote et phosphore dans 7,5 tonnes à l'hectare de fumier. Pour les engrais minéraux, la dose de NPK est à 300 kg.ha⁻¹.

Matière organique	Référence	Quantité de matière apportée en masse sèche (t.ha ⁻¹)		
		2006-2007	2007-2008	2008-2009
Fumier	fum	2,9	3,4	3,9
Compost	coC	3,3	3,8	4,2
Compost	coN	5,0	5,7	6,3
Compost	coP	0,8	0,9	0,9
Terreau	terC	1,1	1,1	1,1
Terreau	terN	5,2	5,1	5,1
Terreau	terP	1,1	1,0	1,0

RESULTATS



DISCUSSIONS

➤ Après 3 ans de mise en culture, ni l'apport organique sous forme de fumier, compost et terreau, ni l'apport minéral NPK n'ont pas eu d'effet sur le maintien de statut organique des sols.

Les matières organiques exogènes contiennent une concentration en C organique facilement dégradable qui permet le développement de l'activité microbienne du sol et accélère la minéralisation de C organique.

➤ Le témoin sans aucun apport et l'apport organique (fumier, terreau et compost) à faible dose n'ont pas d'effet sur le P assimilable des sols.

➤ l'apport organo-minéral et l'apport organique à dose élevée ont des effets hautement significatifs sur l'évolution de phosphore assimilable des sols.

○ L'apport de fumure minérale dans le sol augmente non seulement le P susceptible d'être prélevé par la plante dans la solution du sol mais aussi la réserve en P dans la phase solide du sol qui sera disponible par la plante après différents mécanismes de libération de phosphore.

○ Dans le cas des faibles ou moyens apports organiques, le fer et l'aluminium sont en excès par rapport à la matière organique, il y a augmentation du pouvoir fixateur du phosphore. Par contre, les fortes quantités de matières organiques ont tendance à rendre le fer ou l'aluminium plus mobile et provoque la formation de complexe P-Fe qui reste partiellement assimilables.

CONCLUSION

Les services écosystémiques des ferralsols de « tanety » et ses propriétés chimiques dépendent non seulement des caractéristiques analytiques des apports organiques mais également des quantités d'apports.

3.5. ANDRIAMANIRAKA H., ANDRIAMPENOMANANA S. V., FALINIRINA M. V., NASOLONJANAHARY T. H., 2014. Comparaison d'effets des différents types d'engrais biologiques phosphates sur une culture légumière pratiquée sur un sol ferrallitique. Journées d'Étude des Sols (JES) 2014, 01 au 03 juillet 2014, Chambéry, France.

COMPARAISON D'EFFETS DES DIFFÉRENTS TYPES D'ENGRAIS BIOLOGIQUES PHOSPHATES SUR UNE CULTURE LÉGUMIÈRE PRATQUÉE SUR UN SOL FERRALITIQUE

ANDRIAMANIRAKA Harilala ⁽¹⁾ [jharilala@gmail.com], ANDRIAMPENOMANANA Samoelina Vononantenaina ⁽²⁾, FALINIRINA Marie Virginie ⁽³⁾, NASOLONJANAHARY Tsilavo Hasina⁽¹⁾

(1) : Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Agriculture, BP 175 Ankatso Antananarivo 101,

(2) : Société GUANOMAD Madagascar, BP 3438 Antananarivo 101,

(3) : Université de Fianarantsoa, Institut Supérieur de Technologie Ambositra (ISTA).

INTRODUCTION

Face aux problèmes de fertilité des sols ferrallitiques de Madagascar sur la carence en phosphore et le souci de la dégradation de l'environnement, la fertilisation avec des engrais biologiques phosphatés est une des solutions incontournables. Actuellement à Madagascar, bon nombre d'engrais biologiques phosphatés commencent à apparaître sur les marchés agricoles. Ainsi nous devons connaître lesquels sont les plus efficaces et adaptés à nos sols.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Un essai sur la variété du haricot vert appelée « monel » a été réalisé sur un sol ferrallitique à Anevoka dans le district de Moramanga. Le haricot vert a été identifié comme plante qui intéresse les paysans locaux pour les activités génératrices des revenus. Quatre types d'engrais biologiques phosphatés (Guanomad, Guanotsar, Guanoferti-N et Guanosol) ont été testés et ils ont été comparés avec le témoin sans fertilisant ou témoin absolu et le témoin à fumier.

Tableau 1 : Les caractéristiques des engrais utilisés

	GUANOMAD	GUANOTSAR	GUANOFERTI-N	GUANOSOL	FUMIER
N (%)	3 - 5	5 - 7	6 - 8	-	1,1
P ₂ O ₅ (%)	11 - 15	25 - 45	6,5 - 7,5	7 - 10,5	0,5
K ₂ O (%)	0,9 - 2	1,5	0,7 - 1	1- 2	0,5
MO (%)	19,4 - 28,7	30 - 40	25 - 30	35 - 60	14,2

Tableau 2 : Les différents traitements avec les quantités d'engrais apportées

TYPES D'ENGRAIS	TRAITEMENTS	GUANO (kg.ha ⁻¹)	FUMIER (kg.ha ⁻¹)
GUANOMAD (GM)	GM4	400	5 000
	GM5	500	5 000
	GM6	600	5 000
GUANOTSAR (GT)	GT3	300	5 000
	GT4	400	5 000
	GT6	600	5 000
GUANOFERTI-N (GN)	GN3	300	5 000
	GN4	400	5 000
	GN6	600	5 000
GUANOSOL (GS)	GS4	400	5 000
	GS6	600	5 000
	GS8	800	5 000
TÉMOIN À FUMIER	Tfu	0	5 000
TÉMOIN ABSOLU	T0	0	0

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

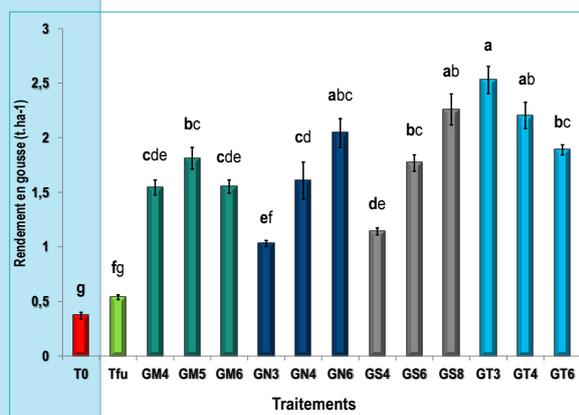


Figure 1 : Rendement en gousse (t.ha⁻¹)

Pour le Guanotsar (GT), le rendement diminue avec la dose. Toutefois, le meilleur rendement de 2,53 t.ha⁻¹ est obtenu avec le Guanotsar à faible dose (300 kg.ha⁻¹) alors qu'à 600 kg.ha⁻¹ le rendement enregistré était de 1,90 t.ha⁻¹. Par rapport aux autres types de fertilisant guano, le Guanotsar est très riche en phosphore car il est obtenu par la combinaison de Guanomad avec de phosphore naturel ayant une quantité très importante en anhydride phosphorique (20-35%). De ce fait, si on augmente la dose de Guanotsar apportée, la teneur en P devient élevée et la valeur critique est atteinte, mais, celle-ci favorise la non disponibilité de cet élément par la plante (Andriamaniraka, 2009). Ainsi, l'apport des engrais très riches en phosphore à la dose élevée entraîne une diminution de rendement. L'analyse de la variance par le test de Fischer montre qu'il y a une différence significative entre tous les traitements. Par contre le T0 et le Tfu ne diffèrent pas statistiquement.

CONCLUSION

Cette recherche nous a permis de conclure que l'effet d'un engrais biologique phosphaté sur le rendement dépend de ses caractéristiques chimiques et non pas de la quantité apportée.

3.6. ANDRIAMANIRAKA H., RABEHARISOA L., MICHELLON R., MOUSSA N. et MOREL C., 2014. The effect of the cropping systems with direct seeding on permanent soil cover (systems scv) on the phosphate ions in the solution of soil in the grounds cultivate and on the crop yield highland of Madagascar. International conference “Agroecology For Africa- AFA 2014” in Antananarivo, 03 - 07 November 2014, Antananarivo, Madagascar.

THE EFFECT OF THE CROPPING SYSTEMS WITH DIRECT SEEDING ON PERMANENT SOIL COVER (SYSTEMS SCV) ON THE PHOSPHATE IONS IN THE SOLUTION OF SOIL IN THE GROUNDS CULTIVATE AND ON THE YIELD IN THE HIGHLAND OF MADAGASCAR

H. ANDRIAMANIRAKA^{1*}, L. RABEHARISOA², R. MICHELLON³, N. MOUSSA⁴ and C. MOREL⁵

(1) University of Antananarivo, Graduate School of Agricultural Sciences, Department of Agriculture, BP 175 Ankatso 101Antananarivo, Madagascar, iharilala@gmail.com ;

(2) University of Antananarivo, Radio Isotopes Laboratory, Department of Radioagronomie, BP 3383, Route d'Andraisoro, 101 Antananarivo, Madagascar ;

(3) CIRAD/ONG Tafa, BP 266, 110 Antsirabe, Madagascar ;

(4) ONG Tafa, BP 266, 110 Antsirabe, Madagascar ;

(5) UMR INRA-ENITAB Transfert sol-plante et Cycle des Eléments Minéraux dans les écosystèmes cultivés (TCEM), BP 81, 33883 Villenave-d'Ornon cedex, France.

INTRODUCTION

The potentiality of phosphorus in crop fertilization can be estimated from its effect on the performance of the plant that can be manifested by the development of plant organs. Currently, with the goal of increasing in order to the agricultural production while respecting the environment for sustainable development, alternative solutions to the habits of farmers should be found.

MATERIALS AND METHODS

In this presentation, the device Andranomanelatra farm, which is located in the heart of Madagascar highlands of Vakinankaratra, at an altitude of about 1600 m, was chosen to study the effect of cropping systems on crop yields and concentrations of phosphate ions in the soil solution. The climate there is humid high altitude tropical climate

Treatments

Four cropping systems, which mainly differ on soil preparations, or direct seeding mulch-based cropping systems (SCV) or soil tillage (Lb), and fertilization performed were taken into consideration:

- Soil tillage (Lb) is done with a spade (angady), a plow a tractor according to the surface to a depth of 20-25 cm.

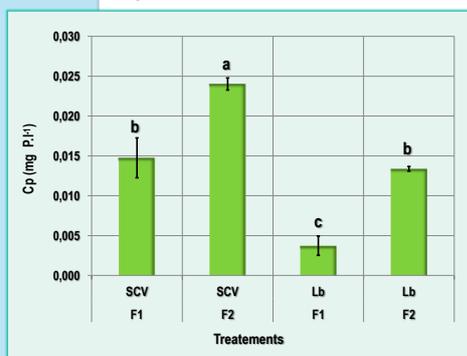
Table 1: Amounts (kg ha⁻¹) provided of phosphorus (P) for the fertilization levels F1 and F2 in the device Andranomanelatra farm

Culture	Fertilization level	Manure	Fertilizer	Total
kg ha ⁻¹				
Corn/Soybean	F1	6,1	-	6,1
Corn/Soybean	F2	6,1	29,5	35,6

- The SCV system that we chose is with litters which are kept permanently on the soil.
- F1 : practice of applying 5 t ha⁻¹ of cattle manure each year and is a common and recommended practice at farm level.
- F2 is to spread each year 5 t ha⁻¹ of cattle manure with mineral NPK fertilization and liming provide as dolomite at 500 kg ha⁻¹.

RESULTS AND DISCUSSIONS

1. Ion Phosphates in the soil solution



At the end of the results of laboratory analysis and statistical test, it was found that the direct-seeded systems with permanent soil cover has a positive effect on the amount of ion phosphates in the soil solution to Andranomanelatra.

Summaries of test comparing organic matter stocks under different soil tillage systems, mainly in the United States, show that the organic matter stocks are higher than on average no-till but this increase is relatively limited.

The study conducted by Randriantsoa (2001) on a Malagasy Oxisol showed that compared to plowing, SCV brings 80% C.

Compared to studies done by Razafimbelo in 2005 on the Andranomanelatra farm, Carbon stocks under SCV and soil tillage are significantly different for 0-20cm layers.

2. Crop Yields

The results presented are the yields obtained during the period 1996-2003 which represents 8 campaigns.

To limit the annual effect, we calculated the cumulative yield for each plot by adding the performance of each year over the period of experimentation.

Table 2: Averages and standard deviations (n = 3) of the cumulative grain (t ha⁻¹) for the different treatments yield. The values were obtained by adding the harvest obtained from 1996 to 2003.

Treatments	Cumulative yield t ha ⁻¹	Change in yield compared to SCV_F1
SCV_F1	14,7 (±1,0) b	0%
SCV_F2	24,7 (±1,9) a	+68%
Lb_F1	7,2 (±2,2) c	-51%
Lb_F2	13,1 (±0,7) b	-11%

As regarding the ranking of treatments on the concentration of phosphate ions in the soil solution and on the crop yields, a positive correlation with a coefficient correlation $r^2 = 0.9734$ has been noticed.

The explanation of the yield improvement of direct-seeded system or SCV may be based on the increase of the concentration of ion phosphates in the soil solution under the effect of this system.

CONCLUSION

L'augmentation des productions agricoles pourrait être envisagée en adoptant ce système de culture SCV avec un apport raisonné des engrais minéraux. Cette alternative peut être donc considérée comme une des solutions pour un développement durable.

International conference Agroecology for Africa – AFA 2014, 03-07 novembre 2014 Antananarivo - Madagascar

3.7. Razafindramanana N. C., Randrianandrasana R. P., ANDRIAMANIRAKA H., Scopel E. 2016. Effet à court terme du semis direct sur le rendement du riz pluvial. Congrès scientifique international sur la sécurité alimentaire et l'agriculture dans les Pays de l'Océan Indien de Madagascar et Comores, à Toamasina du 26 au 28 mai 2016.



Effet à court terme du semis direct sur le rendement du riz pluvial

Razafindramanana Noroana Chrabina¹, Randrianandrasana Raja Parbel¹, Andriamanantso Hantala¹, Scoopel Eric²
¹ Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Vakinankaratra, Madagascar, ² Institut National de Recherche pour le Développement, Durand (INR), BP 102 Antananarivo 101 Madagascar, ³ Unité de Recherche (UR) Développement des Systèmes de Production Agricole (DSPA) 2023 Antananarivo, Madagascar



1. Introduction



Le riz joue un rôle crucial dans la sécurité alimentaire malgache; il est l'aliment de base de la population malgache. Pour subvenir à ses besoins en riz, Madagascar dépend des importations avec près de 400.000 tonnes en 2013 (Sourisseau et al., 2014). L'extension de la surface cultivée à travers la valorisation de la colline et la pratique du semis direct (SD) constituent une des propositions adéquates pour palier ce problème.

Le semis direct est une agriculture de conservation qui obéissent aux trois principes de l'agriculture de conservation (Séguy et al., 2003): (1) l'absence de perturbation du sol; (2) la protection de sols par une couverture végétale permanente; et (3) la rotation culturale associant céréales et légumineuses. L'objectif de cette étude est de tester l'effet du SD sur la disponibilité de l'azote et du phosphore du sol et sur le rendement du riz pluvial sur les Hautes-Terres malgaches.

2. Matériel et méthode

L'étude a été réalisée en milieu paysans au Moyen-Ouest du Vakinankaratra dans les Communes Rurales d'Ankazomiriotra et de Vinany (Figure 1). 12 couples de situations en SD sur résidus de *Stylosanthes* g. et LAB (labour), ont été établis en parcelles paysannes, soit planes, soit sur une pente variant de 10 à 15 % (facteur pente) et certaines avec utilisation d'engrais chimiques et d'autres non (facteur niveau d'intrants chimiques). A l'intérieur de chaque situation, une placette de 2mx2m a été identifiée. Deux prélèvements des sols ont été effectués durant l'expérimentation, l'un au semis et l'autre à la floraison.



Figure 1. Site d'études dans la Région du Vakinankaratra

Des analyses au laboratoire de l'azote assimilable (Nmin) et du P disponible (Pi) ont été effectuées. A la récolte la biomasse et le rendement du riz ont été estimés par fauchage des plantes au ras du sol, puis pesées de la biomasse fraîche contenue dans une aire de prélèvement de 1m². L'ensemble a ensuite été placé dans une étuve, réglée à 60°C durant 48 heures.

3. Résultats et discussion

Teneurs en azote et phosphore disponibles du sol

Éléments disponibles en kg/ha		MOG	Nmin semis	Nmin floraison	Pi semis	Pi floraison
Toposéquence	Sommit	SDV	27,5#7,8	21,4#2,8	4,1#0,6	6,7#2,5
		LAB	20#4,9	25,0#2,5	5,0#1,2	7,9#2,6
	Versant	SDV	24,7#7,4	28,8#2,5	3,2#1,7	6,4#1,3
		LAB	22,5#6,8	25,0#5,1	2,6#1,0	4,2#1,1
Niveau d'intrants	Plus	SDV	28,5#2,5	20,0#14,5	3,9#1,5	6,1#1,7
		LAB	24,1#11,2	21,7#10,9	4,3#1,4	5,7#2,0
	Moins	SDV	21,6#2,5	22,6#9,9	2,9#0,3	7,0#1,7
		LAB	29,5#6,7	24,5#10,1	4,2#1,0	6,2#2,4
Système	SDV	26,0#7,7	20,9#12,1	2,6#1,2	6,5#0,5	
	LAB	26,1#10,1	22,7#10,7	4,2#1,2	4,0#1,5	

Une même lettre en gras ou en minuscule de couleur signifie aucune différence significative (p < 0,05) entre les deux modes de gestion. Les lettres majuscules ou en gras de couleur différente signifient une différence significative (p < 0,05) entre les modes de gestion. Les lettres minuscules ou en gras de couleur différente signifient une différence significative (p < 0,05) entre les modes de gestion.

Les résultats obtenus montrent l'absence de la différence significative des teneurs en Nmin et en Pi entre les niveaux d'intrants et les systèmes comparés (seul pour le Pi en floraison, SD>LAB). Pour la toposéquence, trois tendances ont été observées: (1) sur les parcelles labourées, le teneur Pi à la floraison sur la partie sommitale est supérieure à celle du versant, (2) toujours à la floraison, les teneurs en Nmin des parcelles LAB et SD sur la partie sommitale sont inférieures à celles du versant, et (3) une absence de différence significative est observée pour les situations restantes (Tableau ci-contre).

Concernant le rendement en graine du riz, aucune différence significative n'a été constatée entre les systèmes comparés. Une observation similaire est constatée au niveau des facteurs intrants et toposéquence (Figure 2).

Les lettres majuscules ou en gras de couleur différente signifient une différence significative (p < 0,05) entre les modes de gestion. Les lettres minuscules ou en gras de couleur différente signifient une différence significative (p < 0,05) entre les modes de gestion. Les lettres minuscules ou en gras de couleur différente signifient une différence significative (p < 0,05) entre les modes de gestion.

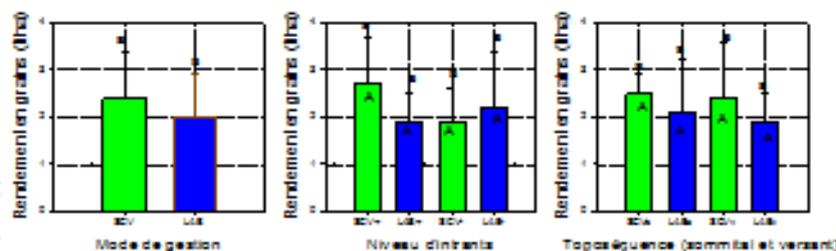


Figure 2: Rendements en riz pluvial sous systèmes en semis direct et labourés

4. Conclusion

Généralement, les résultats obtenus ne montrent pas d'effet positif du SD sur le rendement et la biodisponibilité des éléments. Cependant, la restitution de la biomasse végétale contribue à améliorer la fertilité du sol, qui va sûrement assurer l'augmentation des rendements et permettant de lutter contre l'insécurité alimentaire à Madagascar. Mais probablement que ces effets n'apparaissent qu'après un certain nombre d'années et ne sont pas décelables la première année, même avec une restitution soignée de résidus de légumineuse, par rapport au système conventionnel.

Références

Andriamanantso Hantala, Razafindramanana Noroana Chrabina, Randrianandrasana Raja Parbel, Scoopel Eric, 2021. L'agriculture de conservation: un axe pour l'amélioration durable. Document de travail de travail à propos de l'agriculture de conservation. Université d'Antananarivo, Madagascar. <https://www.researchgate.net/publication/354444444>

IV. COMMUNICATIONS ORALES AUX COLLOQUES ET SEMINAIRES INTERNATIONAUX

4.1. ANDRIAMANIRAKA H., Rabeharisoa L., Michellon R., Moussa N., Morel C., 2007. Bilan des apports et des exportations de phosphore dans des sols Malgaches cultivés selon deux systèmes de culture, l'un avec semis direct sur couvert végétal et l'autre avec labour. Séminaire International : Les sols tropicaux en semis-direct sous couvertures végétales. 03 décembre 2007, Antananarivo, Madagascar.

Bilan des apports et des exportations de phosphore dans des sols Malgaches cultivés selon deux systèmes de culture, l'un avec semis direct sur couvert végétal et l'autre avec labour

H. Andriamaniraka^{1*}, L. Rabeharisoa², R. Michellon³, N. Moussa⁴, C. Morel⁵

(1) Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Agriculture, BP 175 Ankatso 101Antananarivo, Madagascar, j_harilala@yahoo.fr ou handriam@bordeaux.inra.fr

(2) Université d'Antananarivo, Laboratoire des Radio Isotopes, Service de la Radioagronomie, BP 3383, Route d'Andraisoro, 101 Antananarivo, Madagascar, lrabehar@refer.mg

(3) CIRAD/ONG Tafa, BP 266, 110 Antsirabe, Madagascar, michellon@cirad.mg

(4) ONG Tafa, BP 266, 110 Antsirabe, Madagascar

(5) UMR INRA-ENITAB Transfert sol-plante et Cycle des Eléments Minéraux dans les écosystèmes cultivés (TCEM), BP 81, 33883 Villenave-d'Ornon cedex, France, morel@bordeaux.inra.fr

Introduction

Madagascar est une île-continent de 581 000 km² avec 17 millions d'habitants dont les ¾ sont impliqués dans une activité agricole essentiellement manuelle. La surface agricole utile n'est actuellement que d'environ 3,5 millions d'hectares et la production agricole est loin de couvrir les besoins alimentaires de la population. La région des Hautes Terres, localisée autour de la capitale Antananarivo, possède de larges superficies encore peu valorisées pour l'agriculture. Si les fonds de vallée sont déjà largement occupés et cultivés principalement en riz inondé, les versants des collines, appelées « tanety », sont encore très peu exploités et constituent un gisement important de surfaces cultivables qui permettrait d'augmenter significativement le potentiel de la production agricole de Madagascar.

Des chercheurs du CIRAD et leurs partenaires ont proposés et étudiés depuis plusieurs années des systèmes de cultures avec semis direct sur couverture végétale (SCV) conçus pour augmenter et maintenir la productivité de ces sols tout en les protégeant afin de minimiser les pertes par érosion des nutriments (Séguy et al., 2006 ; Husson et al., 2006).

Les facteurs susceptibles de limiter la production agricole naturelle de ces écosystèmes sont probablement multiples. Mais le phosphore est souvent désigné comme un facteur clé de l'amélioration de la fertilité de ces sols et nombreuses études mentionnent des gains importants de productivité obtenus de systèmes de culture incluant des apports de phosphore, même modérés (Oberson et al., 1996).

L'objectif de cet article est de présenter les différents flux impliqués dans le cycle du phosphore afin de calculer et comparer le bilan annuel et cumulé de P en fonction des différents systèmes de culture.

Matériels et méthodes

Les dispositifs utilisés sont les dispositifs d'Andranomanelatra, de Bemasoandro (les deux sur un sol ferrallitique argileux) et de Betafo (sur une zone de volcanisme récent) qui ont été mis en place et

suivis par l'ONG Tafa avec l'appui du CIRAD, depuis de nombreuses années. De plus, ces dispositifs ont été récemment étudiés par Razafimbelo (2005) sur le thème de l'effet du système de cultures sur le stockage de carbone dans le sol.

Les dispositifs expérimentaux comprennent de nombreux systèmes de culture incluant le mode de préparation et de semis des sols (Semis direct ou Labour : Lb), des niveaux et des types de fertilisations variables (F1 : fumier de ferme et F2 : fumier de ferme+engrais minéraux+dolomie) ainsi que de nombreuses variantes de couverture végétale. Dans le cadre de ce travail nous avons sélectionné quatre traitements (SCV_F2, SCV_F1, Lb_F2 et Lb_F1) présents dans les trois dispositifs.

Pour la détermination du bilan de phosphore à l'échelle de la parcelle cultivée, une méthode de calcul du bilan de phosphore implique le suivi des flux d'entrées de P dans la parcelle (fertilisants organiques ou minéraux) et des flux de sorties de P sous forme de produits récoltés (grain, tige, feuille, gousses...) ou de pertes vers l'environnement.

L'effet du système de culture sur le rendement annuel et cumulé ainsi que sur le bilan annuel et cumulé ont été analysés statistiquement par une analyse de variance à deux facteurs (SCV et Lb) et deux modalités de fertilisation (F1 et F2). Les écarts sont considérés comme significatifs pour un seuil de probabilité inférieur à 0.05.

Résultats

Tableau 1 : Moyenne et écart type (n=3) du rendement en grains ($t\ ha^{-1}$) cumulés pour les différents traitements

Traitement	Andranomanelatra		Bemasoandro		Betafo	
	$t\ ha^{-1}$	$\Delta\%$ SCV_F1	$t\ ha^{-1}$	$\Delta\%$ SCV_F1	$t\ ha^{-1}$	$\Delta\%$ SCV_F1
SCV_F1	14.7 (± 1.0) b	0%	3.8 (± 0.9) c	0%	8.0 (± 0.5) b	0%
SCV_F2	24.7 (± 1.9) a	+68%	12.1 (± 0.6) a	+222%	12.3 (± 2.1) a	+54%
Lb_F1	7.2 (± 2.2) c	-51%	2.2 (± 1.5) c	-43%	7.3	-10%
Lb_F2	13.1 (± 0.7) b	-11%	9.8 (± 0.9) b	+160%	11.2	+40%

Tableau 2 : Moyenne et écart type (n=3) du bilan cumulé de P ($kg\ P\ ha^{-1}$) pour les différents traitements

Traitement	Andranomanelatra	Bemasoandro	Betafo
SCV_F1	8.9 (± 2.8) c	21.7 (± 2.2) b	3.3 (± 2.1) b
SCV_F2	217.5 (± 4.1) b	145.8 (± 1.2) a	87.4 (± 6.6) a
Lb_F1	22.7 (± 7.2) c	22.9 (± 5.1) b	0.7
Lb_F2	236.5 (± 3.1) a	142.6 (± 2.1) a	81.3

Les valeurs cumulées ont été obtenues en sommant les récoltes obtenues de 1996 à 2003 pour le dispositif d'Andranomanelatra et de 1999 à 2003 pour Bemasoandro et Betafo.

Pour les trois dispositifs, le bilan cumulé de P est toujours positif mais diffère significativement entre les deux régimes de fertilisation : la modalité F1 permet d'obtenir des bilans cumulés de P légèrement positif, alors que pour F2 le bilan cumulé de P est très excédentaire puisque le surplus de P apporté est très supérieur au surplus de P exporté dans le gain de rendement.

L'effet du système de culture n'est significatif que dans une seule situation : le régime F2 du système SCV dans le dispositif Andranomanelatra qui est le plus ancien.

Conclusion

Le bilan de P, cumulé sur la période d'expérimentation, varie d'un facteur proche de 10 à 20 avec le régime de fertilisation mais n'est que peu affecté par les systèmes SCV ou labour. L'effet du système SCV n'est vraiment remarquable qu'après plusieurs années de son installation, c'est le cas du dispositif d'Andranomanelatra par rapport aux deux autres qui sont plus récents.

Références bibliographiques

Husson, O., L. Séguy, R. Michellon and S. Boulakia, 2006. Restoration of acid soil systems through agroecological management. Pp. 343-356. In: Biological approaches to sustainable soil systems. Ed. N. Uphoff et al. CRC Taylor & Francis.

Oberson A., 2006. . In: Biological approaches to sustainable soil systems. Ed. N. Uphoff et al. CRC Taylor & Francis.

L. Séguy, S. Bouzinac and O. Husson, 2006. Direct-seeded tropical soil systems with permanent soil cover. Pp. 323-342. In: Biological approaches to sustainable soil systems. Ed. N. Uphoff et al. CRC Taylor & Francis.

Michellon R., Razanaparany C., Moussa N., Andrianasolo H., Fara Hanitriniaina J. C., Razakamanantoanina R., Rakotovazaha L., Randrianaivo S., Rakotoniaina F., 2004. Rapport de campagne 2002-2003 Hautes Terres et Moyen Ouest, 98p

Morel C., 2002. Caractérisation de la phytodisponibilité du phosphore du sol par la modélisation du transfert des ions phosphates entre le sol et la solution. HDR, 80p

Rabeharisoa L., 2004. Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des hautes terres de Madagascar. Thèse de Doctorat de l'Université D'Antananarivo, Spécialité : science du sol. 202p.

Razafimbelo T., 2005. Stockage et protection du carbone dans un sol ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des hautes terres malgaches. Thèse de Doctorat en Science du Sol de l'ENSAM, 123p.

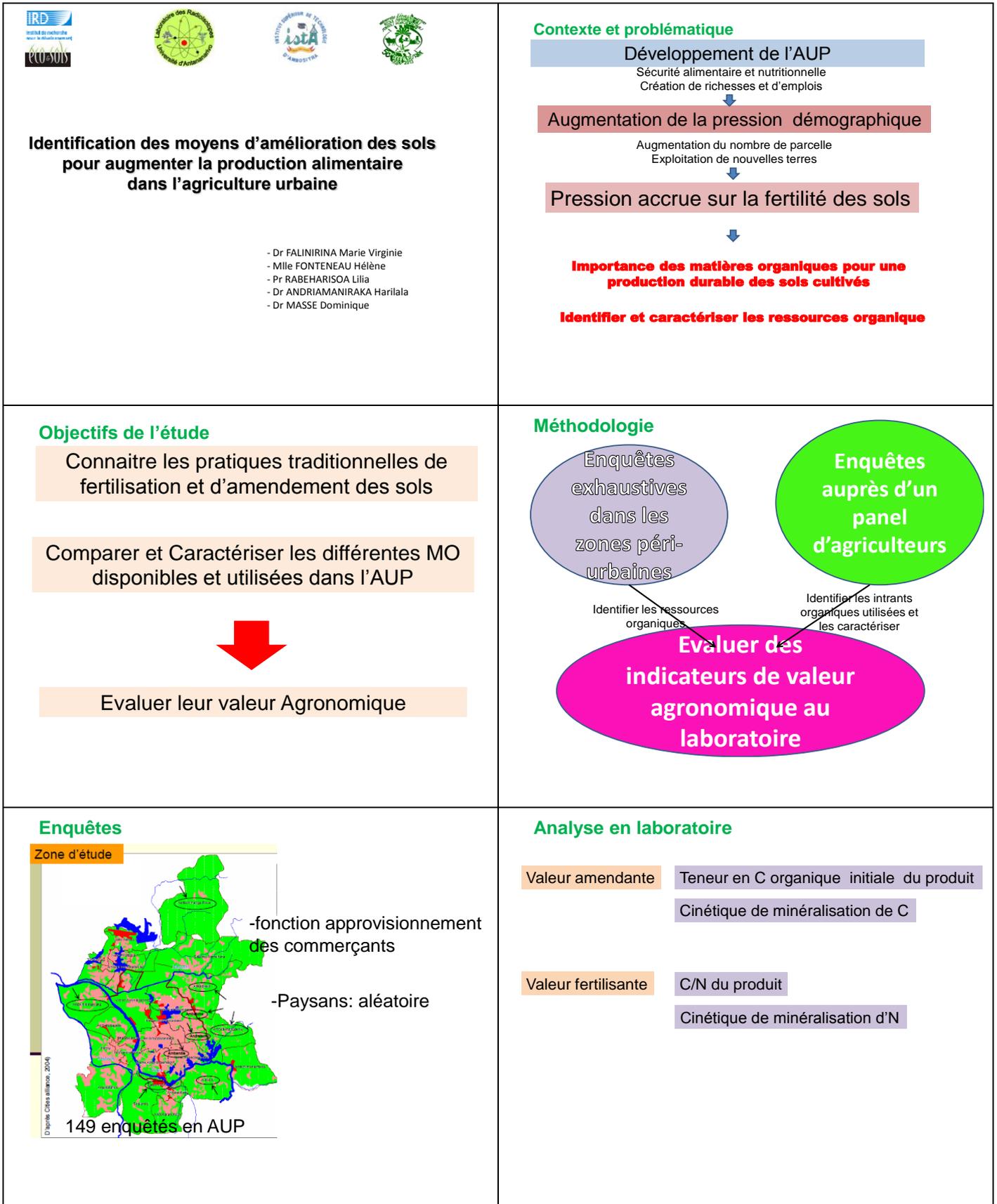
4.2. Falinirina M. V., Rabeharisoa L., ANDRIAMANIRAKA H., Masse D., 2013. Identification des moyens d'amélioration des sols pour augmenter la production alimentaire dans l'agriculture urbaine. Colloque international biodiversité et changement climatique, 10 et 11 décembre 2013, Antananarivo, MADAGASCAR.

IDENTIFICATION DES MOYENS D'AMELIORATION DES SOLS POUR AUGMENTER LA PRODUCTION ALIMENTAIRE DANS L'AGRICULTURE URBAINE

FALINIRINA M.V.¹, RABEHARISOA L.², ANDRIAMANIRAKA H.³, MASSE D.⁴

- (1) Institut Supérieur de Technologie, Ambositra 306 Laboratoire des Radio Isotopes,
- (2) Service de la Radioagronomie, BP 3383, Route d'Andraisoro, 101 Antananarivo, Madagascar
- (3) Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Agriculture, BP 175 Ankatso 101 Antananarivo, Madagascar,
- (4) UMR Eco&Sols -Ecologie Fonctionnelle& Biogéochimie des Sols&des Agroécosystèmes -(IRD)

L'agriculture urbaine joue un rôle important pour assurer la sécurité alimentaire de la ville. La production de ce type d'agriculture n'est pas suffisante à cause de la faible superficie exploitable et surtout de la mauvaise qualité des sols. Ces derniers présentent des contraintes biophysiques et chimiques. Les apports organiques comme amendement ou fertilisant s'avèrent être essentiels et nécessaires. Dans les exploitations de ce type d'agriculture urbaine, les engrais chimiques sont chers, de plus les matières organiques ne sont pas disponibles. Pourtant, Antananarivo possède un gisement important en matières organiques dans les déchets urbains. L'objectif de cette étude est d'estimer la valeur agronomique des matières organiques utilisées dans les systèmes de culture en zone urbaine selon la perception paysanne et l'étude au laboratoire. Ainsi, deux approches méthodologiques ont été adoptées: des enquêtes auprès de 149 paysans sur 9 sites en milieux urbains et des travaux de laboratoire pour analyser l'effet des apports organiques en utilisant trois types de substrats organiques fortement utilisés en zone urbaine (le terreau d'Andralanitra qui est un produit issu d'un criblage de déchets urbains, le compost de déchets d'abattoir et le fumier). La dynamique de minéralisation du carbone et d'azote de ces trois produits organiques dans un sol ont été mesurée. Dans l'agriculture urbaine, les agriculteurs attribuent une valeur d'un produit organique par sa granulométrie : les matières brutes non broyées ont une valeur amendante, les cendres ou poudrettes ont une valeur fertilisante. Par contre, après l'étude en laboratoire, la minéralisation d'un fumier est plus importante que le terreau d'Andralanitra et le compost. Seul le compost libère des quantités d'azote minéral, éléments indispensables pour l'amélioration de la qualité chimique du sol qui joue un rôle important dans l'amélioration de la production.



Analyse en laboratoire

Etude de minéralisation de C et d'azote des matières



MO analysées:

- effluents d'élevages: Fumier (Bovin, Porcin, Volaille)
- produits issus de déchets urbains: Terreau andralanitra, llafy, ordures compostées, ordures incinérées, compost de Feuille, compost zina bio
- fertilisants commerciaux: activateur bio, Guanomad, taroka

80g de sol+20g MO

Résultats d'enquêtes

Apports organiques	Formes	Modes d'apport	Rôles
Fumiers (Bovins, Porcins, Volailles)	Solides	Localisation dans les trous	-Amendement -Fournir l'eau
	Poudrettes (broyés ou cendres)	Epannage	-Nutrition
Déchets verts	Cendres	Epannage	-Nutrition
Déchets urbains	Cendres	Epannage	-Nutrition
Terreaux d'Andralanitra	Cendres	Epannage	-Nutrition ou
		Localisation dans les trous	-Amendement

GRANULOMETRIE

Résultats d'analyses

Effluents d'élevage: FB fumier bovin, FP fumier porcin, FV fumier de volaille

Potentiel d'entretien de fertilité

Minéralisation de Carbone	>70%	40% < Min <70%	< 40%
C>20%		Fumier Bovin, volaille	
10% < C <20%			
C < 10%		Fumier Porcin	

nul faible modéré important

Potentiel fertilisant

	C/N > 25 fort	C/N < 25 faible
N > 2%		
1% < N < 2%	Fumier Bovin	Fumier Volaille
N < 1%		Fumier Porcin

Lente et faible Rapide et faible +/- rapide et important Rapide et important

Résultats d'analyses

Effluents d'élevage: FB fumier bovin, FP fumier porcin, FV fumier de volaille

Pratique paysanne: -Fortement utilisé

Pure
Mélangé

Stockage de C intéressant mais Faible valeur fertilisante

➔ Améliorer la qualité des fumiers par la gestion des effluents d'élevage

Résultats d'analyses

Produits issus des déchets urbains

Potentiel d'entretien de fertilité

Minéralisation	>70%	40% < Min <70%	< 40%
C>20%			Compost Feuille
10% < C <20%	Ordures Incinérées- Compost de déchet d'abattoir	Terreau llafy	Terreau Andralanitra- Ordures Compostées
C < 10%			

nul faible modéré important

Potentiel fertilisant

	C/N > 25 fort	C/N < 25 faible
N > 2%		
1% < N < 2%	Compost Feuille	Compost déchet d'abattoir
N < 1%	Ordures compostées- O brûlée- Terreau llafy	Terreau Andralanitra

Lente et faible Rapide et faible +/- rapide et important Rapide et important

Résultats d'analyses

Produits issus des déchets urbains

Pratique paysanne: -Faiblement utilisé

Pure
Mélangé

Stockage de C Variable mais Faible valeur fertilisante

➔ Amélioration de composition des composts urbains
Mise en place des distributions efficaces

Résultats d'analyses

Fertilisants commerciaux

Potentiel d'entretien de fertilité

Minéralisation	>70%	40% < Min <70%	< 40%
C > 20%			Taroka
10% < C < 20%		Activateur biologique	
C < 10%			Guanomad

	faible	modéré	important
--	--------	--------	-----------

Potentiel fertilisant

	C/N > 25 fort	C/N < 25 faible
N > 2%		Activateur biologique- Guanomad
1% < N < 2%		
N < 1%	Taroka	

Lente et faible	Rapide et faible	+/- rapide et important	Rapide et important
-----------------	------------------	-------------------------	---------------------

Résultats d'analyses

Fertilisants commerciaux

Pratique paysanne: - Nulle

Stockage de C intéressante, Fourniture d'N intéressante pour le Guano et Prochimad



Information de l'existence des produits
Comparaison des avantages couts/efficacités par rapport aux engrais chimiques classiques

Conclusion

Les déjections animales: Améliore le sol en augmentant le stock de C organique

Nécessite une amélioration pour l'effet fertilisant

Les produits issus des déchets urbains:

N'améliore pas le sol

Faible valeur fertilisante

Les produits commerciaux:

Améliore le sol

Le Guano et l'activateur de Prochimad fournissent l'azote aux plantes

En AUP, pour arriver à la sécurité alimentaire, il faut augmenter la productivité des sols, mais en préservant l'environnement (éviter les pollutions ou dégradation des sols).
 Recyclage des ressources organiques aidera à atteindre ces objectifs et participera également aux recyclages des déchets produits par la ville.
 C'est une démarche d'intensification écologique.

4.3. Fanjaniaina M.L., Salgado P., Tillard E., Delarivière J., Ramahandry F., Razafimanantsoa M.-P., Razafimahatratra H., ANDRIAMANIRAKA H., Rabeharisoa L., Becquer T. 2014. First attempt using Near Infrared Reflectance Spectroscopy to evaluate the element content of flag leaf rice in Malagasy farm level. Conférence AfA 2014, Agroecology for Africa, 3-7/11/2014, Antananarivo, Madagascar.

First attempt using Near Infrared Reflectance Spectroscopy to evaluate the element content of flag leaf rice in Malagasy farm fields

Fanjaniaina M. Lucia¹, Salgado Paulo^{2,3}, Tillard Emmanuel², Larvy Delarivière Jean⁴, Ramahandry Fidiniaina³, Razafimanantsoa Marie-Paule¹, Razafimahatratra Hery^{1,5}, **Andriamaniraka Harilala**⁵ Rabeharisoa Lilia¹, Becquer Thierry⁴.

¹Laboratoire des Radiosotopes (LRI), Université d'Antananarivo- BP 3383, route d'Andraisoro, Antananarivo, Madagascar;

²CIRAD, UMR SELMET, F-97410 Saint-Pierre, Réunion Island, France;

³DP SCRID SRR Fofifa - B.P. 230 Antsirabe, Madagascar;

⁴Institut de Recherche pour le Développement (IRD), UMR Eco&Sols, Montpellier Cedex, France;

⁵Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Agriculture, Université d'Antananarivo, BP 174-101 Antananarivo, Madagascar.

fanjalucia@yahoo.fr

INTRODUCTION

Agriculture is very important for the economy of Madagascar (FAO/PAM, 2009). Farmers have, generally, very small farms (# 1 ha) where crop and livestock were almost always associated. So, in mixed farming agricultural and livestock systems, stocks and flows of biomass and nutrients must be quantified for a better management of mineral resources in the farm (Rufino et al., 2006). Carbon (C), Nitrogen (N), Phosphorus (P), Calcium (Ca), Magnesium (Mg) and Potassium (K) are some of the most important biochemical components of plant organic matter. Therefore, the estimation of their contents can help monitor the metabolism processes and health of plants (Zhai, 2012). Traditionally, the contents of biochemical components can be estimated using chemical analyses in the laboratory. Although such estimations are accurate, the method is costly, time consuming, destructive, and complex. The use of NIRS (Near Infrared Spectroscopy) seems an interesting method for the characterization of constituents of plant biomass. It is rapid, timely, non-destructive, straightforward tool and sometimes more accurate than conventional analysis. However, NIRS was often used for the characterization of organic materials, but have rarely been used in tropical area, in particular for Madagascar. So there it is a strong interest to test these methodologies on plant content in Madagascar.

This study was initiated to test the potential of NIRS to predict element content in rice, the main Malagasy field crops, at first in this work in the flag leaf of rice.

MATERIALS AND METHODS

Chemical Analysis

A total of 130 flag leaf rice samples were collected in 2012 from seventy (70) mixed agriculture and livestock farms in Vakinankaratra region of Madagascar. Samples were oven dried at 60°C and ground before analyses. Reference values were determined from routine chemical analysis. For total nitrogen content, two different methods were used: Kjeldahl method (N_{Kjeldahl}); total combustion with a CHN analyser (N_{CHN}). Total carbon content was also determined with a CHN analyser. Phosphorus, Ca, K, Mg were determined after mineralization with chlorhydric acid. Phosphorus was determined colorimetrically, and Ca, K, Mg were determined by atomic absorption spectrophotometry.

NIRS Measurements and Spectral Treatments

The NIR spectra were recorded on NIRS spectrophotometric LabSpec®4 (Analytical Spectral Devices Inc.) with a spectral range of 350 to 2500 nm. Samples were scanned four times and the radiance of samples obtained by taking 50 consecutive scans. NIR absorbance data were recorded as mean $\log 1/\text{reflectance}$ values ($\log 1/R$). Before calibration and validation, mathematical pretreatments were done: (1) standard normal variate and detrend transformation (SNDV), second derivate and smoothing. Principal Component Analysis (PCA) was then performed to check the spectral homogeneity of the database.

Model Calibration and cross-validation

The chemical data determined by the reference methods were added to the corresponding NIR spectral files. Calibration was performed by Partial Least Square (PLS) regression on transformed absorbance spectra with Unscrambler software 10.3 (Infrasoft International) to develop calibration equations). The accuracy of the calibration equations was evaluated using coefficient of multiple determination (R^2), standard error of calibration (SEC), and standard error of cross validation (SECV) (Rabetokotany, 2013). The SEC is an estimate of the best accuracy obtainable using the specific wavelengths of the calibration equation. Due to the small number of samples used, the method of cross-validation was used. The cross validation is an internal process that splits the calibration set in several groups, and the model is repeated as independent variables for the calibration equation.

RESULTS AND DISCUSSION

Leaf Chemical Composition

The statistics of plant composition, including range, mean and standard deviation (SD) are presented in Table 1. The means \pm SD were 26.20 ± 2.57 g.kg⁻¹ for N_{Kjeldhall}, 23.79 ± 2.73 g.kg⁻¹ for N_{CHN}; 1.10 ± 0.16 g.kg⁻¹ for P; 42.22 ± 1.80 % for C; 8.69 ± 3.13 g.kg⁻¹ for K; 0.11 ± 0.03 g.kg⁻¹ for Ca and 0.59 ± 0.06 g.kg⁻¹ for Mg.

Table 1. Laboratory reference values of N, P, Ca, Mg, and K contents in flag leaf rice samples in Madagascar

Content	Units	Mean	SD	CV	min	max
N _{Kjeldahl}	g.kg ⁻¹	26,20	2,57	0,10	20,55	32,28
N _{CHN}	g.kg ⁻¹	23,79	2,73	0,11	1,66	3,07
P	g.kg ⁻¹	1,10	0,16	0,15	0,74	1,60
C	g.kg ⁻¹	422,2	18,0	0,04	318,4	457,4
Ca	g.kg ⁻¹	0,11	0,03	0,26	0,04	0,20
Mg	g.kg ⁻¹	0,59	0,06	0,10	0,44	0,72
K	g.kg ⁻¹	8,69	3,13	0,36	2,15	17,84

SD: standard deviation, CV: coefficient of variation

Calibration and Validation

Table 2 summarizes the statistics, for calibration and cross-validation obtained for each constituent. The factor's number is seven for all samples. The calibration equations developed for the nitrogen content showed better results with low SEC (0.9-1.0 mg.kg⁻¹) and high R²_{Cal} (0.86) and was produced a good effect of cross validation with R²_{val} (0.75-0.82) and with less Standard Error of Validation SECV (1.11 g.kg⁻¹). Even if Kjeldhall method and CHN method give the same value of calibration coefficient (≈ 0.85), the CHN method allows a higher R²_{val} = 0.82 as compared to Kjeldhall method R²_{val} = 0.75. For C, R²_{Cal} (0.83) and R²_{val} (0.78) are high. The calibration of P is slightly worse with R²_{Cal} of 0.72 and R²_{val} of 0.63. For Ca, Mg, and K, the calibrations were in a medium range (R²_{cal} of 0.6-0.7; R²_{val} of 0.5-0.6).

These values obtained for nutrient content of flag leaf rice in Madagascar are comparable to those reported in other studies on the determination of N, P and K with NIRS (Laio et al., 2012; Petisco et al, 2008; Zhai et al., 2012, Martin et al. 2008, Pimstein et al., 2011), for Mg (Petisco et al., 2008). The result obtained for the Carbon can be compared to the study conducted by Grossmann et al. 1996, which showed a calibration coefficient ranging from 0.60 to 0.90 varying according to the type of treatment (log 1/R, 1st derivate, 2nd derivate).

Table 2: Statistics of NIRS calibration equation for best fit and cross validation, including SEC, coefficient of determination (R^2) and standard error of cross-validation (SECV)

variables	N	R^2_{Cal}	SEC	R^2_{val}	SECV
N Kjeldahl	110	0,85	0,92	0,75	1,17
N CHN	130	0,86	1,00	0,82	1,11
P total	130	0,72	0,07	0,63	0,08
C	130	0,83	0,27	0,78	0,31
Ca	130	0,71	0,03	0,64	0,16
Mg	130	0,68	0,03	0,60	0,03
K	130	0,57	1,87	0,48	2,11

N: number of samples, R^2_{Cal} : coefficient of calibration, R^2_{val} : coefficient of cross-validation, SEC: Standard Error of Calibration, SECV: Standard Error of Validation.

These studies give an initial overview of the possibility of using NIRS to estimate the element contents in flag leaf rice. Indeed, according to the study performed by Williams (2003), a coefficient calibration value for R^2 between 0,66 and 0,81 indicated approximate quantitative predictions. Whereas value for R^2 between 0.82 and 0.90 revealed good predictions. Calibration models having a value for R^2 above 0.91 were considered to be excellent. Then, the NIR prediction of element contents was good for C and N, approximate for P, Ca and Mg, and poor for K.

Conclusion

The results obtained in the current work showed that C and N can be well predicted by NIRS, despite the strong heterogeneity of the samples considered. This technique also afforded acceptable accuracy in the prediction of P content. The prediction potential for cations Ca, Mg, K elements was moderate. This method could be considered as an alternative for the analysis of the mineral contents of large amount of plant samples.

References

- Laio H., Wu J., Chen W., Guo W. and Shi C., 2012. Rapid diagnosis of nutrient elements in fingered citron leaf using near infrared reflectance spectroscopy, *Communications in Soil Science and Plant, Journal of Plant Nutrition*, 35:1725–1734, 2012.
- Grossman, Y. L., S. L. Ustin, S. Jacquemoud, E. W. Sanderson, G. Schmuck, and J. Verdebout. 1996. Critique of Stepwise Multiple Linear Regression for the Extraction of Leaf Biochemistry Information from Leaf Reflectance Data. *Remote Sensing of Environment* 56: 182–93.
- Petisco C., García-Criado B., Mediavilla S., 2008, Woody Species: Analysis by Near-Infrared Reflectance Spectroscopy, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39: 905–925.
- Rabetokotany N., 2013: Matières organiques exogènes issues de l'élevage et de la ville en milieu tropical: apport de la spectrométrie proche Infrarouge pour une orientation d'usage Agronomique et/ou énergétique, Thèse de doctorat, 1-22p.
- Rufino MC, Rowe EC, Delve RJ, Giller KE. 2006. Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop–livestock systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112, 261–282.
- Williams P., 2003. Near-Infrared Technology- Getting the Best Out of Light, PDK Grain Nanaimo, Canada.
- Zhai Y., Cuic L., Xin Zhoua, Gao Y., Fei T., and Wenxiu Gao, 2012. Estimation of nitrogen, phosphorus, and potassium contents in the leaves of different plants using laboratory-based visible and near-infrared reflectance spectroscopy: comparison of partial least-square regression and support vector machine regression methods, School of Resource and Environmental Science & Key Laboratory of Geographic Information, System of the Ministry of Education, Wuhan University, China, 19pages.
- Martin, M., L. Plourde, S. Ollinger, M. L. Smith, and B. McNeil. 2008. "A Generalizable Method for Remote Sensing of Canopy Nitrogen Across a Wide Range of Forest Ecosystems." *Remote Sensing of Environment* 112: 3511–19.
- Pimstein, A., A. Karnieli, S. K. Bansal, and D. J. Bonfil. 2011. "Exploring Remotely Sensed Technologies for Monitoring Wheat Potassium and Phosphorus Using Field Spectroscopy." *Field Crops Research* 121: 125–3.

4.4. Raminoarison M. A., Marikindrianjafimpahizato A. J., Rabeson R., Rakotoarisoa N. M., ANDRIAMANIRAKA H., Razafimahatratra H. M . 2016. Réponses de la variété de riz NERICA-L36 aux différentes formes d'engrais azotes. Congrès scientifique international sur la sécurité alimentaire et l'agriculture dans les Pays de l'Océan Indien de Madagascar et Comores, à Toamasina Madagascar. du 26 au 28 mai 2016.

REPONSES DE LA VARIÉTÉ DE RIZ NERICA-L36 AUX DIFFÉRENTES FORMES D'ENGRAIS AZOTES

Raminoarison Manoa A.^{1*}, Marikindrianjafimpahizato Andry J.¹, Rabeson Raymond², Rakotoarisoa Njato M.², ANDRIAMANIRAKA H¹., Razafimahatratra Hery M¹.

¹ *Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Madagascar*

² *Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA), Antananarivo, Madagascar*

*mail: ramimanoa@gmail.com

RESUME

Dans l'Alaotra, la riziculture irriguée occupe encore une place importante. Le Makalioka 34 (photopériodique à cycle long) constitue la variété la plus cultivée. Une étude a été menée afin d'améliorer la production rizicole de la région. L'objectif est de déterminer la meilleure forme d'engrais azoté (perlurée-PU ou super granule d'urée-SGU) pour la variété de riz Nerica L36-NL36 à cycle court en comparaison avec la variété Makalioka 34-MK34. Conduits en milieu paysan et en multilocale au niveau de sept sites, les essais ont été installés suivant un dispositif expérimental de type split-plot avec 3 répétitions, comportant deux variétés, quatre types de fertilisation : fumier avec pratique paysanne; fumier avec repiquage en ligne; fumier + NPK + PU; fumier + NPK + SGU. Comme résultats, dans l'ensemble des sites, les deux variétés présentent les mêmes performances sur le rendement en grains (NL36 : 5,72T/ha ; MK34 : 6,11T/ha). NL36 arrive à concurrencer MK34 grâce à son aspect plus lourd. Ce cultivar présente également des grains longs et blancs, et peut être classé parmi les riz de bonne qualité et vendus à meilleur prix. Aucune différence statistique n'apparaît entre le rendement en grains du traitement avec PU (6,43 T/ha) et celui du SGU (6,77 T/ha).

Mots clés : *Alaotra, expérimentation multilocale, fertilisation azotée, riziculture irriguée*

ABSTRACT

In Alaotra, irrigated rice still takes an important place. Makalioka 34 is a popular variety cultivated by majority of farmers. Test was carried out on the region in order to increase the rice's productivity. The study aims to assess the efficiency of urea super granule (USG) compared to pearl urea (UP) under two varieties of irrigated rice, Makalioka 34 –MK34 and Nerica L36 –NL36. The trial has been consisted on farmer field with seven farmers. The experimental design was a split-plot in three repetitions with those two varieties and four treatments of fertilizer: manure fertilizer with traditional practice; manure fertilizer with transplanting in row; manure fertilizer + NPK + UP; manure fertilizer + NPK + USG. All farmers have been concerned by those experimental. As results, considering whole sites, both varieties presented a similar agronomics performances in rice yield (NL36: 5,72T/ha; MK34: 6,11T/ha). NL36 can compete MK34 due to its heavier appearance. Also, this cultivar presents long and white grains, and can be classified as good quality rice at interested price.

No difference on yields of paddy appeared between the treatment with PU (6,43 T/ha) and that with the USG (6,77T/ha).

Keywords: *Alaoatra, multilocal experimentation, nitrogen fertilization, irrigated rice*

INTRODUCTION

La zone d'Alaoatra assure 13% de la production rizicole nationale (Penot *et al.*, 2009). La variété Makalioka 34 (MK34) y est la principale variété cultivée en riziculture irriguée (Demeringo, 2005). C'est une variété photopériodique à cycle long, qui dépend d'un climat stable et régulier (Demeringo, 2005). Touchés par le changement climatique, les producteurs sont contraints à décaler le calendrier cultural, qui entraîne le retard de la mise en place des cultures et en conséquence, la diminution de la capacité productive de la plante. Cette situation oblige les producteurs à identifier d'autres variétés alternatives. En outre, l'azote est un facteur important dans la productivité rizicole (Cissé, 2011). La forme perlée est la forme la plus utilisée en agriculture; or, l'application de la perlurée ne permet au riz de soustraire que le tiers de la dose épanchée; les restes étant perdues posant des problèmes environnemental et économique (IFDC, 2007 in Cissé, 2011). L'inefficacité de l'utilisation de l'azote sous forme perlée conduit à une nouvelle technique, qui est le placement profond de l'urée sous forme granulée. Dans le cadre des recherches sur la sécurité alimentaire, l'amélioration des facteurs de production i.e. variété adaptée et utilisation d'engrais plus efficace est priorisée dans cette étude. L'objectif principal est de déterminer la meilleure forme d'engrais azoté (perlurée -PU ou super granules d'urée -SGU) pour la variété de riz Nerica L36 (NL36) en comparaison avec la variété la plus utilisée dans la région (MK34).

MATERIELS ET METHODES

L'expérimentation a été conduite dans la zone rizicole de l'Alaoatra durant la saison culturale 2014-2015. Il s'agissait d'une expérimentation en milieu paysan et en multilocal au niveau de 7 sites. Les variétés de riz NL36 à cycle court non photopériodique et MK34 à cycle long photopériodique ont été expérimentées. Quatre modes de fertilisation ont été retenues.

Tableau 1: Tableau récapitulatif des types et doses d'engrais utilisés

T	E.O. (T/ha)	Engrais chimique (kg/ha)			Unités fertilisantes ajoutées dans chaque traitement		
		Application basale	Engrais de couverture		Application basale	Engrais de couverture	Total
			NPK	PU			
T1	5 (pratique paysanne)	0	0	0	n.d.	n.d.	n.d.
T2	5 (pratique améliorée)	0	0	0	n.d.	n.d.	n.d.
T3	5	200	75	0	22-44-32	34,5-0-0	56,5-44-32
T4	5	200	0	75	22-44-32	34,5-0-0	56,5-44-42

EO : engrais organique, ingrédient (N-P₂O₅-K₂O %) : 11-22-16 en NPK, 46-0-0 en PU et SGU, n.d. : non déterminé

Poids d'un granule= 1,2 g/granule

Le dispositif expérimental approprié est « le split-plot » avec trois répétitions. En tant qu'expérimentation multilocale, les huit modalités avec leur répétition ont été reproduites sur les sept paysans. Le système de culture adopté était le Système de Riziculture Améliorée.

Les variables mesurées sont : a) hauteur des plants et nombre de talles, b) composantes de rendement, c) rendement en paille et en paddy. L'analyse du sol a été effectuée sur six sites expérimentaux. Une analyse de variance a été réalisée.

RESULTATS

Caractéristiques des sols des sites expérimentaux

Les résultats de l'analyse indiquent une grande variabilité sur les propriétés du sol. La richesse du sol en C (0,18 à 3,01 %) et en N (0,014 à 0,231%) varie largement entre les sites. Les bases échangeables (Ca, Mg, Na) varient peu d'un site à un autre. Pourtant, au niveau du pH, les rizières ont des pH relativement semblables, c'est-à-dire acides. De même pour le phosphore qui est présent dans le sol à une quantité faible et le potassium moyennement pauvre.

Variations des variables étudiées sur l'ensemble des sites

L'interaction variété*type de fertilisation n'a pas eu d'incidence significative sur toutes les variables. La variable nombre de talles fertiles diffère significativement par traitement, et augmente de T1 à T4. Le nombre de grains pleins par panicule le plus élevé a été obtenu avec la PU (93), mais reste non significatif par rapport au SGU (91). Quant au rendement en paddy, la différence a été constatée seulement entre les traitements non fertilisés (T1 : 5,19 T/ha ; T2 : 5,25 T/ha) et les traitements fertilisés (T3 : 6,43 T/ha ; T4 : 6,77 T/ha). Entre les deux variétés, elles présentent de taille bien différente: la hauteur de MK34 (123,7 cm) est nettement supérieure à NL36 (84,04 cm). Pour la variable nombre de talles fertiles, aucune différence n'est détectée entre les deux variétés (NL36 et MK34: 11). MK34 présente un nombre de grains pleins par panicule significativement supérieur (95) par rapport à NL36 (79), à défaut d'un pourcentage en grains vides élevés. Au niveau de poids de mille grains, les grains de NL36 (27,6 g) sont significativement plus lourds par rapport à ceux de MK34 (25,7g). L'essai n'a pas montré d'effet significatif entre les rendements en grains des deux variétés (NL36 : 5,72 T/ha ; MK34 : 6,11 T/ha).

DISCUSSIONS

Comparaison des deux variétés

Des différences de comportements variétaux apparaissent entre MK34 et NL36. D'abord, elles se différencient significativement sur la taille : la variété populaire MK34 est une variété de grande taille et la variété introduite NL36 de petite taille. Cette différence de taille explique également la valeur élevée du rapport grain/paille de NL36: cette variété favorise la formation de grains que le développement des parties végétatives. Outre la hauteur, MK34 se distingue par un nombre de grains par panicule plus élevé (un écart de 23 grains). Mais la variété NL36 est plus lourde comparée à MK34. Bien que les deux variétés semblent avoir des différences sur nombreuses variables, une ressemblance statistique est visualisée au niveau du nombre de talles fertiles et du rendement en grains. La variété introduite arrive donc à se concurrencer avec la variété populaire grâce à son aspect plus lourd. Un écart de

rendement de 390 kg/ha s'observe entre les deux variétés avec la supériorité de MK34. Cet écart, bien que non significatif, est dû au faible rendement de NL36 sous T3, T2 et T1. A cet effet, la forme d'urée granulée est la meilleure forme pour l'obtention d'une bonne production pour NL36. Cette dernière caractéristique s'apparente avec les études de Saidou *et al.* (2014), Cissé (2011), car le succès du placement profond de l'urée est conditionné en partie par l'utilisation des variétés améliorées dont le cycle est d'environ 120 jours (Cissé, 2011). Néanmoins, sur des sols riches en éléments minéraux et en matières organiques, la variété MK34 devient sensible à la verse, ne tolère pas « l'excès » d'engrais et ne répond pas bien aux engrais minéraux (cas observé dans le site 1). Ducrot (1996) confirme également ces résultats.

Comme avantages, si installée en mois de décembre, la récolte de NL36 a lieu au cours du mois d'avril, saison durant laquelle le coût de mains d'œuvre est encore faible mais le prix du riz est encore intéressant. De plus, les grains de riz de NL36 (grains longs et blancs) peuvent être classés parmi les riz de luxe et vendus à meilleur prix (comme le MK34) par rapport aux autres variétés (Ducrot, 1996). Du point de vue agronomique, si les producteurs désirent cultiver des cultivars à cycle court, ceux à cycle de 120 jours s'adaptent parfaitement aux variations climatiques de la Région. D'une manière concrète, la récolte (si semée en décembre) coïncide au début de la saison fraîche et sèche après les dernières grosses pluies de mars, et les travaux de récolte peuvent être réalisés dans des conditions plus favorables. En deçà de ce cycle, les manipulations de récolte deviennent difficiles dues à la tombée des pluies. Par ailleurs, les producteurs de l'Alaotra connaissent actuellement les problèmes liés au changement climatique et commencent à identifier les variétés qui s'adaptent à cette situation. NL36 constitue une variété d'alternative ou de substitution au Makalioka pour les riziculteurs de la Région vu que les deux variétés présentent une performance agronomique semblable et un aspect extérieur apprécié par les consommateurs.

Influence des types de fertilisation sur les paramètres de croissance du riz

Au niveau du rendement en grains, le SGU fournit une production supérieure de 340 kg par rapport au PU, avec respectivement un rendement moyen de 6,7 T/ha et 6,4 T/ha. En effet, en plus des pertes engendrées par l'application de l'urée sous la forme perlée s'ajoutent le manque de synchronisation entre l'offre et la demande en azote, c'est-à-dire que la perlurée après hydrolyse, diffuse très rapidement en 3 à 4 jours. Cet azote libéré ne peut donc pas satisfaire tous les besoins de la plante qui sont étalés dans le temps raison pour laquelle il est recommandé de procéder à un fractionnement de l'apport (Saidou *et al.*, 2014). Néanmoins, la différence reste non significative entre eux (PU et SGU), alors que les études de Saidou *et al.* (2014), Cissé (2011) affirment une différence nettement significative du rendement entre le SGU et la PU. Dans leurs études, le poids de l'urée super granule ont été appliqués à une valeur bien supérieure à notre étude (2,7 g contre 1,2 g). Ceci dénote probablement que la performance du SGU par rapport à la PU n'est détectée statistiquement qu'à une certaine dose. Bandaogo (2010) a affirmé d'ailleurs dans ses résultats que son essai n'a pas montré une différence significative entre les deux types

d'urée à la dose de 113 Kg/ha mais une différence s'observe avec la dose de 170 Kg/ha. La faible performance des granules avec cette dose peut être attribuée à la diffusion rapide des granules de 1,2 g.

CONCLUSION

Il ressort de l'étude que : i) la variété NL36 répond mieux aux engrais et peut rivaliser la variété MK34. Son caractère non photopériodique à cycle court lui permet de s'adapter dans les conditions instables du changement climatique. Son aspect extérieur lui permet d'être classée parmi les variétés d'alternative de MK34, d'autant plus qu'elle présente la même performance que ce dernier en termes de rendement en grains ; ii) les deux formes d'urée ne présentent aucune différence significative sur le rendement en grains, qui peut s'expliquer par la faible performance des granules de petite taille (1,2 g). Il peut être conseillé aux riziculteurs d'utiliser la variété NL36 sur les rizières de mauvaise maîtrise d'eau et/ou sur les rizières qui peuvent être travaillées en double culture annuelle. Pourtant, le MK34 qui fait la renommée de l'Alaotra ne peut pas encore être écartée de la riziculture. Pour conforter les résultats obtenus, l'étude sur des granules d'urée plus grands nécessite d'être poursuivie d'une part, et les essais plus poussés sur la performance du NL36 d'autre part.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Bandaogo Alimata Arzouma, Juin 2010. Effet de différentes sources d'azote sur la réponse de quatre variétés de riz à l'azote à la Vallée du Kou au Burkina Faso. Mémoire de DEA. Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 46p.
- [2] Cissé Orissa, Juin 2011. Evaluation des performances agronomiques du placement profond de l'urée en riziculture irriguée dans la vallée du Sourou au Burkina Faso. Mémoire de fin de cycle pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en vulgarisation agricole. Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 42p.
- [3] Demeringo Hélène, 2005. Les techniques rizicoles au lac Alaotra à Madagascar : Analyses et propositions pour une meilleure gestion des systèmes de culture sous couvert végétal hors périmètre irrigué. Thèse en vue d'obtention du DESS. Université Paris XII Val-de-Marne, Faculté des Sciences et Technologies. 113p.
- [4] Ducrot Raphaèle, 10 décembre 1996. Régulation d'une production en situation d'incertitudes et de fortes contraintes : exemple des systèmes rizicoles du lac Alaotra (Madagascar). Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur de l'Institut National Agronomique Paris Grignon "Sciences Agronomiques". 203p.

- [5] Penot E., Domas R., Andriamalala H., Hyac P., Dupin B., Durand C., Nave S., Rabenandro T. H., Rasolomanjaka J., Octobre 2009. Rôle et place du riz pluvial dans les exploitations du lac Alaotra. SCRID/FOFIFA. 34p.
- [6] Saidou Aliou, Gnakpenou K. Denis, Balogoun Ibouaïman, Hounnahin S. Romain, Kindomihou M. Valentin, 2014. Effet de l'urée et du NPK 15-15-15 perlés et super granulés sur la productivité des variétés de riz IR841 et NERICA-L14 en zone de bas-fond au Sud-Bénin. *Journal of Applied Biosciences* 77 : 6575 – 6589.

V. PARTICIPATIONS AUX COLLOQUES ET SEMINAIRES NATIONAUX ET REGIONAUX

5.1. ANDRIAMANIRAKA H., Rabeharisoa L., 2008. L'effet du système de culture semis direct sous couverture végétale (SCV) sur les ions phosphates dans la solution des sols cultivés de Haute Terre de Madagascar. (Académie Malgache).

L'EFFET DU SYSTEME DE CULTURE SEMIS DIRECT SOUS COUVERTURE VEGETALE (SCV) SUR LES IONS PHOSPHATES DANS LA SOLUTION DES SOLS CULTIVES DE HAUTE TERRE DE MADAGASCAR

Harilala ANDRIAMANIRAKA¹, Lilia RABEHARISOA²,

(1) Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Agriculture, BP 175 Ankatso 101 Antananarivo, Madagascar,

(2) Université d'Antananarivo, Laboratoire des Radio Isotopes, Service de la Radioagronomie, BP 3383, Route d'Andraisoro, 101 Antananarivo, Madagascar,

RÉSUMÉ

L'amélioration de la fertilité naturelle des sols malgaches de « tanety » nécessite la mise au point de systèmes de culture qui assure la durabilité du fonctionnement de l'écosystème. Les cultures en semis direct sous couverture végétale (SCV) ont été proposées comme une alternative possible à des systèmes plus conventionnels basés sur le labour du sol. Leur impact sur les rendements des cultures (succession riz/soja ou maïs/soja) et les ions phosphates dans la solution du sol ont été suivis pendant plusieurs années dans le dispositif expérimental d'Andranomanelatra dans la région de Vakinankaratra. Deux régimes de fertilisation (épandage de 5 t ha⁻¹ de fumier de ferme chaque année ; épandage chaque année de 5 t ha⁻¹ de fumier de ferme avec des engrais minéraux NPK et un amendement calcique), étaient croisés aux deux systèmes de culture (SCV et Labour). L'accroissement annuel de rendements est en moyenne pour toutes les années d'étude de +130% avec le régime de fertilisation incluant le fumier, les engrais minéraux (N, P et K) et la dolomie. Il est de +36% pour le système SCV par rapport au système avec labour. Concernant les ions phosphates dans la solution du sol, à part l'effet évident de la fertilisation, le système de culture semis direct sous couverture végétale ou SCV accroît la concentration de 0,022 mg P L⁻¹ par rapport au système labour.

Mot-clés : Ions phosphates, solution de sol, sols cultivés, Haute terre de Madagascar, systèmes de culture.

ABSTRACT

The improvement of the natural fertility of the Malagasy grounds of “tanety” requires the development of farming systems which ensure the durability of the operation of the ecosystem. The cropping systems with direct seeding on permanent soil cover (systems SCV) were proposed like a possible alternative to more conventional systems based on the plowing of soil. Their impact on the crop yield (succession rice/soybean or maize/soybean) and the phosphate ions in the solution of the ground were followed during several years in the experimental device of Andranomanelatra in the area of Vakinankaratra. Two modes of fertilization were applied every year : one is manure (5 t ha⁻¹) ; the other is also 5 t ha⁻¹ of manure plus mineral fertilizer application of N, P, K and liming. On average for the 3 trials, the annual yield increase is +130% for the greatest fertilisation level. The mean of annual yield is greater (+36%) for the SCV systems compared to the plowing systems. Concerning the phosphate ions in the solution of soil, separately the obvious effect of the fertilization, the cropping systems with direct seeding on permanent soil cover (systems SCV) increases the concentration of 0,022 mg P L⁻¹ compared to the plowing systems.

Keywords : Phosphate ions, solution of soil, cultivated field, highland of Madagascar, cropping systems.

INTRODUCTION

L'importance du phosphore dans la fertilisation des cultures peut être estimée à partir de son effet sur le rendement de la plante qui peut se manifester par le développement des organes de la plante. Dans le fonctionnement du système sol-solution-plante, les ions phosphates dissous dans la solution du sol jouent un rôle important du fait que le niveau de concentration de ces ions dans la solution du sol, après prélèvement des racines, régule le transfert des ions phosphates diffusibles logés dans la phase solide du sol vers la solution, étant donné qu'environ 99% des ions phosphates prélevés par la plante proviennent de cette phase solide (Morel, 2002).

La concentration des ions phosphates dans la solution du sol est donc l'une des variables déterminant la biodisponibilité du phosphore pour les cultures.

Actuellement, dans l'objectif d'augmentation de la production agricole tout en respectant l'environnement pour le développement durable, des solutions alternatives aux habitudes des paysans devraient être trouvées. Une des causes principales de la faible production est que l'apport en éléments nutritifs au sol n'est pas suffisant ou voire même nul comme le prouvent les statistiques malgaches en matière d'utilisation des engrais. Les paysans ne peuvent généralement pas acheter des engrais et la production agricole repose essentiellement sur l'utilisation (sans compensation) des réserves du sol en éléments minéraux, pratique non durable qui conduit inévitablement à une baisse lente et inévitable de la fertilité. La deuxième cause majeure qui explique la faible fertilité des sols mis en culture est l'absence, ou le peu, d'investissement effectué par les paysans, pour améliorer et protéger les sols. Les conséquences de la mise en culture sont souvent négatives. Ainsi la pratique du 'tavy'² souvent utilisée pour mettre en culture ces sols est source de graves problèmes de pertes de sol par érosion hydrique. La productivité initiale est généralement faible et diminue encore au cours des années de culture avec l'épuisement des sols en éléments minéraux assimilables. À terme, cela se traduit par l'abandon des terrains cultivés, la dégradation des ressources en sol et des qualités du milieu.

Des chercheurs du CIRAD et leurs partenaires ont proposés et étudiés depuis plusieurs années des systèmes de cultures avec semis direct sur couverture végétale (SCV) conçus pour augmenter et maintenir la productivité de ces sols tout en les protégeant afin de minimiser les pertes par érosion des nutriments (Séguy et al., 2006 ; Husson et al., 2006). Les concepts sous-jacents à la mise au point et au développement des systèmes SCV ont été explicités par Séguy et al. (2006) et reposent sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Les points essentiels sont : une protection efficace du sol par une couverture permanente du sol ; une couche superficielle avec une activité biologique intense bénéfique pour la structure du sol, la biodisponibilité des éléments minéraux, la teneur en matière

² La pratique du « tavy » désigne en malgache la pratique de l'abattis-brûlis (slash and burn), qui est habituellement utilisée pour mettre en culture des sols sous forêt ou sous des anciennes jachères. Elle consiste à couper les ligneux puis à brûler la végétation après séchage.

organique ; une production de biomasse importante associée à une utilisation et un recyclage culture du type semis direct sous couverture végétale, à travers les matières organiques qu'il apporte, modifie physiquement et chimiquement le sol et donc sa réactivité par rapport à optimale des éléments minéraux souvent présents en quantités limitées dans ces sols forestiers.

Le système de la fixation ou à la libération des ions comme les phosphates. Par ailleurs, l'apport d'engrais minéraux et l'amendement calcique ont également des effets non seulement sur la composition chimique du sol mais aussi sur son comportement vis-à-vis de la rétention ou la libération des ions.

Le comportement du sol vis-à-vis d'un élément comme le phosphore va donc être différent selon les pratiques culturales. Cette différence peut être observée à travers les résultats sur les récoltes des cultures au champ.

Cette étude est ainsi consacrée à l'analyse de l'effet des pratiques agricoles sur ces ions phosphates dans la solution du sol et les rendements de culture.

Pour doser les ions phosphates dans la solution du sol, plusieurs méthodes existent, à savoir le dosage par chromatographie ionique, la spectrométrie d'émission atomique (ICP) et la colorimétrie. Les différences des résultats obtenus s'expliquent par la spéciation du phosphore dissous dans la solution du sol (Morel, 2002 ; Rabeharisoa, 2004). Les résultats des différentes recherches ont donné avantages à la méthode chromatographie ionique (Masson et al., 2001 ; Rabeharisoa, 2004) face aux méthodes de dosage par colorimétrie.

Pourtant chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients dans sa manipulation et sur la fiabilité de ses résultats. Mais dans notre étude, après avoir comparé les deux méthodes de dosage par colorimétrie et par chromatographie ionique, nous avons utilisé la méthode de dosage par colorimétrie faute de disponibilité des autres appareils et aussi c'est la méthode la plus utilisée dans l'étude de détermination de la quantité du phosphore dans le sol (phosphore total du sol, phosphore assimilable et phosphore dissous dans la solution du sol).

La méthode de dosage par colorimétrie peut être au bleu (Duval ,1963 ; John, 1970) ou au vert malachite (Van Veldhoven et Mannaerts, 1987). Dans ces deux méthodes, il y a une formation et réduction d'un complexe phosphomolybdate en milieu acide, mais c'est la méthode au vert malachite qui est le plus sensible par rapport à la méthode au bleu (Morel, 2002).

Pour pouvoir vérifier l'effet des systèmes de culture sur le rendement de culture et les ions phosphates dans la solution du sol, plusieurs étapes ont été suivies et sont présentées successivement dans cet article en comparant les deux systèmes de culture sous deux niveaux de fertilisation : l'évolution des rendements de cultures pendant plusieurs années dans le dispositif d'Andranomanelatra et la concentration des ions phosphates dans la solution du sol en fonction des traitements et selon les méthodes de dosage utilisées.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

1. Dispositif étudié

Dans cet article le dispositif d'Andranomanelatra, qui est situé dans la région de Vakinankaratra au cœur des Hautes Terres malgaches, à une altitude d'environ 1600 m, a été choisi pour étudier l'effet des systèmes de culture sur les rendements de culture, les concentrations des ions phosphates dans la solution du sol et les ions phosphates diffusibles dans la phase solide du sol. Le climat y est du type tropical d'altitude humide et se caractérise par deux saisons distinctes : une saison sèche et fraîche de mai à septembre, et une saison pluvieuse et chaude d'octobre à avril. La température moyenne annuelle est de 16°C avec des températures minimales pouvant atteindre des valeurs négatives pendant la saison sèche, et maximales de 31°C pendant la saison humide. La pluviosité annuelle moyenne est d'environ 1400 mm pour les sites où sont réalisées les expérimentations mais peut varier de 1200 à 2400 mm en fonction de l'altitude (Michellon et al, 2004).

Le dispositif a été mis en place et suivi par l'ONG « Tany sy Fampanandrosoana » (TAFa) avec l'appui du CIRAD, depuis 1991. Ce choix a été justifié par le fait que ce dispositif peut être représentatif de la majorité des pratiques culturales utilisées dans les Hautes Terres de Madagascar.

2. Les traitements

Quatre systèmes de cultures qui se différencient essentiellement sur le mode de préparation du sol, soit semis direct sur couverture végétale (SCV) ou labour (Lb), et la fumure réalisée ont été considérés :

- Le labour (Lb) est réalisé avec une bêche (angady), une charrue ou un tracteur selon la superficie sur une profondeur de 20 à 25 cm. Avant le labour, le sol est défriché et les résidus de récoltes sont exportés hors de la parcelle. Le sarclage après semis ou en cours du cycle se fait manuellement.
- Le système SCV que nous avons retenu est avec une couverture morte maintenue en permanence sur le sol. Le sol n'est jamais travaillé et le semis est effectué directement dans la couverture après ouverture d'un simple trou ou d'un sillon. La couverture végétale morte est constituée des résidus de cultures qui sont donc restitués sur la parcelle. Avant semis et éventuellement pendant le cycle de la culture on utilise un herbicide (gramoxone de 1,5 à 2 L ha⁻¹) pour lutter contre les adventices.
- Un traitement, désigné par F1 consiste à épandre 5 t ha⁻¹ de fumier de bovin chaque année et correspond à une pratique courante et recommandée en milieu paysan.
- Un traitement désigné par F2 consiste à épandre chaque année 5 t ha⁻¹ de fumier de bovin plus une fertilisation minérale NPK et à apporter un amendement calcique sous forme de dolomie à raison de 500 kg ha⁻¹. Le détail de la fertilisation minérale NPK est présenté dans le tableau 1.

Tableau 1 : Les quantités (kg ha⁻¹) apportées de phosphore (P) pour les niveaux de fertilisation F1 et F2 dans le dispositif d'Andranomanelatra

Culture	Niveau de fertilisation	Fumier	Engrais	Total
kg ha ⁻¹				
Maïs/Soja	F1	6,1	-	6,1
Maïs/Soja	F2	6,1	29,5	35,6

3. Les échantillons de sol

Les échantillons de sol ont été prélevés en avril-mai 2003, en fin de saison de culture (après récolte). Sur chaque parcelle élémentaire, 4 prélèvements au cylindre, dont deux sur lignes et deux sur interlignes, sont effectués à 20cm de profondeur. Les échantillons sont séchés à l'air, à l'ombre, avant d'être tamisé à 2 mm. Des parties aliquotes des 4 prélèvements (répétitions intra parcelles) sur la même parcelle, ont été regroupées pour constituer un échantillon homogène par parcelle pour chaque traitement étudié (Razafimbelo T., 2005).

Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques du sol d'Andranomanelatra sur la profondeur de labour (0-20 cm) pour les quatre traitements (Lb_F1, Lb_F2, SCV_F1 et SCV_F2)

		Lb_F1	Lb_F2	SCV_F1	SCV_F2
Humidité à 105°C Sol					
▪ Humidité	g kg ⁻¹	23.2	22.3	24	24.3
pH					
▪ pH Eau sol	-	4.52	5.10	4.86	5.34
▪ pH KCl N	-	4.20	4.48	4.23	4.58
Granulométrie					
▪ Argile (< 2 µm)	g kg ⁻¹	535	458	607	582
▪ Limons fins (2-20 µm)	g kg ⁻¹	223	245	187	224
▪ Limons grossiers (20-50 µm)	g kg ⁻¹	65	100	57	49
▪ Sables fins (50-200 µm)	g kg ⁻¹	88	85	60	53
▪ Sables grossiers (200-2000 µm)	g kg ⁻¹	89	112	89	92
Carbone (C) Organique-Azote (N) Total du sol					
▪ Carbone (C) organique	g kg ⁻¹	31.3	31.1	39.7	37.8
▪ Azote (N) total	g kg ⁻¹	2.22	2.27	2.92	2.8
▪ C/N	-	14.1	13.7	13.6	13.5
▪ Matière organique	g kg ⁻¹	54.1	53.8	68.6	65.4
CEC Cobaltihexamine					
▪ CEC cobaltihexamine	cmol kg ⁻¹	4.24	4.88	5.49	6.18
Ca, Mg, Na, K, Fe, Min, Al à la Cobaltihexamine					
▪ Calcium (Ca)	cmol kg ⁻¹	0.32	1.50	1.33	3.20
▪ Magnésium (Mg)	cmol kg ⁻¹	0.13	1.03	0.63	2.01
▪ Sodium (Na)	cmol kg ⁻¹	0.011	0.009	0.017	0.014

▪ Potassium (K)	cmol kg⁻¹	0.099	0.206	0.242	0.415
▪ Fer (Fe)	cmol kg⁻¹	0.019	0.022	0.020	0.019
▪ Manganèse (Mn)	cmol kg⁻¹	0.112	0.106	0.139	0.107
▪ Aluminium (Al)	cmol kg⁻¹	2.30	0.95	1.81	0.59
Phosphore (P₂O₅) Total HF Sol					
▪ Phosphore (P ₂ O ₅)	g 100g⁻¹	0.138	0.153	0.150	0.177

4. Dosage colorimétriques des ions phosphates en solution

La méthode du complexe au molybdate d'ammonium décrite par John M.K. (1970) qui est reprise par Martin E. et Morel C. (2002) a été utilisée pour doser les ions phosphates dans la solution du sol.

La détermination des ions phosphates en solution s'effectue en deux étapes. La première consiste en une hydrolyse des phosphates présents dans l'échantillon.

Dans la seconde étape, les ions orthophosphates réagissent avec les ions molybdates pour former un complexe phosphomolybdate dans un milieu acide et avec de vert de malachite.

Pour former le complexe phosphomolybdate, il faut préparer 2 réactifs (Martin E. et Morel C., 2002) :

Le réactif 1 est préparé, en mélangeant d'abord 168 ml d'acide sulfurique concentré avec 700 ml d'eau. Puis, après avoir refroidi l'ensemble dans la glace pour combattre l'échauffement dû à la dissolution de l'acide sulfurique, on rajoute 17,55 g de molybdate d'ammonium [(NH₄)₆Mo₇O₂₄, 4H₂O]. On porte ensuite à 1000 ml avec de l'eau.

Pour le réactif 2, on dissout dans 700 ml d'eau, à 80-90°C, 3,5g de PVA (alcool polyvinylique). Après refroidissement, on ajoute 0,35g de vert de malachite et filtrer sur Whatman N° 541. On ajuste le volume à 1000ml avec de l'eau.

On met 2ml de réactif 1 dans chacun des tubes (pour tous les tubes de la gamme étalon, des 10 blancs et les échantillons) et attendre environ 10 minutes pour mettre 2ml de réactif 2. Agiter les tubes à l'aide d'un agitateur Vortex, puis attendre environ 2 heures avant de passer au colorimètre.

La solution de réactif est ajoutée au même moment dans tous les tubes afin que la coloration se développe dans les mêmes conditions pour la gamme étalon, les blancs et les échantillons à doser.

Pour le dosage par colorimétrie avec de vert de malachite on utilise la longueur d'onde 610nm

5. Analyses statistiques des données

Dans l'étude de comparaison de l'effet du système de culture sur le rendement annuel et cumulé ainsi que sur la concentration des ions phosphates dans la solution du sol ont été analysés statistiquement par une analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs (SCV et Lb) et deux modalités de fertilisation (F1 et F2). Les écarts sont considérés comme significatifs pour un seuil de probabilité inférieur à 0,05.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

1. Les ions phosphates dans la solution du sol

Dans le but de comprendre les origines des variations de la concentration des ions phosphates dans la solution du sol, nous avons déterminé ces concentrations selon les pratiques culturales (fertilisation et système de culture), qui sont supposés comme des éléments jouant des rôles importants dans cette variation.

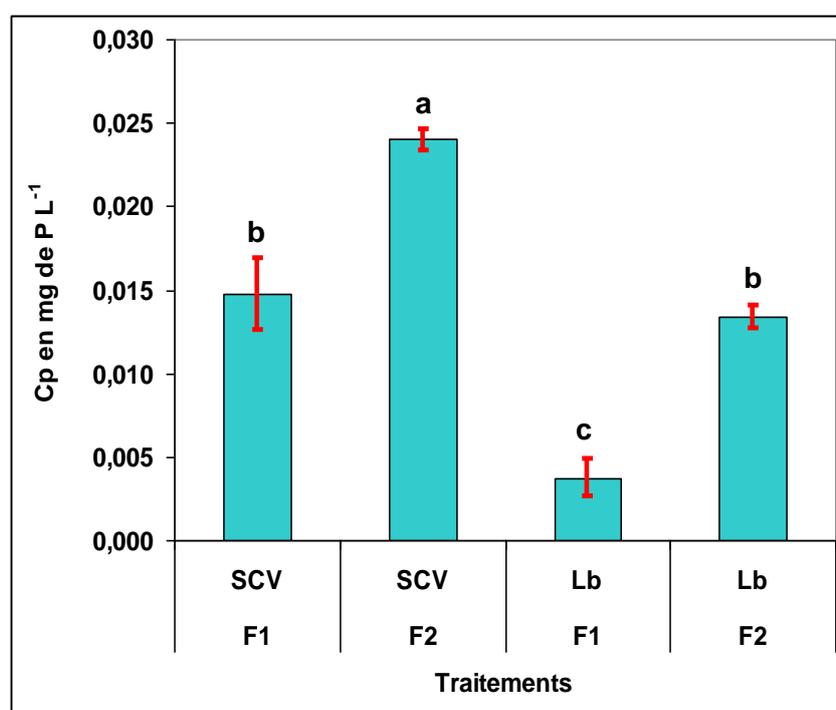


Figure 1 : La concentration des ions phosphates dans la solution de sol (C_p , mg P L⁻¹) selon les différents traitements dans le dispositif d'Andranomanelatra.

Ce graphique montre que la concentration des ions phosphates dans la solution du sol varie en fonction du traitement.

En effet, pour la fertilisation la différence est significative que ce soit pour le système SCV (0.015 mg de P L⁻¹ pour SCV_F1 contre 0.024 mg de P L⁻¹ pour SCV_F2) ou le labour (0.004 mg de P L⁻¹ pour Lb_F1 contre 0.013 mg de P L⁻¹ pour Lb_F2). Cette différence est également constatée au niveau du système de culture, c'est-à-dire pour le SCV et le labour (0.015 mg de P L⁻¹ pour SCV_F1 contre 0.004 mg de P L⁻¹ pour Lb_F1 et 0.024 mg de P L⁻¹ pour SCV_F2 contre 0.013 mg de P L⁻¹ pour Lb_F2).

2. Les effets des différents traitements sur les concentrations des ions phosphates dans la solution du sol

▪ L'effet bilan sur la concentration des ions phosphates (Cp) dans le sol
La relation entre la concentration des ions phosphates dans la solution de sol (Cp, mg P L⁻¹) et le bilan cumulé de P (kg P ha⁻¹) pour les différents traitements durant les années (2003, 2006 et 2007) dans le dispositif d'Andranomanelatra est présentée dans la figure 2.

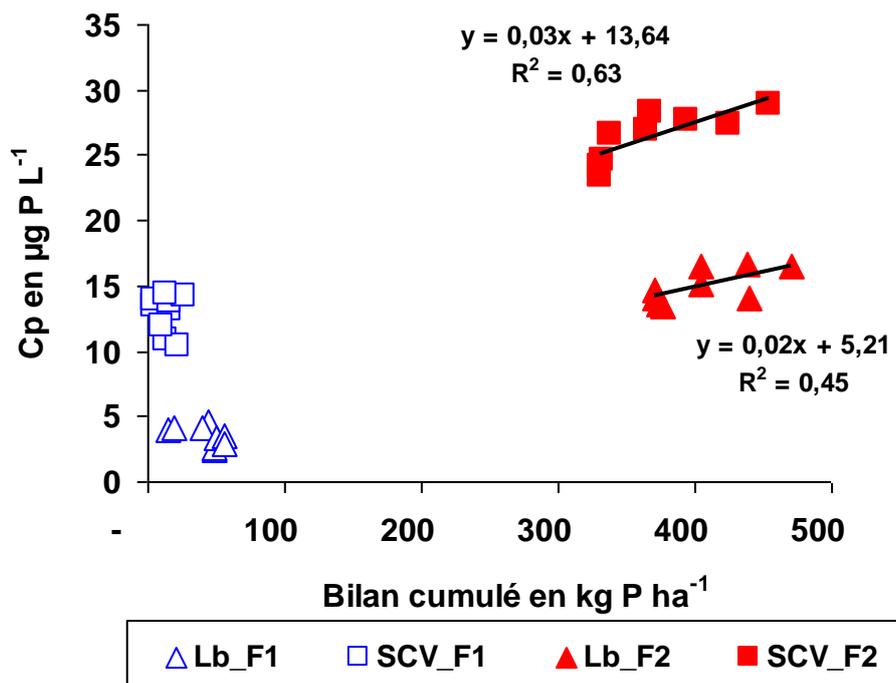


Figure 2 : Relation entre la concentration des ions phosphates dans la solution de sol (Cp, mg P L⁻¹) et le bilan cumulé de P (kg P ha⁻¹) pour les différents traitements durant les années (2003, 2006 et 2007) dans le dispositif d'Andranomanelatra.

D'après ce graphique, l'évolution de la concentration des ions phosphates dans la solution du sol est proportionnelle au bilan cumulé. Mais l'accroissement est plus net avec la modalité F2. Ce phénomène s'explique par l'effet du bilan. En effet, le bilan cumulé de P avec la modalité F1 est largement plus faible par rapport à celui obtenu avec la modalité F2. Malgré la différence observée sur l'accroissement de Cp en fonction de traitement, cette relation Cp et bilan est en accord avec les résultats obtenus par Morel en 2002 et Stroia et al. en 2006.

- L'effet de l'aluminium sur la concentration des ions phosphates (Cp) dans le sol

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe de matériels et méthodes sur les traitements des cultures dans le sol d'Andranomanelatra, la fertilisation en F2 apporte en plus des

amendements calciques comme la dolomie (500 kg ha^{-1}). Cet apport modifie la composition des éléments dans le sol surtout le pH du sol (pH = 4.77 en SCV_F1 contre 4.95 en SCV_F2 et 4.27 en Lb_F1 contre 4.76 en Lb_F2). Et cette augmentation de pH pourrait également avoir des effets sur la concentration de l'aluminium échangeable qui peut réagir avec les ions phosphates dans la solution du sol.

Dans le cas de nos ferralsols acides, la forme prédominante des ions phosphates dans le sol est l'espèce ionique H_2PO_4^- . Cet ion ne peut pas être libre mais complexé avec des cations divalents ou trivalents de fer et/ou d'aluminium pour former des complexes P-Fe ou P-Al par exemple. La spéciation de l'aluminium varie également avec le pH. Mais l'augmentation de pH dans le traitement F2 par l'apport de dolomie fait diminuer les aluminiums échangeables dans la solution du sol (Figure 4) pour libérer les ions phosphates complexés.

En effet, la Figure 3 montre que l'aluminium échangeable dans le sol sans apport de dolomie (en traitement F2) est moins important que dans le sol traité seulement avec des fumiers de ferme.

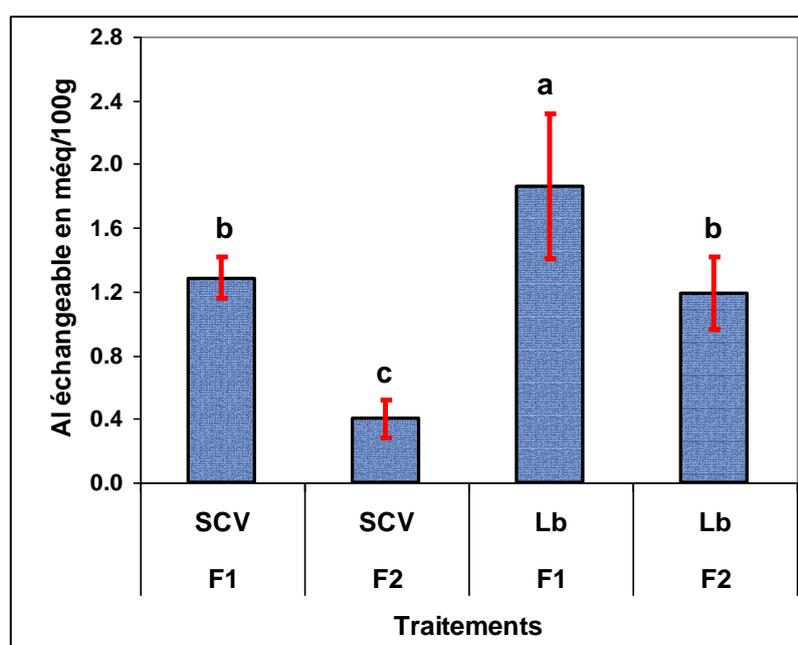


Figure 3 : l'Aluminium échangeable dans le sol d'Andranomanelatra selon les quatre traitements (SCV_F1, SCV_F2, Lb_F1 et Lb_F2)

La figure 4 montre la corrélation entre le pH et l'aluminium échangeable et la spéciation de l'aluminium en fonction de pH du sol.

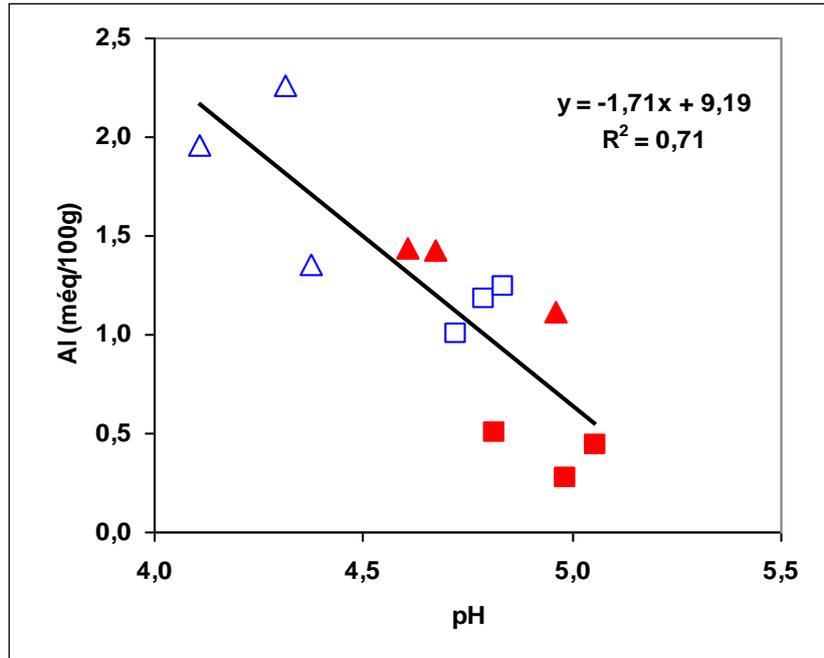


Figure 4 : Régression linéaire entre l'Aluminium échangeable et le pH du sol d'Andranomanelatra (12 observations)

Ce graphique montre que quand le pH augmente, l'aluminium monomérique Al^{3+} , qui pourrait complexer les ions phosphates, disparaît dans la solution du sol.

La Figure 5 montre la corrélation entre la concentration des ions phosphates dans la solution du sol et l'aluminium échangeable. On voit bien que moins il y a d'aluminium échangeable dans la solution du sol plus la concentration des ions phosphates augmente.

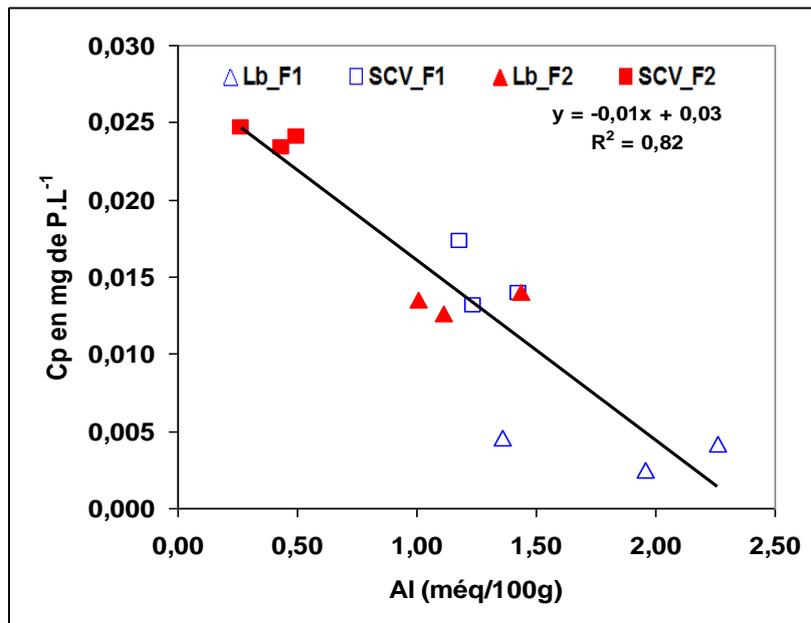


Figure 5 : Régression linéaire entre l'Aluminium échangeable et la concentration des ions phosphates dans le sol d'Andranomanelatra (12 observations)

- L'effet de travail du sol sur la concentration des ions phosphates (Cp) dans le sol

A l'issue de ces résultats d'analyse au laboratoire et du test statistique, on a trouvé que le système de culture semis direct avec couvertures végétales a un effet positif sur la quantité des ions phosphates dans la solution du sol d'Andranomanelatra. Mais on peut dire aussi que le travail du sol avec labour pourrait avoir des effets négatifs sur la quantité des ions phosphates dans le sol. En effet, le fait de labourer le sol peut augmenter la perte en ions phosphates par lessivage des éléments en profondeur et par érosion de ceux qui sont restés en surface sans protection par de couvertures végétales. Mais dans la circonstance où s'est passée notre étude, nous avons supposé que ces pertes sont négligeables. Cette hypothèse est probablement raisonnable pour ce qui concerne les fuites de P vers la profondeur du profil de sol qui a une texture argileuse et limoneuse. Un calcul rapide, volume d'eau lixivié (environ 500 mm) par la concentration de la solution de P en solution dans ce type de sol de l'ordre de 20 $\mu\text{g P L}^{-1}$ (Rabeharisoa, 2004 ; Oberson et al., 1999), montre que le P lixivié ne représente que quelques dizaines de grammes de P par hectare.

Par contre, l'hypothèse selon laquelle le P ruisselé est négligeable sans doute moins même si la pente de la parcelle expérimentale des différents dispositifs reste faible. Une des raisons majeures de la présence d'une couverture végétale permanente est son rôle protecteur vis-à-vis de la désagrégation des particules de sol par l'impact direct des gouttes de pluie et du ruissellement qui peut en résulter. Selon l'étude de Rasoloniaina en 2005, le système en labour est plus favorable au ruissellement (1100 mm) par rapport au système semis direct sous couverture végétale (450 mm). Il est donc probable que les pertes de P par érosion hydrique/ruissellement diffèrent en particulier avec le mode de préparation et de semis du sol. D'ailleurs plusieurs études ont souligné que les pertes de terre sont plus importantes en utilisant les techniques de préparation conventionnelle à base de labour que pour les techniques à base de semis direct. Ainsi, Silva et al., 1997, rapporte une perte annuelle, en moyenne sur 5 ans, de 40 t ha⁻¹ an⁻¹ pour une parcelle des Cerrados (savane) brésilienne sous climat tropical saisonnier ayant une pente de 0.04 m m⁻¹. Pour les systèmes à base de semis direct sur couverture permanente du sol, les pertes étaient de l'ordre de 10 fois plus faibles. L'étude faite par Rasoloniaina en 2005 sur les hautes terres malgaches, dans les dispositifs de TAFA Antsirabe, a montré que la perte en terre est plus importante (35 t ha⁻¹ an⁻¹) avec le système labour qu'avec celui de semis direct (7,5 t ha⁻¹ an⁻¹). Compte tenu de la teneur en P total de ce type de sol, en moyenne de 500 mg P kg⁻¹ (Rabeharisoa, 2004), le flux annuel de P ruisselé est de 17,5 kg P ha⁻¹ pour le système labour et 3,75 kg P ha⁻¹ pour le SCV.

Dans les deux systèmes comparés, à part le non labour du sol dans le système semis direct, ce sont les couvertures végétales qui pourraient être l'origine de la différence à travers les matières organiques apportées par ces couvertures végétales.

Evidemment que les couvertures végétales qu'elles soient mortes ou vivantes apportent des matières organiques au sol.

Les essais menés sur le site de Boigneville par l'ITCF et l'INRA (Balesdent, 1997) ont permis d'étudier comparativement les effets du passage d'un système de travail du sol (labour) à un système simplifié (travail superficiel ou semis direct) sur la répartition des matières organiques et leur évolution. Après 28 années d'expérimentation, un léger accroissement du stock de matière organique (+7%) comparé au stock initial dans le traitement avec labour et restitution des résidus de récolte est constaté. Le travail superficiel et le semis direct conduisent à une plus forte accumulation de matière organique dans le sol qu'avec le labour : elle est respectivement de +14% et +13% du stock initial.

Des synthèses d'essais comparant les stocks de matière organique sous différents régimes de travail du sol, principalement aux Etats-Unis, montrent également que les stocks de matière organique sont en moyenne plus élevés sans travail du sol mais cette augmentation est relativement limitée.

L'étude menée par Randriantsoa (2001) sur un sol ferrallitique malgache a montré que par rapport au labour, le SCV apporte 80% de C.

Par rapport aux études récentes faites par Razafimbelo en 2005 sur le dispositif d'Andranomanelatra, Les stocks de carbone sous SCV et labour sont significativement différents pour la couche 0-20cm.

Mais la question qui se pose ici c'est que est-ce que ces matières organiques apportées par les couvertures végétales sont-elles vraiment les responsables de cette augmentation des ions phosphates dans la solution du sol ?

Ainsi en partant sur cette hypothèse : l'augmentation des ions phosphates dans la solution du sol pourrait être obtenue par la matière organique apportée par les couvertures végétales, deux phénomènes peuvent exister pour la confirmer :

Premièrement, dans les matières organiques, on peut trouver déjà de phosphore organique qui peut se retrouver dans la solution du sol après une libération et une minéralisation par des microorganismes dans le sol. Par exemple dans le fumier de ferme apporté dans le cadre de la fertilisation dans cette étude, dans 5t ha⁻¹ de fumier on peut avoir 6,1kg de P ha⁻¹ (Analyse ONG Tafa).

Donc rien qu'avec le fumier on peut déjà avoir une quantité non négligeable de P dans le sol, alors que les couvertures végétales pourraient produire une biomasse importante en quantité qui sera une source de matière organique sur et dans le sol.

Toutefois il faut noter quand même que le niveau de pH trop bas ne permet pas aux autres microorganismes de transformer efficacement les matières organiques libérées par l'action des champignons. Mais quand on regarde le pH du sol dans notre dispositif, le pH du sol dans le système semis direct sous couverture végétale ou SCV est plus élevé que celui dans le système labour, donc l'action des microorganismes sur la minéralisation peut se dérouler normalement.

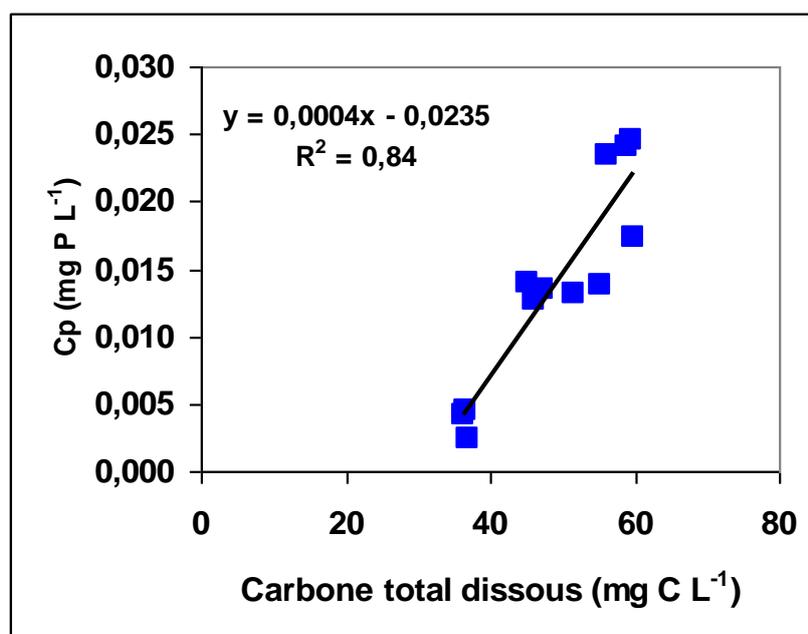


Figure 6 : Régression linéaire entre le carbone total dissous et la concentration des ions phosphates dans le sol d'Andranomanelatra (12 observations)

Deuxièmement, l'incorporation de la matière organique dans les sols peut augmenter la quantité des ions phosphates dans la solution du sol. En effet, étant chargées négatives dans une condition d'acidité faible, les matières organiques pourraient être considérées comme des concurrents des autres produits de décomposition des matières organiques (acides organiques de faible poids moléculaire, acides humiques et fulviques) et les ions phosphates, qui sont aussi chargés négativement, dans le sol pour être fixés par des cations.

Par conséquent, la complexation ou la liaison formée entre les composés organiques et les cations (Aluminium ou Fer) pourrait libérer les ions phosphates dans la solution du sol.

2. L'effet du système de culture sur le rendement des cultures

L'évolution pluriannuelle de la moyenne (n= 3) des rendements est présentée pour les différents traitements dans la Figure 2 pour le dispositif Andranomanelatra. Pour ce dispositif d'Andranomanelatra, les résultats présentés sont les rendements obtenus pendant la période 1996 à 2003, soit 8 campagnes. Le traitement SCV_F1 a été choisi comme référence pour analyser et comparer l'effet des traitements (Figure 2). Notre choix est justifié par le fait que dans notre étude nous voulons regarder l'effet du système de culture semis direct sur couvert végétal et que le niveau de fertilisation F1, fumier de ferme avec une dose de 5 t ha⁻¹, est une pratique courante et recommandée au niveau agronomique et accessible à de nombreux paysans.

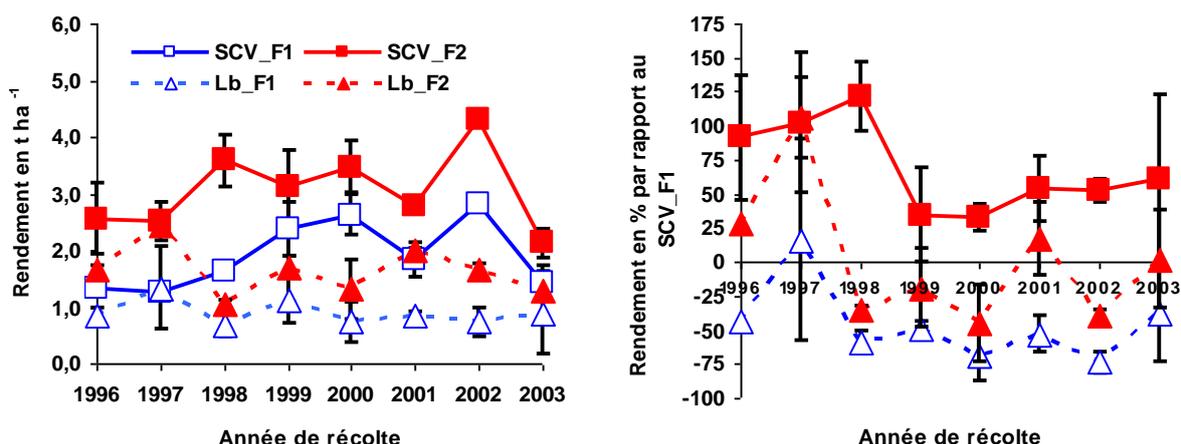


Figure 7 : Evolution pluriannuelle de la moyenne du rendement en grain ($t\ ha^{-1}$) en fonction des traitements dans une rotation culturale Maïs/Soja de 1996 à 2003 dans le site d'Andranomanelatra. Gauche: moyenne ; droite : en % par rapport au traitement SCV_F1.

Ces graphiques mettent en évidence une variabilité interannuelle élevée puisque le rendement moyen varie entre $0.6\ t\ ha^{-1}$ et $4.1\ t\ ha^{-1}$. Il en est de même des écarts entre les différents traitements, extrêmement variables suivant les années. Ils varient de quelques centaines de kilos à plusieurs tonnes par hectare.

Selon le rapport de campagne de TAFA (Michellon et al., 2004), la variabilité des rendements peut s'expliquer soit par des sécheresses et des vents violents qui ont provoqué des dégâts mécaniques (dessèchement des feuilles) c'était le cas du soja en particulier avec le labour, soit par l'attaque d'insectes (vers blancs) et de nouvelles maladies qui affectent les plantes en fin de cycle (rouille, complexe fongique, anthracnose, septoriose) et ont provoqué une réduction importante des rendements.

Cette variabilité expérimentale élevée ne permet pas de mettre en évidence des écarts significatifs dans les rendements entre les différents traitements et les années d'étude. Pour limiter les effets annuels, nous avons calculé le rendement cumulé pour chaque parcelle en sommant le rendement de chaque année sur la période d'expérimentation. La moyenne, l'écart-type ont ensuite été calculés ainsi que l'ANOVA et la comparaison des traitements. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.

L'ANOVA à deux facteurs et deux modalités, fertilisation à deux niveaux et système de culture avec deux modalités également, montre qu'il y a un effet significatif des deux facteurs et l'absence d'interaction. Le facteur SCV entraîne un gain de $+9.6\ t\ ha^{-1}$ par rapport aux systèmes avec labour. Le gain associé à la fertilisation la plus élevée (fumier avec engrais minéraux NPK et dolomie) est de $8.0\ t\ ha^{-1}$.

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

Traitement	Rendement cumulé en t ha ⁻¹	Variation de rendement par rapport au SCV_F1
SCV_F1	14,7 (±1,0) b	0%
SCV_F2	24,7 (±1,9) a	+68%
Lb_F1	7,2 (±2,2) c	-51%
Lb_F2	13,1 (±0,7) b	-11%

En regardant le classement des traitements (a : SCV_F2, b : SCV_F1 et Lb_F2, c : Lb_F1) sur la concentration des ions phosphates dans la solution du sol et sur les rendements des cultures, une corrélation positive existe (Figure 8) avec un coefficient de corrélation $r^2=0,97$.

L'explication de l'amélioration des rendements dans le système de culture semis directe ou SCV peut donc être basée sur l'augmentation de la concentration des ions phosphates dans la solution du sol sous l'effet de ce système.

Ce phénomène est tout à fait naturel car la plante se nourrit des ions libres dans la solution du sol. Donc plus les éléments nutritifs disponibles dans la solution du sol sont élevés, plus la plante peut produire beaucoup de biomasse.

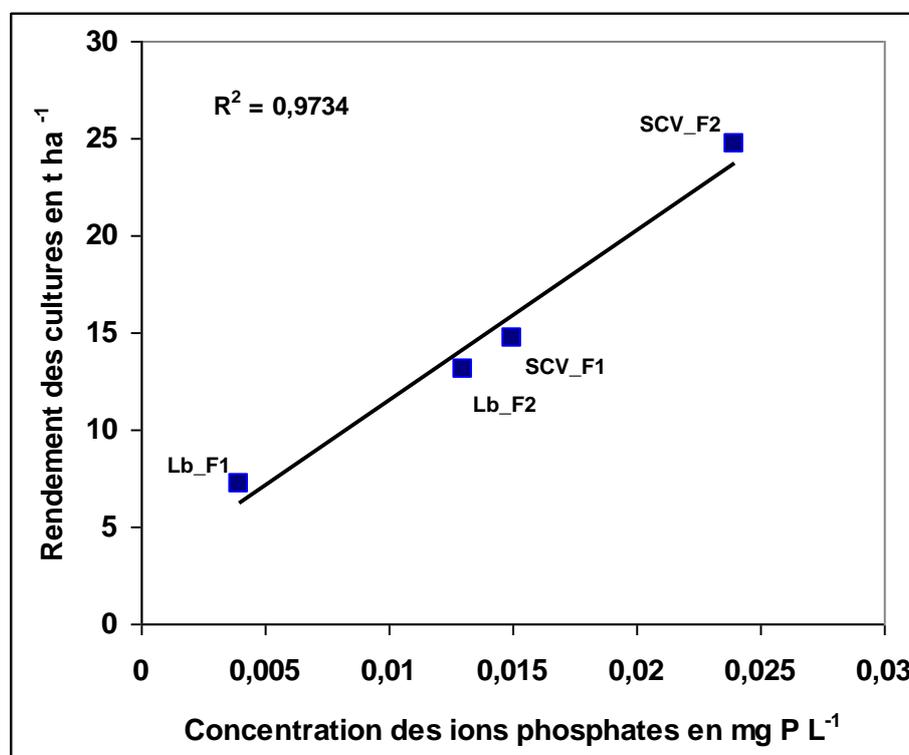


Figure 8 : Corrélation entre les ions phosphates dans le sol et les rendements des cultures

CONCLUSION

Les ions phosphates dans la solution du sol jouent un rôle très important non seulement dans le fonctionnement du cycle de phosphore dans un système cultivé, mais surtout ils déterminent les rendements des cultures. La concentration de ces ions phosphates dans la solution du sol peut varier en fonction de différents facteurs, entre autres les types de sol et les pratiques culturales.

Dans notre étude, concernant les effets des pratiques culturales sur la concentration de ces ions phosphates dans la solution du sol, l'apport de dolomie et des engrais minéraux phosphatés dans le traitement F2 et des matières organiques par les couvertures végétales du système SCV sont jugés comme des facteurs influençant l'augmentation de cette concentration. La dolomie a évidemment eu un effet sur le pH du sol qui a modifié la propriété chimique du sol en agissant sur les autres éléments chimiques comme l'aluminium en faveur des ions phosphates. Dans le système SCV, il y avait les matières organiques qui ont agi également non seulement sur la propriété physique du sol en l'améliorant mais aussi sur l'aspect chimique.

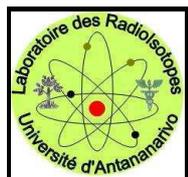
Pour conclure, l'augmentation des productions agricoles pourrait être envisagée en adoptant ce système de culture SCV avec un apport raisonné des engrais minéraux et des amendements calciques. Cette alternative peut être donc considérée comme une des solutions pour un développement durable car non seulement elle augmente la production mais aussi elle protège l'environnement surtout le sol contre l'érosion.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Balesdent J.** 1997. Un point sur les matières organiques des sols. Numéro spécial "Le sol, un patrimoine à préserver". Chambres d'Agriculture, supplément au n° 856, juin 1997, 17-22
- Duval L.**, 1963. Etude des conditions de validité du dosage céruléomolybdique de l'acide phosphorique. Conséquences pratiques. *Chimie Analytique* 45 :237 :249.
- Husson, O., Séguy L., Michellon R. and Boulakia S.**, 2006. Restoration of acid soil systems through agroecological management. Pp. 343-356. In : *Biological approaches to sustainable soil systems*. Ed. N. Uphoff et al. CRC Taylor & Francis.
- John M.K.**, 1970. Colorimetric determination of phosphorus in soil and plant materials with ascorbic acid. *Soil Sci.* 109 : 214-220
- Martin E. et Morel C.**, 2002. Détermination du flux brut des ions phosphates transférés entre le sol et la solution : évaluation par la méthode de traçage des ions P en solution et de l'analyse de leur dilution isotopique dans une suspension de sol à l'état stationnaire et par le dosage des ions P en solution. Protocole d'analyse au laboratoire.
- Masson P., Morel, C., Martin, E., Oberson, A. and Friesen, D.** 2001. Comparison of soluble P in soil water extracts determined by ion chromatography, colorimetric, and inductively coupled plasma techniques in ppb range. *Commun. Soil Sci. Plant ana.*, 32 (13&14) : 2241-2253.
- Michellon R., Razanaparany C., Moussa N., Andrianasolo H., Fara Hanitriniaina J. C., Razakamanantoanina R., Rakotovazaha L., Randrianaivo S., Rakotoniaina F.**, 2004. Rapport de campagne 2002-2003 Hautes Terres et Moyen Ouest, 98p
- 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 de P et du comportement des plantes dans les parcelles de grandes cultures. Mémoire d'HDR à l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 80 p.
- Oberson A., Friesen D.K., Tiessen H., Morel C., Stahel W.**, 1999. Phosphorus status and cycling in native savanna and improved pastures on an acid low-P Colombian Oxisol. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 55 :77-88.

- Rabeharisoa L.**, 2004. Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des hautes terres de Madagascar. Thèse de Doctorat de l'Université D'Antananarivo, Spécialité : science du sol. 202p.
- Randriantsoa M.**, 2001. Rôle de la matière organique dans la fertilité phosphorique d'un sol ferrallitique des hautes terres malgaches. DEA de l'Ecole Nationale Agronomique de Lorraine France.
- Rasoloniaina M.**, 2005. – Caractérisation des impacts de différents systèmes de culture en semis direct sur couverture végétale sur la réduction de ruissellements et érosions. Mémoire d'ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, 49p.
- Razafimbelo T.**, 2005. Stockage et protection du carbone dans un sol ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des hautes terres malgaches. Thèse de Doctorat en Science du Sol de l'ENSAM, 123p.
- Séguy L., S. Bouzinac S. and O. Husson**, 2006. Direct-seeded tropical soil systems with permanent soil cover. Pp. 323-342. In: Biological approaches to sustainable soil systems. Ed. N. Uphoff et al. CRC Taylor & Francis.
- Silva M.L.N., Freitas P.L., Blancaneau P., Curi N., Lima J.-M.**, 1997 - Relação entre parâmetros da chuva e perdas de solo e determinação da erodibilidade de um Latossolo Vermelho-escuro em Goiânia (GO). Revista Brasileira de Ciência do Solo, 21, 131-137.
- Stroia C., Morel C., and Jouany C.**, 2006. Dynamics of diffusive soil phosphorus in two grassland experiments determined both in field and laboratory conditions. Agriculture, Ecosystems & Environment, to be published in 2006
- Van Veldhoven, P.P. and Manaerts G. P.**, 1987. Inorganic and organic phosphate measurements in the nanomolar range. Analytical Biochemistry 161 : 45-48.

5.2. Falinirina M. V., Masse D., Rabeharisoa L., ANDRIAMANIRAKA H., 2012. Amélioration de la productivité de maïs sur tanety avec l'apport des matières organiques de qualité. Forum de la recherche. 10, 11, 12 juillet 2012 Antananarivo Madagascar.



AMELIORATION DE LA PRODUCTIVITE DE MAÏS SUR TANETY AVEC L'APPORT DES MATIERES ORGANIQUES DE QUALITE

Marie Virginie Falinirina⁽¹⁾, Lilia Rabeharisoa⁽²⁾, Harilala Andriamaniraka⁽³⁾, Dominique Masse⁽⁴⁾

- (1) Institut Supérieur de Technologie, Ambositra 306
 (2) Service de la Radioagronomie, BP 3383, Route d'Andraisoro, 101 Antananarivo, Madagascar
 (3) Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Agriculture, BP 175 Ankatso 101 Antananarivo, Madagascar,
 (4) UMR Eco&Sols -Ecologie Fonctionnelle& Biogéochimie des Sols&des Agroécosystèmes -(IRD)

Objectifs

-Evaluer l'intérêt des amendements locaux à base de fumier, déchets urbains et compost en agriculture

-Améliorer la production de maïs en valorisant les ferralsols de tanety

-Maintenir durablement la fertilité du sol

Matériel

➤ Engrais minéraux : 300 kg.ha⁻¹ NPK

➤ Amendement organique :

-Fumier de bovin (F),

-Terreau de la décharge de déchets solides urbains d'Andralanitra (t). Un produit du criblage des déchets prélevés dans les zones de stockage des déchets urbains les plus anciennes, ayant subi un compostage naturel et commercialisé comme fertilisants par des petits artisans.

- Compost Zinabio (c) : composé de déchets d'abattoir (93,5%), sciure de bois (2,6%), de déchets verts (1,29%) et de refus (2,59%). La température du mélange est suivie quotidiennement et permet de définir la maturité du compost. Le temps de compostage dure environ 21 jours. Le compost est régulièrement arrosé et retourné

-Maïs variété MEVA

Méthodes

Deux facteurs testés :

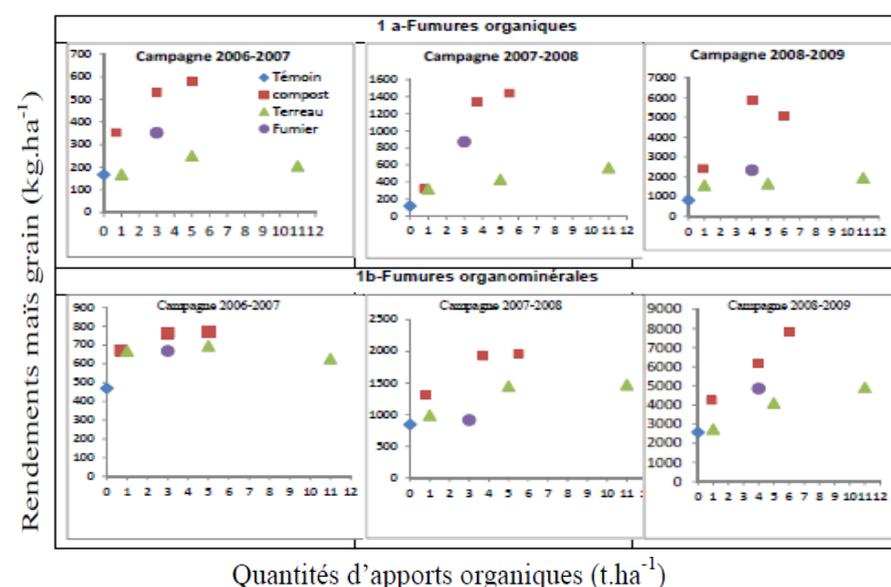
-apport d'engrais complet NPK (avec ou sans apport organique

-apport de matière organique à 8 modalités

le terreau (t) et le compost (c) à trois doses chacune comparées à un témoin avec apport de fumier (F) et un témoin sans aucun apport (T). L'apport de 3t.ha⁻¹ de (F) est pris comme référence. Les doses testées des deux apports organiques (t) et (c) sont établies selon les quantités équivalentes apportées en termes de carbone, d'azote ou phosphore contenus dans 3t.ha⁻¹ de fumier par hectare

Traitement	Masse sèche apportée (Kg.ha ⁻¹)	Quantité de C apportée (Kg.ha ⁻¹)	Quantité d'N apportée (Kg.ha ⁻¹)	Quantité de P apportée (Kg.ha ⁻¹)
T0	0	0	0	0
Fumier	3000	394	11,43	2,59
cC	3330	394	7,99	11,98
tC	10746	394	26,28	26,28
cN	5022	563	11,43	17,14
tN	5197	171	11,43	11,43
cP	0754	085	1,72	2,59
tP	1047	038	1,72	2,59

Résultats et discussion



- l'apport de NPK a un effet hautement significatif sur les rendements de maïs grain, **grâce aux éléments nutritifs disponibles pour la plante apportés par le NPK**,

- Les apports des 3 matières organiques (C, t, F) provoquent toujours une augmentation de rendements de maïs grains par rapport au témoin sans aucun apport.

L'augmentation de rendement a occasionné des exportations d'éléments minéraux plus importants que celles observées sur le sol témoin sans aucun apport organique

- Quelque soit la quantité d'apport, le compost donne plus de rendements en maïs grains que le terreau et le fumier.

Les rendements de maïs augmentent de façon linéaire avec la quantité de compost apportée. **Cet apport organique peut fournir plus d'éléments nutritifs par libération d'azote minéral aux périodes de besoins maximum d'azote de la plante**

-suivi par l'apport de fumier (**matière organique plus riche en éléments facilement dégradables**).

-Des activités microbiennes sont plus faibles dans le terreau d'Andralanitra et des sols sans aucun apport organique.

5.3. ANDRIAMANIRAKA H., Andriampenomanana S. V., Falinirina M. V., Rakotoson L. T., 2012. Fertilisation optimum pour une meilleure productivité d'une légumineuse avec des engrais biologiques phosphatés : Expérimentation réalisée avec le Petit pois « *Pisum sativum* ». Forum de la recherche. 10, 11, 12 juillet 2012 Antananarivo Madagascar.

Forum de la recherche. 10, 11, 12 juillet 2012 Antananarivo Madagascar

Fertilisation optimum pour une meilleure productivité d'une légumineuse avec des engrais biologiques phosphatés : Expérimentation réalisée avec le Petit pois « *Pisum sativum* »

Harilala ANDRIAMANIRAKA⁽¹⁾, Samoelina Vononantenaina ANDRIAMPENOMANANA⁽²⁾, Marie Virginie FALINIRINA⁽³⁾, Luçiano Tatiana RAKOTOSON⁽¹⁾

(1) : Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Agriculture, BP 175 Ankatso Antananarivo 101,

(2) : Société GUANOMAD Madagascar, BP 3438 Antananarivo 101,

(3) : Université de Fianarantsoa, Institut Supérieur de Technologie de la Région d'Aoron'i Mania (ISTRAM) Ambositra 306.

INTRODUCTION

Dans le souci de la préservation de l'environnement tout en produisant mieux, la fertilisation biologique est la solution incontournable dans le domaine de la culture annuelle comme la culture légumière. L'accès à ce type d'engrais n'est pas toujours facile et la connaissance de la dose qui correspond aux besoins de la plante n'est pas non plus évidente surtout pour les paysans. Cette méconnaissance rend difficile la gestion de la fertilisation sur le court et le long terme.

Le problème majeur est de savoir si l'apport d'engrais biologiques pourrait améliorer la production agricole des paysans ?

Notre recherche avait ainsi pour objectifs de mieux connaître les engrais et amendements utilisables en agriculture biologique, d'acquérir des références dans le domaine de la fertilisation phosphatée et enfin de proposer la dose optimale pour une meilleure productivité avec un engrais biologique.

MATERIELS ET METHODES

1- Présentation du dispositif expérimental

11- Le dispositif expérimental

L'essai au champ comporte 3 blocs correspondant aux 3 répétitions des traitements étudiés. L'essai a été réalisé sur un terrain d'environ 150m² dans lequel 8 traitements étaient effectués ; ils sont repartis au hasard dans chaque bloc. Le dispositif expérimental comporte donc 24 parcelles (8 parcelles x 3 blocs) de 6m² (2mx3m) chacune.

12- Descriptions de l'essai

Le facteur étudié est l'apport de fertilisant sous forme guano avec un apport d'engrais organique (compost). Les différents traitements ainsi que les quantités apportées sont :

Tableau 1 : Les différents traitements avec les quantités d'engrais apportées

Traitements	Caractéristiques	Guano (kg/ha)	Compost (t/ha)
T abs	Témoin absolu	0	0
T comp	Témoin à compost	0	5
GT200	Guanotsar à 200kg/ha + compost	200	5
GT400	Guanotsar à 400kg/ha + compost	400	5
GT600	Guanotsar à 600kg/ha + compost	600	5
GM400	Guanomad à 400kg/ha + compost	400	5
GM500	Guanomad à 500kg/ha + compost	500	5
GM600	Guanomad à 600kg/ha + compost	600	5

2- Les engrais utilisés et leurs caractéristiques

21- Le GUANOMAD

Le GUANOMAD appelé aussi Bat Guano de Madagascar est une substance issue de l'accumulation d'excréments de chauve-souris. C'est un engrais très équilibré, composé de N-P-K d'origine organique, éléments indispensables à la nutrition des plantes, d'un pourcentage élevé en matières organiques et d'autres éléments minéraux comme Calcium, Magnésium, Manganèses,...Il contient une flore microbienne vivante qui, incorporée dans le sol, agit sur les matières organiques de telle façon que les plantes puissent absorber les nutriments.

22- Le GUANOTSAR

Le GUANOTSAR est un subtil mélange de Bat Guano de très haute qualité et de Phosphate naturel. Obtenu à partir d'une formule enrichie et plus équilibrée, il surpasse les engrais organiques existants. Il possède une teneur plus élevée en matières organiques, en azote, en phosphore et en calcium. Sa flore microbienne vivante agit rapidement sur les matières organiques de sorte que les plantes puissent mieux absorber les nutriments.

23- Le compost :

Le compost utilisé provient du terreau d'Andralanitra, produit issu d'un criblage de déchets urbains âgés de plus de quarante ans. Après une analyse faite par le laboratoire d'analyse de sol du département Agriculture de l'ESSA, il contient 24.8% de matières organiques. L'apport de compost a été recommandé par la société Guanomad.

3- Analyse statistique avec XLSTAT 2008

L'effet des engrais sur le rendement a été traité statistiquement par le logiciel XLSTAT2008. Le test de Fischer Snedcor par une analyse des différences entre les groupes avec un intervalle de confiance à 95% a été utilisé. Le critère de classification étudié est le type d'engrais (type de guano à différentes doses). La corrélation des traitements avec le rendement a été mise en évidence.

RESULTATS

1- Réponse du petit pois aux doses croissantes d'engrais

L'analyse statistique montrée par le graphe ci-après indique que l'apport d'engrais donne plus de rendement par rapport au témoin sans engrais quel que soit le type d'intrant et la dose apportée. Le rendement varie de 0.30 t.ha⁻¹ pour le T abs à 1.72 t.ha⁻¹ pour GT200.

La courbe de réponse du petit pois évolue en fonction des doses. Le témoin absolu T abs donne de rendement significativement faible par rapport aux traitements avec fumure car il n'atteint même pas le 0.5t/ha alors que tous les autres ont de rendement supérieur ou égal à 1t/ha.

Le témoin compost donne à peu près de rendement identique aux traitements GT400 ; GT600 et GM400 c'est-à-dire qu'un apport de compost 5tha⁻¹ est équivalent à apporter 400kg/ha Guanotsar + 5 t/ha compost ; 600kg/ha Guanotsar + 5t/ha compost et 400kg/ha Guanomad + 5t/ha compost.

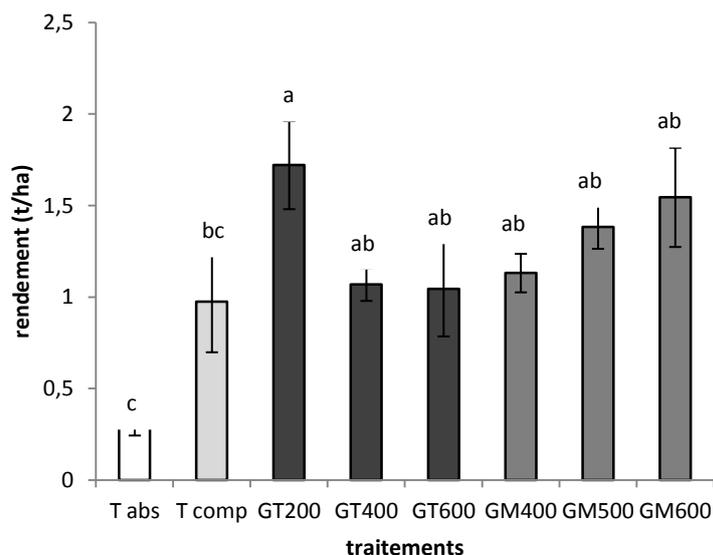


Figure 1 : Courbe de réponse du petit pois aux Guanotsar et Guanomad

Pour le Guanotsar, l'analyse statistique n'accuse pas de différence pertinente entre les trois doses testées mais la dose 200kg/ha affecte une augmentation du rendement de 0.66 t/ha par rapport aux doses 400kg/ha et 600kg/ha et plus on augmente la dose, moins le rendement diminue.

Concernant le Guanomad, il n'y a pas de différence significative entre les trois traitements et les rendements augmentent proportionnellement avec la dose.

GT200 et GM600 ne présentent aucune différence significative mais il y a une tendance à une hausse de rendement de 0.2 t/ha avec GT200.

La probabilité associée au test de Fischer est inférieure au seuil de signification 5% ce qui signifie qu'il y a de différence entre les rendements de chaque traitement.

2- Effet des engrais biologiques par rapport au témoin absolu

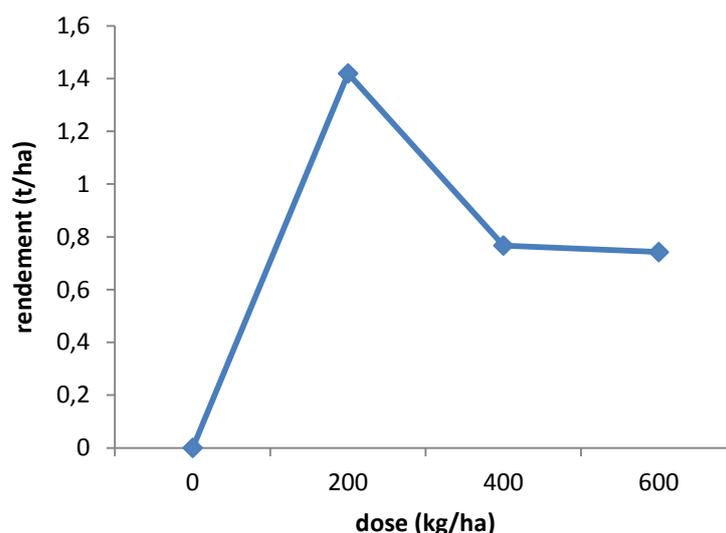


Figure 2 : Rendement du petit pois avec Guanotsar par rapport au témoin absolu

Les engrais augmentent le rendement de 3 à 5 fois plus par rapport au témoin absolu.

Le rendement de petit pois varie en fonction des doses de Guanotsar. Sur cette figure, l'écart de rendement entre T abs et GT200 est de 1.42 t/ha ; entre T abs et GT400 est de 0.77t/ha et entre T abs et GT600 est de 0.74t/ha. Par rapport au témoin absolu, le Guanotsar procure un rendement jusqu'à environ 5 fois plus.

DISCUSSIONS

Après traitements statistique, le rendement en grain de petit pois de tous les traitements présente une différence significative par rapport au témoin. Ces résultats montrent l'importance de l'efficacité de l'apport de fertilisant sur le rendement.

Le Guanomad n'accuse pas de différence significative qu'à une dose élevée (600kg/ha) par rapport au témoin sans apport d'engrais. Pourtant, les rendements augmentent significativement avec les doses croissantes.

Ce phénomène s'explique par la teneur en matière organique élevée du Guanomad. Le Guano, naturellement composé de phosphore organique est l'objet d'une lente minéralisation qui rend le phosphore progressivement disponible pour les plantes. C'est pourquoi l'effet n'est pas encore distingué au niveau des doses faibles (Fanjaniaina, 2009). Or, le phosphore constitue le facteur limitant de la production agricole surtout pour la production de graines comme le petit pois. L'effet des fertilisants sur la mobilité du phosphore est principalement lié à l'ajout de fertilisants organiques, en effet, la matière organique influe positivement l'assimilation du phosphore par la plante (Hue, 1991 ; Falinirina M.V., 2010). C'est pourquoi il est préférable, pour notre expérimentation, d'apporter du compost pour augmenter le taux de la matière organique.

Pour le Guanotsar, la plus faible des doses donne un rendement élevé par rapport au témoin absolu. Ce Guanotsar contient plus de phosphore que le Guanomad, même à dose faible, il procure beaucoup de rendement. Le rendement maximum est observé avec la dose plus faible, et il diminue progressivement avec la dose croissante. Ce résultat peut être expliqué par le phénomène de processus microbien qui tient un rôle important dans la décomposition des matières organiques contenues dans le compost et dans les engrais. En effet, le processus microbien peut être pris en compte parce que quand un engrais phosphaté hydrosoluble est appliqué au sol, il réagit rapidement avec les composantes du sol (FAO, 2004). Or, la disponibilité du phosphore est sujette à plusieurs processus physicochimiques comme la précipitation, l'adsorption et la réorganisation microbienne (Parent et al., 2002) ; en plus les amendements organiques procurent une source de carbone qui stimule l'activité microbienne.

En outre, l'apport de matière organique dans le sol augmente la contribution du P organique à la dynamique du phosphore mais les différentes modalités influençant la décomposition de ces matières organiques apportées sont cependant liées à l'activité des microorganismes. Il y a donc interaction entre les microorganismes et la mobilité du phosphore (Grant C. et al., 2005). Le critère biologique représentatif des processus microbiens peut être décrit par le rapport des formes organiques C/P, de façon analogue au rapport C/N (Parent et Khiari, 2003). Jusqu'à un rapport C/P critique, la biomasse microbienne immobilise le P, au-delà de cette valeur critique, le P peut être hydrolysé ou non selon le niveau d'activités enzymatiques (phosphatases produites par les microbes et les racines). Donc, plus on augmente le taux de phosphate, plus la valeur C/P atteint un niveau critique, c'est pourquoi la dose significativement forte diminue le rendement car l'immobilisation microbienne de P de l'engrais est important que l'effet de l'ajout de MO sur la solubilité du P de l'engrais dans le sol acide réputé fixateur de P (Parent et al., 2003).

CONCLUSION

Le but de cette recherche est d'augmenter la production agricole ; d'étudier l'effet de deux engrais biologiques sur le rendement du petit pois.

Aux termes de nos essais, on a pu révéler que parmi les deux engrais biologiques apportés, le Guanotsar à la dose 200kg/ha donne le meilleur rendement. Toutefois, le Guanomad augmente le rendement et surtout à dose élevée (600kg/ha). On en déduit alors que notre hypothèse : « les engrais augmentent le rendement surtout le Guanotsar », est partiellement confirmée.

Pour conclure, le fait d'opter pour le secteur maraîcher dans cette région d'Anevoka est intéressant comme projet. L'apport d'engrais permet l'amélioration du rendement. Pourtant, il n'a pas encore été possible de déterminer avec précision la dose optimale d'apport correspondant à un maximum de rendement parce que les rendements que nous avons obtenus n'atteignent même pas le rendement normal que l'on doit avoir avec le petit pois, à cause du taux de germination qui n'est pas très fort et de l'attaque de la maladie. Aussi, la grille de fertilisation efficace ne peut pas être avancée par notre expérimentation. Toutefois, on peut affirmer que ces deux engrais biologiques améliorent le rendement et l'efficacité de chaque type d'engrais dépend de plusieurs facteurs comme l'espèce cultivée (légumineuse, graminée), le type de sol, les conditions climatiques.

BIBLIOGRAPHIE

Falinirina M.V., 2010. « Valorisation agricole des apports organiques contenus dans les déchets urbains : qualité des matières organiques et service écosystémique, thèse de doctorat », 174 pages.

Fanjaniaina M. L., 2009. « Effet du Guano et du triple superphosphate sur le rendement du riz pluvial et sur la phytodisponibilité du phosphore du sol » ; mémoire de fin d'étude d'ingénieur, ESSA ; département Agriculture ; 66 pages.

FAO, 2004. « Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable », bulletin FAO Engrais et nutrition végétale, 13 pages.

Grant C., Bittman S., Montreal M., Plenchette C., Morel C., 2005. "Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development"- Can. J. Plant Sci. **85**: 3-14- 12pages.

Hue N.V, 1991. "Effects of organic acids/anions on sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies". Soil Science, Vol 152, 6, pp.463-471.

Parent, L.E. et Khiari L., 2003. «Nitrogen and phosphorus indicators of organic soil quality" Organic soils and peat materials for sustainable agriculture.

Parent L.E., Pellerin A., Khiari L., 2002. « Le flux et la dynamique du phosphore dans les sols agricoles québécois. Colloque sur le phosphore, une gestion éclairée ; nov. 2002 ; 27 pages.