



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

**ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES**

-----  
**Mention : Agriculture Tropicale et Développement Durable**

**Parcours : Bio-fonctionnement des Sols et Environnement**

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme de Master II

**MISE AU POINT DES PRATIQUES INNOVANTES  
DE RESTAURATION DE LA FERTILITE DES SOLS  
PAR DES ASSEMBLAGES DE MATIERES  
ORGANO-MINERALES**

Présenté par : RAHAJAHARILAZA **Koloïna**

Soutenu le **24 juin 2019** devant le Jury composé de :

- Président :** Docteur Landiarimisa RAMANANKAJA  
**Examineur :** Docteur Norosoa Christine RAZAFINDRAMANANA  
**Maître de stage :** Docteur Jean TRAP  
**Encadrant :** Docteur Hery Manantsoa RAZAFIMAHATRATRA





UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

-----  
**Mention : Agriculture Tropicale et Développement Durable**

**Parcours : Bio-fonctionnement des Sols et Environnement**

Mémoire de Fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme de Master II

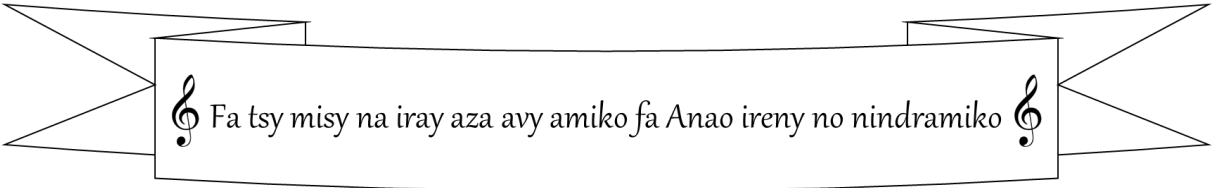
**MISE AU POINT DES PRATIQUES INNOVANTES  
DE RESTAURATION DE LA FERTILITE DES SOLS  
PAR DES ASSEMBLAGES DE MATIERES  
ORGANO-MINERALES**

Présenté par : RAHAJAHARILAZA Koloïna

Soutenu le **24 juin 2019** devant le Jury composé de :

- Président :** Docteur Landiarimisa RAMANANKAJA  
**Examineur :** Docteur Norosoa Christine RAZAFINDRAMANANA  
**Maître de stage :** Docteur Jean TRAP  
**Encadrant :** Docteur Hery Manantsoa RAZAFIMAHATRATRA





Fa tsy misy na iray aza avy amiko fa Anao ireny no nindramiko

## REMERCIEMENTS

Au terme de ces deux années d'études au niveau de l'ESSA et de l'accomplissement de ce mémoire, nous rendons grâce au Seigneur pour sa bonté et sa bénédiction, nous Lui serions éternellement reconnaissants. Nous adressons aussi nos sincères remerciements aux personnes suivantes :

- Madame **Landiarimisa RAMANANKAJA**, PhD in Agriculture, Responsable du Parcours Agriculture Tropicale, Enseignante Chercheur à l'ESSA d'avoir acceptée de présider ce mémoire malgré ces nombreuses responsabilités.
- Madame **Norosoa Christine RAZAFINDRAMANANA** Docteur en Sciences Agronomiques, Enseignante Chercheur à l'ESSA d'avoir bien voulu siégée parmi les membres du jury en tant qu'examineur de ce mémoire.
- Monsieur **Jean TRAP**, Docteur en Ecologie Fonctionnelle, Chargé de recherche à l'IRD au sein de l'UMR Eco&Sols en accueil au Laboratoire des RadioIsotopes d'avoir été, non seulement un encadrant professionnel mais, un parrain durant notre parcours ; pour ces soutiens et précieux conseils.
- Monsieur **Hery Manantsoa RAZAFIMAHATRATRA**, Docteur en Sciences Agronomiques, Enseignant chercheur à l'ESSA et Responsable de la Mention Agriculture Tropicale et Développement Durable, d'avoir été un encadrant compréhensif et pour ces appuis constructifs durant l'élaboration du manuscrit.
- Madame **Tantely RAZAFIMBELO**, Professeur en Agronomie et Pédologie, Enseignant Chercheur et Directeur du Laboratoire des RadioIsotopes (LRI), qui nous a permis d'effectuer notre stage au sein du Laboratoire
- Tout le corps Enseignant de la Mention Agriculture Tropicale et Développement Durable, qui nous ont formés sans égard et nous ont octroyé le nécessaire pour affronter l'avenir.
- Toute l'équipe du LRI et de l'IRD pour leurs chaleureux accueils durant la réalisation des travaux et spécialement Madame **Marie Paule RAZAFIMANANTSOA**, Monsieur **Modeste RAKOTONDRAMANANA** sans oublier les techniciens qui nous ont beaucoup aidés ainsi que ceux de l'UMR Eco&Sols pour les analyses CHN.
- Nous remercions spécialement Madame **Manoa RAMINOARISON**, doctorante en Sciences Agronomiques à l'A2E et Monsieur **Damase RAZAFIMAHAFALY** de nous avoir offert leurs aides tout le long de notre stage.
- Nos amis stagiaires au sein du LRI, et étudiants de la Mention AT2D pour leurs présences et encouragements.

A ma Famille qui est toujours là pour me soutenir surtout à mes chers **Parents** et à ma **Petite Sœur** ainsi que tous ceux qui me tiennent à cœur.

A tous ceux qui nous ont concédés une quelconque aide mais qui ne sont pas cités.

Veillez trouver ici nos plus profondes reconnaissances !

**Koloina**

## FINTINA

Karazam-bary an-tanety maro no nampidirina teto Madagasikara tamin'ny taona sivifolo mba hanampiana ny voka bary miakatra. Ireo karazam-bary ireo dia nambolena teny amin'nytanety, eny antehezan-tendrombohitra izay voarafitra tany voalaza fa feralitika izay tsy dia mamokatra. Ireo karazan-tany ireo dia sady manana tsiro asidra no tsy ampy singa maro toy ny : faosifaoro, azota ary singa maro mifanakalo (toy ny kalsioma sy manesioma). Mba hiatrehana izany dia ilaina ny fitondrana zezika organika sy mineraly (MAFORS) eny an tanimboly. Hita anefa fa maro ireo singa tsy ampy ao amin'ny tsiro-tany ka mila mampifangaro zezika maro mba hahazoana fifamenoana sy fifanampiana eo amin'izy ireo. Ny tanjona amin'izany dia (i) ny hanampiana tosika ny fitsirin'ny zava-maniry sy (ii) ny hampitombo azy aingana ary (iii) hitandrovana ny ekolojian'ny tany (toy ny fitrandrahana karbaona sy ny fitehirizana ny sakafo). Zezika miisa 17 noho izany no nosafidiana ary nafangaro tsitelotelo tao anaty tavim-panadramana PVC nofenoina tany maina 5 Kilao. Novolena teo ny masombolin'ny karazam-bary *Chomrhong Dhan* nandritra ny 60 andro. Niisa 150 ireo tavim-panadramana napetraka mba hijerena ny vokatra ny fampifangaroana eo amin'ny fitombon'ny vary sy ny tany nambolena azy. Rehefa izany dia nosokajiana tao anaty vondrona (GF) ireo zezika (MAFORS) tamin'ny alalan'ny modely fampivondrononana. Ireo zezika ao anatin'ny vondrona iray dia nanome vokatra mitovy tamin'ny sehatra nohadihadiana dia ny : (i) fitombon'ny vary, (ii) ny singa namelona azy ary (iii) ny fahasalaman'ny tany. Rehefa nojerena ny fitombon'ny vary dia voazara ho vondrona 4 ireo zezika, ary vondrona 5 kosa no hita raha ny singa mandrafitra azy no jerena. Voasokajy manokana tamin'izany ny zezika vita avy amin'ny vovoka tandrok'omby. Raha ny ekolojian'ny tany kosa no jerena dia voazara ho vondrona 4 ireo zezika ary ireo zezim-pahitra sy ny Taroka no tena nahomby tamin'izany. Ireo vokatra azo avy amin'ity fikarohana ity dia afaka ampiasaina ho torolalana amin'ny fanaovan-zezika mifangaro. Afaka mampiasa azy noho izany ireo izay tia hanao fandramana mihiboka na eny an tsaha

**Teny manan-danja** : fifamenoan'ny asan'ireo zezika, *Chomrhong Dhan*, fitomboan'ny zava-maniry, sakafon'ny zava maniry, ekolojian'ny tany, modely mifameno

## RESUME

Des variétés de riz pluvial tolérantes à l'altitude ont été introduites à Madagascar dans les années 1990 pour palier à la faible production de riz. Ces variétés ont été plantées sur les *Tanety* dominés par des sols ferrallitiques très peu fertiles. Ce type de sol, en plus de son acidité, est carencé en plusieurs éléments : phosphore, azote et les bases échangeables (calcium et magnésium). Pour faire face à cette situation, la fertilisation par des matières fertilisantes organo-minérales (MAFORS) constitue une alternative. Les carences dans les sols ferrallitiques sont multiples ainsi des assemblages sont nécessaires pour favoriser l'interaction et la complémentarité des MAFORS. L'objectif est d'identifier des assemblages de MAFORS qui vont favoriser (i) la croissance, (ii) la nutrition de la plante cultivée ainsi que (iii) les fonctions écologiques du sol, i.e. stockage en carbone et nutriment. Un panel de dix-sept MAFORS disponibles sur les Hautes-Terres malgaches ont été sélectionnées et mélangées par trois dans des pots en PVC contenant 5 kg de sol sec. Une semence de riz pluvial de la variété *Chomrhong Dhan* a été plantée dans chaque pot pendant 60 jours. Au total, 150 pots ont été installés afin de voir les effets de chaque assemblage sur les fonctions de la plante et du sol. Les MAFORS ont ensuite été classées dans des groupes fonctionnels (GF) à l'aide d'un modèle combinatoire. Les MAFORS réunies dans un même GF ont les mêmes effets sur les fonctions étudiées : (i) croissance des plantes, (ii) nutrition des plantes et (iii) écologie du sol. La fonction de croissance est expliquée par 4 GFs alors que celle de la nutrition par 5 GFs. La corne de zébu est une matière clef qui forme un groupe à elle seule pour les deux fonctions citées. La fonction écologique du sol est expliquée par 4 GFs dont un groupe clef formé par des fumiers, la poudrette de parc et le Taroka. Des orientations sur la stratégie de fertilisation du sol par des assemblages de fertilisants peuvent être conclues à l'issue des résultats de cette étude. Elle servira de guide sur des expérimentations du même contexte et sur des essais au champs.

**Mots-clés** : complémentarité des MAFORS, *Chomrhong Dhan*, croissance des plantes, nutrition des plantes, écologie du sol, modèle combinatoire

## ABSTRACT

Altitude-tolerant rainfed rice varieties were introduced in Madagascar in the 1990s to compensate for low rice production. These varieties have been planted on the *Tanety* of hillsides dominated by ferrallitic soils with very low fertility. This type of soil, in addition to its acidity, is deficient in several elements: phosphorus, nitrogen and exchangeable bases (calcium and magnesium). To cope with this situation, fertilization with organo-mineral fertilizers (MAFORS) is necessary. Deficiencies in ferrallitic soils are multiple, so assemblies are necessary to promote interaction and complementarity of MAFORS. The objective was therefore to identify MAFORS assemblages that will promote (i) growth, (ii) crop nutrition and (iii) soil ecological functions, i.e. carbon and nutrient storage. A panel of seventeen MAFORS available in the Malagasy Highlands were selected and mixed by three in PVC pots containing 5 kg of dry soil. A seed of rainfed rice of the *Chomrhong Dhan* variety was planted in each pot for 60 days. A total of 150 pots were installed to see the effects of each assembly on plant and soil functions. MAFORS were then classified into functional groups (GFs) using a combinatorial model. MAFORS combined in the same GF have the same effects on the functions studied: (i) plant growth, (ii) plant nutrition or (iii) soil ecology. The growth function is explained by 4 GFs while the nutrition function is explained by 5GFs. The zebu horn is a key material that forms a group of its own for the two functions mentioned above. The ecological function of the soil is explained by 4GFs including a key group formed by manure, park powder and Taroka. Guidance on the strategy on soil fertilization strategy using fertilizer assemblages can be concluded following the results of this study. It will serve as a guide for experiments in the same context and field trials.

**Key words:** complementarity of MAFORS, *Chomrhong Dhan*, plant growing, plant nutrition, soil ecology, combinatorial model

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>I. MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>4</b>
1.1. Echantillonnage des sols .....	4
1.2. Matériels utilisés .....	5
1.3. Dispositif expérimental et mis en pot.....	7
1.4. Variables mesurées.....	9
1.5. Méthodes statistiques .....	11
<b>II. RESULTATS .....</b>	<b>15</b>
2.1. Modélisation des assemblages de MAFORS .....	15
2.2. Indices multifonctionnels .....	20
2.3. Classification finale des MAFORS et pratique paysanne .....	23
<b>III. DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>26</b>
3.1 Assemblages de MAFORS pour une meilleure croissance de la plante .....	26
3.2 Assemblages de MAFORS améliorant la nutrition des plantes .....	27
3.3 Assemblages de MAFORS maximisant les fonctions écologiques du sol.....	28
3.4 Motifs d'assemblages de MAFORS pour une innovation agronomique .....	30
3.5 Evaluation de l'étude.....	31
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>34</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>36</b>
<b>ANNEXE .....</b>	<b>I</b>
Annexe 1 : Cadre de l'étude .....	I
Annexe 2 : Caractéristiques et classification à priori des MAFORS .....	II
Annexe 3 : Modèles combinatoires de chaque fonction étudiée .....	V



## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1 : Schéma conceptuel sur les approches typologiques .....	2
Figure 2 : Carte de localisation du site de prélèvement du sol.....	4
Figure 3 : Dispositif expérimental.....	7
Figure 4 : Classification des MAFORS selon la nutrition des plantes.....	17
Figure 5 : Groupes fonctionnels de la croissance des plantes .....	20
Figure 6: Groupes fonctionnels impactant la nutrition des plantes .....	21
Figure 7 : Groupes fonctionnels impactant les fonctions écologiques du sol .....	22
Figure 8 : Classification finale des MAFORS .....	23
Figure 9 : Situation de la pratique paysanne par % à la croissance et nutrition des plantes ....	24
Figure 10 : Situation de la pratique paysanne par rapport à l'écologie du sol et de l'IMT .....	25
Figure 11 : Cercle de corrélation caractéristiques des matières .....	III
Figure 12 : Graphe des individus .....	IV

## **LISTE DES CLICHES**

Cliché 1 : Mode de prélèvement du sol .....	5
Cliché 2 : Pots disposés sur des tables .....	8
Cliché 3 : Semis des grains de riz .....	8
Cliché 4 : (a) : mesure du PRI, (b) : mesure NDVI, (c) : mesure SPAD .....	10

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classification des matières fertilisantes et dose d'apport.....	6
Tableau 2 : Modèle combinatoire de la croissance des plantes.....	15
Tableau 3 : Modèle combinatoire du SPAD .....	16
Tableau 4 : modèle combinatoire des caractéristiques du sol .....	19
Tableau 5 : Exemples des meilleurs assemblages qui ont répondu à tous les critères.....	23
Tableau 6 : Effets des assemblages sur les fonctions écologiques du sol .....	29
Tableau 7 : Caractéristiques des MAFORS .....	II
Tableau 8 : Modèles combinatoires de la croissance des plantes.....	V
Tableau 9 : Modèles combinatoires de la nutrition des biomasses aériennes .....	VI
Tableau 10 : Modèles combinatoires de la nutrition des biomasses racinaires.....	VII

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>ACP :</b>	Analyse en Composante Principale
<b>ANOVA :</b>	Analyse de la Variance
<b>BA :</b>	Biomasse aérienne
<b>BD FTM :</b>	Base de Données du Foiben-Tsaritanin'i Madagasikara
<b>BR :</b>	Biomasse racinaire
<b>BT :</b>	Biomasse totale
<b>CB :</b>	Cendre de balle de riz
<b>CE :</b>	Cendre d'Eucalyptus
<b>CZ :</b>	Corne de Zébu
<b>Cirad :</b>	Coopération internationale de recherche agronomique pour le développement
<b>Dol :</b>	Dolomie
<b>ESSA :</b>	Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
<b>FAO :</b>	Organisation Mondial pour l'alimentation et l'Agriculture
<b>FarC:</b>	Farine de crabe
<b>Fie :</b>	Fiente de volaille

<b>FOFIFA :</b>	Foibem-pirenena momba ny Fikarohana ampiharina amin'ny Fampanandrosoana ny eny Ambanivohitra
<b>FumA :</b>	Fumier Amélioré
<b>FumS:</b>	Fumier Solofo (traditionnel)
<b>Gua:</b>	Guanomad
<b>HYP :</b>	Hyperphosphate
<b>IM(T) :</b>	Indice Multifonctionnelle (Totale)
<b>INSTAT :</b>	Institut National de Statistique
<b>IRD :</b>	Institut de Recherche pour le Développement
<b>LRI :</b>	Laboratoire des RadioIsotopes
<b>MAFORS :</b>	Matières Fertilisantes Organo-Minérales
<b>MC :</b>	Madacompost
<b>NDVI :</b>	Normalized Difference Vegetation Index
<b>N-P-K :</b>	Azote-Phosphore-Potassium
<b>PAM :</b>	Programme Alimentaire Mondial
<b>pH :</b>	Potentiel d'Hydrogène
<b>PP :</b>	Poudrette de Parc
<b>PRI :</b>	Photochemical Reflectance Index
<b>PVC :</b>	PolyVinylChloride (polychlorure de vinyle)
<b>R :</b>	Root (racinaire)
<b>Rapport C/N :</b>	Rapport Carbone/Azote
<b>SECURE :</b>	Soil ECological fUnction REstoration
<b>Seq :</b>	Séquentielle
<b>Sh :</b>	Shoot (aérienne)
<b>SPAD :</b>	Single Photon Avalanche Diode
<b>SPIR :</b>	Spectrométrie Proche Infra Rouge
<b>Tar :</b>	Taroka
<b>TATA :</b>	Vermicompost TATA
<b>Ter :</b>	Terreau d'Andralanitra
<b>VC4 :</b>	Vermicompost d'Antsirabe

## GLOSSAIRE

- Biodisponibilité** : Propriété d'une espèce chimique ou d'un élément présent dans le sol d'être plus ou moins facilement absorbé par les organismes vivants le plus souvent via la solution du sol. Un potentiel résultant de la nature des espèces chimiques présentes dans la solution du sol laquelle dépend largement des propriétés physico-chimiques et microbiologiques du milieu du sol (Aquaportail, 2007).
- Fertilité du sol** : Notion complexe qui dépend de plusieurs facteurs tels que la culture en place, le climat, le régime et le type de fertilisants qui y sont appliqués et les capacités techniques du producteur ainsi que les propriétés du sol lui-même (Lacharme, 2001)
- Groupe fonctionnel** : Classification dans un même groupe des MAFORS ayant les mêmes effets sur une fonction donnée
- Minéralisation** : Décomposition des substances organiques du sol et des résidus de culture sous forme de sel minéraux assimilables par les plantes par des activités microbiennes enzymatique du sol
- Motif d'assemblage** : Assemblages de deux ou trois MAFORS appartenant à différents groupes fonctionnels
- Prototype** : Premier exemplaire construit d'un ensemble mécanique qui est destiné à en expérimenter en service les qualités en vue de la construction en série. (Larousse.fr)
- Tanety** : Terroir aménagé en banquette sur les pentes des collines pour les pratiques de cultures pluviales. Des riz sur les hautes pentes ; des maïs, pomme de terre, manioc, haricot, soja sur les basses pentes (Chantal Blanc-Pamard, 2000)

# **INTRODUCTION**

## INTRODUCTION

L'économie de Madagascar est majoritairement basée sur l'agriculture. Généralement réparties dans le milieu rural, 68% de la population malagasy sont des agriculteurs (INSTAT, 2011). Le système de culture de ce monde rural a évolué avec le temps. Initialement de l'abatis sur brûlis en amont du paysage et de la riziculture de bas fond, la production agricole ne permet plus de subvenir aux besoins alimentaires de chaque foyer qui ne cessent d'augmenter. Or, les collines restaient inexploitées face à la saturation des bas-fonds mais le développement de nouvelles variétés de riz tolérantes à l'altitude a permis aux agriculteurs d'exploiter les *Tanety* des collines. A la riziculture irriguée s'ajoutait ainsi la riziculture semi-irriguée puis la riziculture pluviale sur les versants des collines (Raboin *et al.*, 2013).

Cette issue n'est pas pour autant facile à appliquer. La pédologie de la Grande Île est dominée à 46,5% par des sols ferrallitiques. Ce type de sol domine les *Tanety* des Hautes Terres et la côte Est de l'île (Segalen, 1995). Les sols ferrallitiques ont des propriétés physico-chimiques peu favorables à la culture. Ils ont un pH acide autour de 5,5 et ils sont formés sous des conditions tropicales d'où l'accélération poussée de leurs altérations qui ont données des proportions en argiles (kaolinite) très élevées, une capacité d'échange cationique très faible (inférieur à  $16\text{cmol}^+/\text{kg}$ ) et une richesse en oxyde de fer et d'aluminium (Sanchez *et al.*, 1997 ; Rabeharisoa, 2004). L'acidité des sols réduit la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes ainsi que la capacité d'échange cationique des sols. Ainsi, la quantité de cations que le sol peut retenir sur son complexe adsorbant est vraiment restreinte ; ce qui induit différentes carences d'éléments assimilables par les plantes. Par conséquent, la productivité agricole de ces zones reste très faible impactant la sécurité alimentaire (FAO, PAM, 2013).

Il apparait donc évident que pour combler les multiples carences du sol, il est nécessaire de restaurer la fertilité des sols par des apports de Matière Fertilisante Organo-Minérales ou **MAFORS** (Ballot *et al.*, 2016). Or, l'apport d'une seule matière ne serait pas suffisant pour résoudre toutes les carences des sols ferrallitiques. L'ajout de plusieurs MAFORS semblent alors inévitable. Par exemple, un chaulage avec de la dolomie est nécessaire pour augmenter le pH du sol et d'autres MAFORS devraient être apportées conjointement pour améliorer la disponibilité d'éléments nutritifs dans la solution du sol pour ensuite être disponibles pour la plante cultivée (Fofana *et al.*, 2008). Aussi, la fertilisation du sol ne se limite pas à l'accroissement de la nutrition de la plante mais également à valoriser les processus naturels des sols assurés par les organismes édaphiques. Ces organismes améliorent la structure du sol, dégradent les matières organiques, et mettent à la disposition des plantes les nutriments dont elles ont besoin (Blanchart et Jouquet, 2012).

Des travaux sur les MAFORS disponibles à Madagascar ont déjà été réalisés à l'exemple de la thèse de Rabetokontany en 2013. Ces travaux ont montré que chaque MAFOR a ses propres propriétés et sa propre qualité. Une pratique qui consisterait à assembler des matières relativement différentes et complémentaires d'un point de vue de leur composition élémentaire, de manière à combler l'ensemble des carences serait intéressante. Il existe deux méthodes (ou approches) pour constituer un assemblage : (i) l'approche par typologie *a priori* et l'approche d'assemblage *a posteriori*.

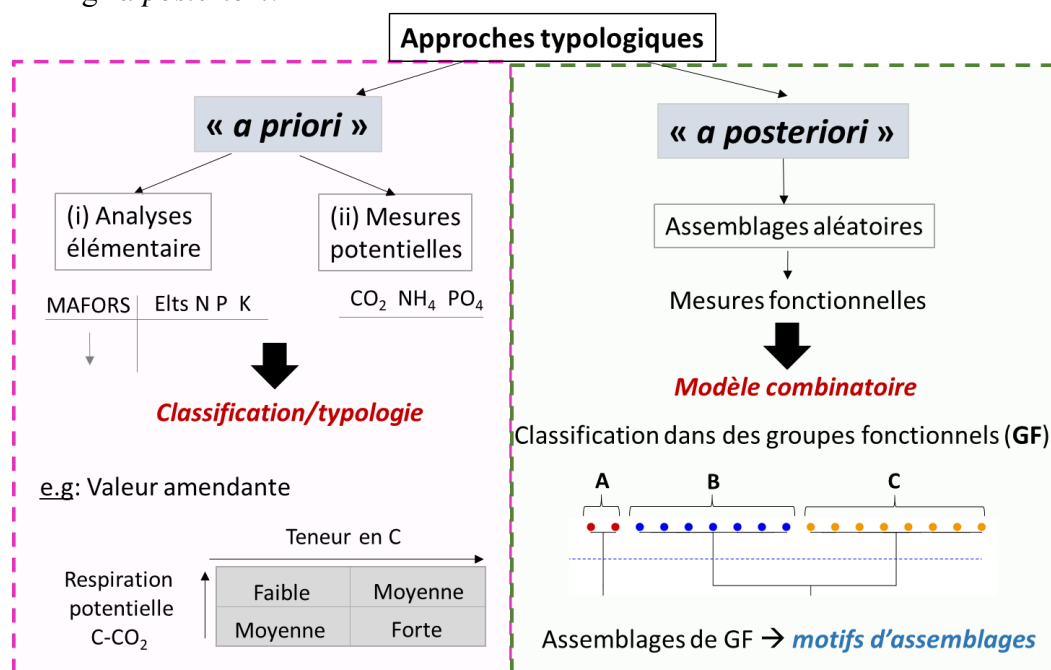


Figure 1 : Schéma conceptuel sur les approches typologiques (Source : Auteur)

La première méthode « *a priori* » est une typologie ou classement basée sur les caractéristiques (ou traits) des MAFORS après avoir observées leurs propriétés analytiques et potentielles (Rabetokontany, 2013). Les analyses élémentaires consistent à mesurer les teneurs en azote, phosphore et divers éléments dans les matières. Les analyses potentielles consistent à mesurer la respiration microbienne contenue dans les matières ainsi que la vitesse de minéralisation des éléments au contact du sol. Cette typologie permet d'estimer les cinétiques et complémentarités des MAFORS mais n'aboutit pas avec certitude aux comportements des plantes soumises aux assemblages. La démarche se base tout simplement sur des caractères pré-mesurés. La deuxième méthode « *a posteriori* » consiste à faire des mélanges expérimentaux afin de regarder les différentes mesures fonctionnelles (réponses) au niveau de la plante en fonction des assemblages. En fonction du mélange effectué, ces réponses vont permettre une typologie qui ne se base pas sur les propriétés inhérentes. Cela est possible à l'aide d'un modèle combinatoire qui optimise l'explication de la fonction observée en répartissant les MAFORS dans des groupes fonctionnels (GF).

L'approche « *a posteriori* » a été adoptée pour cette étude. Dix-sept MAFORS paysannes et commerciales disponibles sur les Hautes-Terres malgaches ont été sélectionnées pour faire des assemblages. Dans le milieu rural, l'application des apports en mélange est présente mais peu fréquente. La plupart des agriculteurs fertilisent leur sol avec une ou deux matières qui sont soit des fertilisants minéraux ou organiques en fonction de leurs disponibilités. Ainsi, ***comment les agriculteurs peuvent-ils choisir les assemblages de MAFORS adéquats en tenant compte des ressources disponibles ?*** L'objectif de cette étude est donc d'identifier les assemblages de MAFORS qui maximisent les fonctions écologiques du sol sur la croissance et le développement de la plante. D'une part, ces assemblages doivent améliorer la nutrition minérale de la plante afin d'avoir une production élevée et d'autre part, ils doivent assurer la pérennité de la fertilité du sol. Les objectifs spécifiques sont donc :

- (i) D'avoir des classes de MAFORS différentes expliquant les fonctions citées ci-dessus
- (ii) De mettre en relation les effets de complémentarités des matières classées dans différents groupes et
- (iii) De mettre en évidence des aspects appliqués des résultats obtenus

Par rapport à ces objectifs, les hypothèses mises en évidence au cours de cette étude sont :

**Hypothèse 1 :** Les MAFORS peuvent être classées dans différents groupes fonctionnels et les assemblages des GF expliqueront de manière satisfaisante ( $R^2 > 0.7$ ) les fonctions mesurées

**Hypothèse 2 :** Les classifications dans des groupes fonctionnels sont liées à des effets de composition, selon les fonctions

**Hypothèse 3 :** Les motifs d'assemblages et les groupes fonctionnels de MAFORS peuvent constituer un support théorique pour favoriser une innovation agronomique.

Ces hypothèses ont été vérifiées par des essais sur différentes combinaisons de MAFORS réalisées sous serre en conditions contrôlées. Le présent document va détailler dans ses différentes parties la méthodologie adoptée ainsi que les résultats obtenus. Une discussion et des perspectives seront avancées par rapport à ces résultats. Une conclusion générale achèvera le rapport.



**MATERIELS ET  
METHODES**

# I. MATERIELS ET METHODES

## 1.1. Echantillonnage des sols

### 1.1.1. Site de prélèvement

Le sol d'Imerintsiasosika a été choisi comme site de prélèvement du sol. Ce choix se base sur l'ensemble des travaux réalisés dans le cadre du projet SECURE qui finance cette étude. Ce sol, très carencé en éléments nutritifs, a été choisi comme référence en relation avec les expérimentations déjà effectuées. Le site se trouve dans la région Itasy, District d'Arivonimamo, Commune rurale d'Imerintsiasosika, Fokontany Alatsinainy Loharano dans le village de Miadampionina. La carte ci-dessous nous indique la localisation du site (Figure 2).

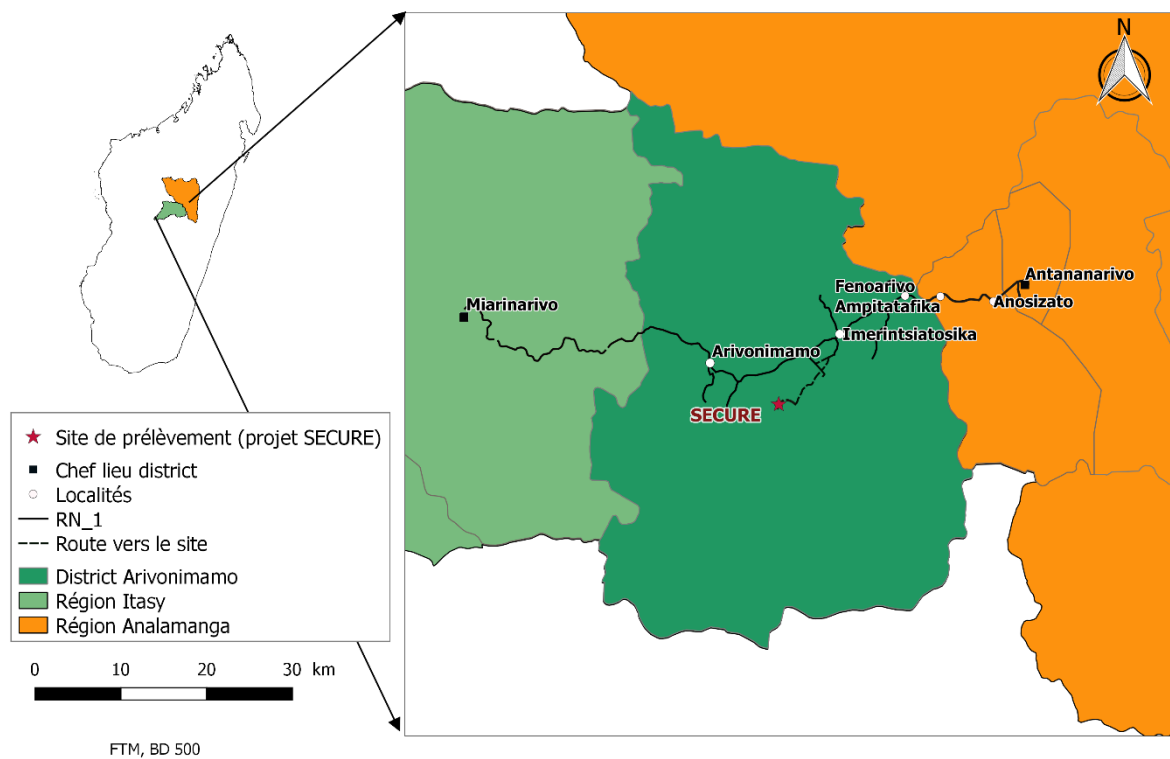


Figure 2 : Carte de localisation du site de prélèvement du sol. (FTM BD\_500 adaptés par l'auteur)

Le prélèvement a été fait sur un horizon de 0-20 cm à l'aide d'une *angady* en début du mois d'octobre 2018, avant la saison de pluie, sur une zone d'environ 16 m<sup>2</sup> (Cliché 1). Le sol relativement sec (avec une humidité inférieure à 7%) a été stocké au laboratoire à l'obscurité et au sec.

### 1.1.2. Caractéristiques du sol

Le site de prélèvement est caractérisé par un sol de défriche non cultivé pendant plus de 25 ans (Cliché 1). Les analyses physico-chimiques issus des études antérieures ont montré des carences en N et P (N total = 1,6 g kg<sup>-1</sup> et P total = 1,31 g kg<sup>-1</sup>) avec un pH relativement acide (pH eau = 4,7). Les teneurs en carbone sont également faibles (C total = 29,2 g kg<sup>-1</sup>). Les analyses granulométriques ont montré une forte composition en argiles + limons fins puisque ce sont des sols cuirassés, riche en gibbsite. Les teneurs en oxyde de fer et d'aluminium sont aussi très élevées (31,4% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et 28,2% d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) alors que celles de la silice sont faibles (10% de SiO<sub>2</sub>). Des expérimentations soustractives sur ce sol ont montré des carences dans les biomasses végétales suivant l'ordre P>Ca>Mg>N. Les Clichés suivants illustrent le site de prélèvement et le mode de prélèvement du sol



Cliché 1 : Mode de prélèvement du sol (Auteur, 2018)

## 1.2. Matériels utilisés

### 1.2.1. MAFORS sélectionnées

Selon les précédents résultats du projet SECURE, les 17 MAFORS sélectionnées sont :

- **Des MAFORS paysannes** telles que : les fumiers traditionnels et améliorés, les fientes de volailles, le vermicompost, les poudrettes de parc, les cendres d'*Eucalyptus* et les cendres de balles de riz.
- **Des MAFORS commerciales** : le Madacompost (Komposteco) et Madacompost (Korneco) ou corne de zébu, le vermicompost TATA, la dolomie, le NPK 11 22 16, l'hyperphosphate de Prochimad, les farines de crabes provenant de Majunga, le Guanomad, le Terreau d'Andralanitra et le Taroka (engrais phosphaté).

Selon leur état, ces MAFORS ont été classés en deux grands groupes à savoir les MAFORS à valeurs fertilisantes organiques, simplement appelés : *matières organiques* et les MAFORS à valeurs fertilisantes minérales ou *les matières minérales*. Les matières organiques sont des ensembles hétérogènes de substances et composés d'origine animale et végétale tandis que les matières minérales sont des produits de synthèse d'éléments naturels ou chimiques directement assimilables par la plante. Le rapport C/N est un indicateur de la dynamique des matières concluant leurs valeurs fertilisantes. Les matières ayant un ratio C/N > 12 sont riche en carbone ou en élément difficilement décomposable (e.g : kératine) sont des matières stables et qui se minéralisent lentement leur conférant une valeur amendante. Les matières ayant un ratio C/N < 10 sont riche en azote ou élément assimilable. Elles se minéralisent rapidement leur conférant une valeur fertilisante. La dose d'apport varie donc selon cette classification. Le tableau suivant indique les doses apportées ainsi que la classification adoptée.

Tableau 1 : Classification des matières fertilisantes et dose d'apport (Auteur, 2019)

Doses d'apport	<i>Matières organiques</i>		<i>Matières minérales</i>	
	6T/Ha		500Kg/Ha sauf NPK : 150 Kg/Ha	
Classification	Fumier traditionnel	( <i>FumS*</i> )	Dolomie	( <i>Dol*</i> )
	Fumier amélioré	( <i>FumA*</i> )	NPK,	( <i>NPK*</i> )
	Madacompost	( <i>MC*</i> )	Hyperphosphate	( <i>HYP*</i> )
	Corne de zébu	( <i>CZ*</i> )	Fiente	( <i>Fie*</i> )
	Vermicompost	( <i>VC*</i> )	Guanomad	( <i>Gua*</i> )
	Vermicompost TATA	( <i>TATA*</i> )	Farine de crabe	( <i>FarC*</i> )
	Taroka	( <i>Tar*</i> )	Cendre de balle de riz	( <i>CB*</i> )
	Terreau d'Andralanitra	( <i>Ter*</i> )	Cendre d' <i>Eucalyptus</i>	( <i>CE*</i> )
	Poudrette de parc	( <i>PP*</i> )		

\*(X) : diminutifs utilisés lors des traitements statistiques

### 1.2.2. Variété de riz sélectionnée

La variété de riz *Chhomrong Dhan* a été sélectionnée pour cette expérimentation. Cette variété d'origine népalaise est très productive et se comporte bien sur les terres peu fertiles d'où son introduction par les chercheurs dans les années 1990 (Raboin, 2013). Depuis son introduction et sa diffusion par le FOFIFA, elle représente actuellement 80% du riz pluvial cultivé sur les Hautes-Terres. Cette variété est tolérante à la pyriculariose et s'adapte bien sur les hautes altitudes, c'est pourquoi la majorité des agriculteurs optent pour son utilisation. Le site de prélèvement se situe également à une haute altitude de 1400m d'où le choix de cette variété.

### 1.3. Dispositif expérimental et mis en pot

Chaque assemblage a été mis dans des pots fabriqués à l'aide des tubes cylindrique en PVC de 30 cm de hauteur et 16 cm de diamètre. Au fond des pots ont été collé des papiers filtres servant de tamis et des filets pour supporter le contenu de chaque pot comme illustre la Figure 3 suivante

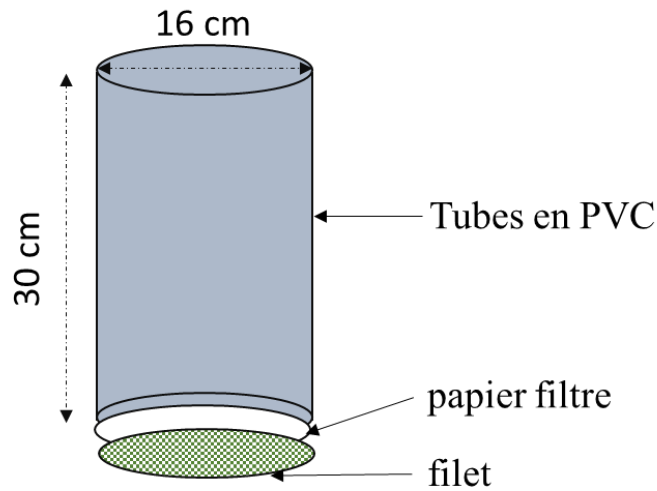
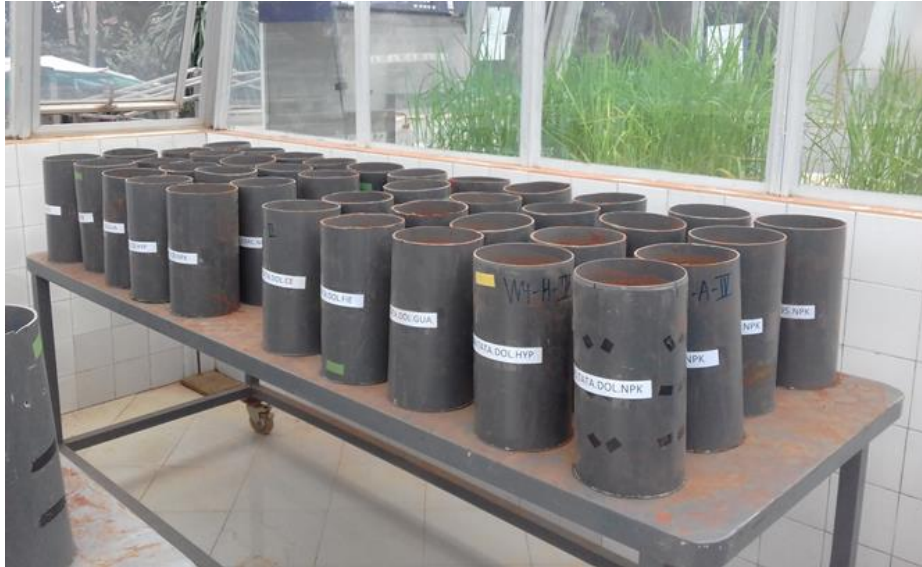


Figure 3 : Dispositif expérimental (Source : Auteur, 2019)

Le sol sec a été émietté puis tamisé à 5 mm. L'humidité des matières fertilisantes a été calculée afin d'ajuster les masses nécessaires à apporter : 36 g (équivalent à 6T/Ha) pour les MAFORS organiques et 3g (équivalent à 500Kg/Ha) pour les MAFORS minérales. Chaque pot va recevoir un assemblage de trois MAFORS mélangé dans 5Kg de sol. Chaque mélange a été mise dans des sachets étiquetés. Les 5 kg de sol tamisé ont été mis dans une grande bassine où a été versé petit à petit le contenu des sachets. Manuellement, les matières ont été bien mélangées avec le sol avant de tout verser dans les pots en PVC. Ces pots sont ensuite déposés de manière ordonnée sur des tables dans la grande serre comme l'illustre le Cliché 2 suivante.



*Cliché 2 : Pots disposés sur des tables (Source : Auteur, 2018)*

L'étape suivante consiste à l'humidification du sol à 40% de sa capacité de rétention en eau avant de faire le semis. Trois graines par pot ont été semé puis l'humidité a été ramenée à environ 70% comme illustré dans le Cliché 3 suivante.



*Cliché 3 : Semis des grains de riz (Source : Auteur, 2018)*

La durée de l'expérimentation est de 60 jours. L'essai a été effectué sous serre afin de contrôler toutes les conditions du milieu (même température, ombrage et humidité pour l'ensemble de la population).

Au total 150 pots ont été installés, chaque pot constitue un assemblage qui a été tiré aléatoirement. Chaque pot sera donc considéré comme une modalité et leur ensemble constitue la population étudiée. Le design a été mis en place en adéquation avec le modèle qui sera expliqué dans la partie suivante.

## 1.4. Variables mesurées

### 1.4.1. Au cours de l'expérimentation

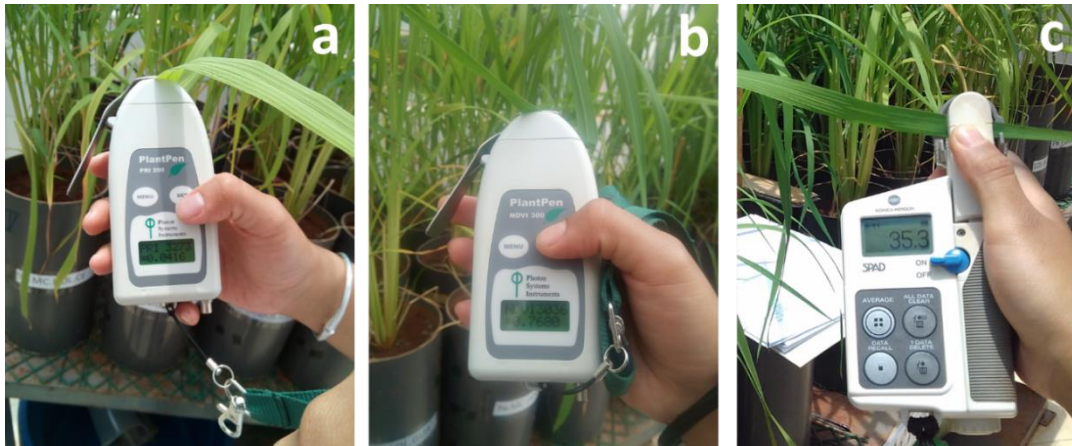
Au cours de l'expérimentation, des suivies hebdomadaires de la croissance des plantes ont été faites à l'exemple des hauteurs, du nombre de talles et du nombre de feuilles.

A la fin de l'expérience, des fonctions qui servent à estimer la chlorophylle dans la plante ont été mesurés tels que le SPAD, le PRI et le NDVI.

- Le NDVI ou « normalized difference vegetation index » est le rapport entre les bandes du PIR (proche infrarouge) et du rouge normalisé par la somme des deux bandes pour réduire les effets d'éclairement. Cet indice est un indicateur de la santé végétale puisqu'il est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation (Steven R., 2010)
- Le PRI ou « Photochemical Reflectance Index » est une mesure composée qui combine la réflectance et l'excitance solaire d'une surface foliaire, sensible aux changements dans les pigments caroténoïdes du feuillage vivant. A l'aide de ces pigments, l'indice va donner des informations sur l'efficacité photosynthétique ou de l'utilisation de la lumière photosynthétique ou encore le taux d'absorption du dioxyde de carbone par le feuillage par unité d'énergie absorbée (Steven R., 2010).
- Le *SPAD* « Single Photon Avalanche Diode » permet des mesures rapides et faciles de la teneur en chlorophylle des plantes sans endommager les feuilles des plantes. Cette teneur va donner des indices sur la santé des plantes mais aussi pour contrôler leur croissance. Il est souvent utilisé pour optimiser la fertilisation azotée mais dans notre cas, il est utilisé pour déterminer la nutrition azotée des plantes (Caccia M., 2019)

Les valeurs de NDVI, PRI et SPAD ont été obtenues par des mesures directes sur les feuilles (Cliché 4) à l'aide des appareils de mesures respectivement Plant Pen NDVI300, Photon Systems Instruments, Plant Pen PRI200, Photon Systems Instruments et SPAD-502Plus Konica Minolta Sensing.





Cliché 4 : (a) : mesure du PRI, (b) : mesure NDVI, (c) : mesure SPAD (Source : Auteur, 2018)

#### 1.4.2. A la fin de l'expérimentation

Après la récolte, les biomasses racinaires et aériennes ont été démontées, lavées puis séchées à l'étuve à 60°C pendant 48h avant d'évaluer leurs poids secs. Les éléments C, N, P, K, Ca, Mg des parties aériennes et racinaires ont été dosés.

La méthode de Dumas ou dosage par chromatographie CHN a été adoptée pour doser les teneurs totaux en carbone et azote dans les plantes (Dumas T., 1984). Des échantillons d'environ 20 µg ont été placés dans des capsules disposés dans des microplaques. Ensuite ces microplaques ont été envoyées à l'UMR Eco&Sols Montpellier pour les lectures des teneurs (C% et N%)

Les biomasses ont été broyées à 2 mm puis minéralisées à 600°C afin d'extraire à l'acide (HCl 5%) des solutions pour chaque échantillon. Ces extraits ont servi pour doser les éléments cités ci-dessus.

La méthode de coloration au bleu de molybdène a été adoptée pour doser le phosphore total dans les extraits acides de biomasses aériennes et racinaires (Murphy J., 1962). Le but est de former un complexe phosphomolybdique en milieu acide à l'aide des réactifs : Molybdate d'ammonium  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  et acide ascorbique  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ . Après la coloration la lecture a été faite à l'aide d'un spectrophotomètre dans une longueur d'onde de 880µm. Les bases échangeables (K, Ca et Mg) sont aussi dosées par la méthode spectrophotométrie après extraction par cobalt de strontium de lanthane (concentré à 25%) (Afnor, 1999). Les extraits sont dilués selon les bases à doser : 20 ou 50 pour le Calcium, 50 pour le magnésium et 200 ou 500 pour le potassium. Chacun de ces éléments possède leur propre cathode de lecture. Après dosage de ces éléments les teneurs totaux en g/kg ont été obtenues. Ensuite les quantités totales absorbées par la plante ont été calculées en multipliant les teneurs par la masse sèche des biomasses aériennes ou racinaires afin d'avoir des résultats exprimés en g/kg de biomasse.



Le sol a été séché à l'air libre sous serre avant les analyses y afférant. Le pH a été dosé à l'aide d'un pH-mètre équipé d'une électrode pH et d'une sonde Pt température. Des suspensions de 5g de sol ont servi pour doser le pH. Les teneurs totaux en carbone et azote ont été obtenus par la méthode chromatographique de Dumas comme ceux des plantes (Dumas T., 1984). Le dosage *POlsen* ou phosphore disponible dans les sols a été prévu suivant les méthodes d'extraction de Olsen (1954) et la coloration en vert malachite (Subba A., 1997).

## **1.5. Méthodes statistiques**

### **1.5.1. Approche générale**

Toutes les données recueillies pendant l'étude ont été saisies et enregistrées sous Excel. Un tableau rassemblant toutes les informations a servi de base de données qui a été traitées sous le logiciel R version 3.5.2. Les valeurs caractéristiques de chaque fonction ont été obtenues par des analyses descriptives. Une analyse en composante principale ou ACP a été effectuée pour les caractéristiques analytiques et potentielles des MAFORS (Annexe 2) et enfin le modèle combinatoire a permis d'aboutir aux classifications *a posteriori* des MAFORS.

### **1.5.2. Le modèle combinatoire de Jaillard**

L'outil d'analyse utilisé pour classer les MAFORS a été le modèle combinatoire de Jaillard (Jaillard B., Richon, C *et al.*, 2018. Jaillard B., Deleporte P. *et al.*; 2018). Succinctement, ce modèle combinatoire se déroule en deux temps : une étape de calibration suivie d'une étape de validation pour chaque fonction séparément. Dans les deux cas, une approche itérative est utilisée. *Pour illustrer la démarche, nous choisissons quatre MAFORS : le fumier, le compost, les cendres et la dolomie.*

#### **1.5.2.1. Etape de calibration.**

##### **i. Constitution des groupes fonctionnels.**

Dans un premier temps, les entités (dans notre cas, les MAFORS) sont affectées dans deux groupes dits fonctionnels de manière aléatoire ( $\varphi=2$ ). *Dans notre exemple, imaginons un premier classement suivant : le fumier, le compost et les cendres sont affectés dans le groupe « A » et la dolomie dans le groupe « B ».*

##### **ii. Constitution des motifs d'assemblages.**

Dans un second temps, le modèle constitue des motifs d'assemblages qui sont les assemblages des groupes fonctionnels. Pour deux groupes fonctionnels, il existe trois motifs possibles. *Toujours dans notre exemple, nous obtenons trois motifs d'assemblages possibles : (a), (b) et (ab).*

*L'assemblage expérimental constitués du fumier + compost correspond donc au motif (a). Ceux constitués du fumier et des cendres correspondent également au motif (a). En revanche, les assemblages expérimentaux comprenant du fumier + dolomie ou alors cendres + dolomie correspondent au motif (ab).*

### **iii. Confrontation des données prédites et des données mesurées expérimentalement**

Enfin dans un troisième temps, le modèle prédit la fonction d'intérêt (croissance, nutrition ou fertilité du sol) pour chaque motif d'assemblage. Par définition, un groupe fonctionnel est constitué des MAFORS qui expriment la même fonction. *Dans notre exemple, puisque le fumier, le compost et les cendres sont tous dans le groupe A, ils doivent donc avoir le même rôle dans les fonctions de croissance, nutrition ou fertilité du sol.* De même, des assemblages de MAFORS issues du même groupe fonctionnel devraient fournir la même valeur (la moyenne) de la fonction. *Toujours dans notre exemple, les assemblages comprenant fumier + compost, fumier + cendres ou compost + cendres devraient tous fournir les mêmes valeurs de fonction car ils appartiennent au même groupe fonctionnel et constitue tous un même motif d'assemblage (a).* Ces valeurs prédites sont confrontées aux valeurs mesurées. Le coefficient de détermination est utilisé comme un critère de classification. Le processus itératif est répété de manière à optimiser le coefficient de détermination en affectant les MAFORS dans les deux groupes fonctionnels. *Par exemple, les cendres sont classées dans le groupe « B » au lieu du groupe « A ».* La formule du coefficient de détermination ou d'ajustement est :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{A \in A_{observed}} (F_{observed}(A) - F_{modeled}(A))^2}{\sum_{A \in A_{observed}} (F_{observed}(A) - \bar{F}_{observed}(A))^2}$$

avec F la fonction (nutrition ou croissance par exemple) et A les motifs d'assemblages

Une fois toutes les combinaisons d'affectation réalisées, si le modèle n'est pas retenu, le processus itératif continue avec un nombre de groupe fonctionnel supérieur ( $\varphi=3$ ).

#### **1.5.2.2. Etape de validation.**

Pour tester le pouvoir prédictif ou « efficacité » de prédiction du modèle, la même approche itérative est utilisée par cross-validation. Plus précisément, un individu (observation) est retiré du modèle lors de la calibration et le modèle va prédire la valeur de cet individu. La valeur prédite et la valeur réelle seront ainsi confrontées et l'erreur de prédiction sera calculé. Ce processus va se reproduire pour tout individu de la population considérée afin d'en tirer la moyenne des erreurs de prédiction qui correspondra à l'erreur moyenne ou appelé coefficient d'efficacité E calculé selon la formule suivante :

$$E = 1 - \frac{\sum_{A \in A_{observed}} (F_{observed}(A) - F_{predicted}(A))^2}{\sum_{A \in A_{observed}} (F_{observed}(A) - \bar{F}_{observed}(A))^2}$$

A l'aide d'un critère de prédiction AIC (Ajustement Information Criterial), le processus itératif sélectionnant  $\varphi$  s'arrête lorsque le coefficient E commence à diminuer c'est-à-dire lorsque le critère de prédiction commence à s'altérer. Ceci empêchera d'avoir un sur paramétrage ou la sous-estimation du pouvoir prédictif du modèle. L'AIC va permettre d'avoir un modèle à la fois robuste en termes d'ajustement (*valeur observée/ valeur théorique*) et en termes de prédiction (*valeur prédite/valeur réelle*). Le coefficient  $E/R^2$  permet de conclure la robustesse des clusters obtenus sur ces deux aspects (ajustement et prédiction). Un coefficient  $E/R^2 > 0,5$  est jugé être un bon indicateur de robustesse.

Le modèle combinatoire a été utilisé pour chaque variable liée aux fonctions, séparément. Nous obtenons ainsi des classifications des MAFORS dans des groupes fonctionnels pour toutes les variables (e.g. biomasse aérienne, SPAD, pH, etc.). Puisque certaines variables sont des proxys de la même fonction (par exemple la croissante), un unique modèle a été construit pour un ensemble de variable.

### 1.5.3. Les indices multifonctionnels

Une autre forme de résultat a été l'élaboration des indices multifonctionnels. Ces indices permettent d'avoir un modèle avec des informations multifonctionnelles c'est-à-dire de rassembler plusieurs variables dans un seul modèle et faire une analyse séquentielle. Un indice sera donc attribué à chaque fonction de croissance (IM1) et nutrition des plantes (IM2) ainsi que les fonctions écologiques du sol (IM3)

L'indice multifonctionnel de croissance des plantes (IM1) a été obtenu en faisant une analyse séquentielle sur les variables suivantes : biomasse aérienne, nombre de tiges et de talles ainsi que le nombre de feuilles. Ces variables ont des impacts directs sur le rendement d'où leur choix pour la croissance des plantes afin d'avoir une meilleure production. L'indice multifonctionnel sur la nutrition des plantes (IM2) a été calculé à partir des nutriments absorbés par la plante : azote totale, phosphore totale, et les bases échangeables tels que le magnésium, potassium et calcium. Pour les fonctions écologiques du sol, un indice multifonctionnel (IM3) a été calculé à partir du pH, des teneurs en carbone et d'azote dans le sol ainsi que le rapport C/N après analyse séquentielle.

Les résultats obtenus des différents indices multifonctionnels ont fait l'objet de l'élaboration d'un modèle combinatoire final (IMT) concluant le groupement des assemblages utilisés. Ceci va permettre d'avoir une conclusion sur des groupes fonctionnels ayant des multifonctionnalités (croissance et nutrition des plantes, fonctions écologiques du sol). Ceci permet aussi d'avoir un

aperçu sur la performance agronomique et à la fois sur la performance écologique de durabilité des assemblages effectués comme cité dans l'objectif général de l'étude.

#### 1.5.4. Les transformations homothétiques

Les transformations homothétiques sont utilisées pour situer la pratique paysanne par rapport aux motifs d'assemblages que les modèles combinatoires vont sortir. La pratique paysanne associe le fumier avec du cendre de balle de riz. Pour ce faire, les moyennes de chaque motif d'assemblage ont été calculées. Ensuite, les motifs attribués à chaque pot ont été désignés pour déterminer les motifs convenant à cette pratique paysanne. C'est à ce stade que les transformations homothétiques auront lieu afin de représenter les moyennes de chaque motif d'assemblage sur une graphe simple. Les valeurs maximums et minimums des moyennes étaient calculées avant d'effectuer le calcul suivant la formule trouvée par Velasqueza *et al* en 2007 :

$$Y = 0,1 + ((x-b)/(a-b)) \times 0,9$$

**Y** est la valeur de la variable après transformation, **x** la variable à transformer ; **a** la valeur maximale de la variable et **b** la valeur minimale de la variable. Ce calcul permet d'avoir des sous-indicateurs qui réduit les valeurs des variables à une plage commune, comprise entre 0,1 et 1,0. Cette réduction facilite la lecture des résultats qui vont se trouver entre des valeurs moyennes entre 0,1 et 1.

# **RESULTATS**

## II. RESULTATS

Les résultats obtenus au cours de cette étude se focalisent sur les groupes fonctionnels issus des différents assemblages de MAFORS selon les fonctions voulues. Dans un premier temps, l'observation se portera sur les modèles issus de chaque variable selon les trois grandes fonctions de l'étude : la croissance des plantes, leur nutrition et la fertilité du sol. Ensuite, les résultats sur les indices multifonctionnels seront présentés, suivis de l'évaluation comparative des pratiques paysannes par rapport aux classements obtenus.

### 2.1. Modélisation des assemblages de MAFORS

#### 2.1.1. Croissance et activités photosynthétiques des plantes

- *Croissance des plantes*

Les variables indiquant la croissance des plantes sont : la hauteur, le nombre de feuille, le nombre de tige, le nombre de talle formé, la biomasse aérienne et la biomasse racinaire. Les modèles pour chacun de ces variables sont détaillés dans le tableau 8 en Annexe 3. Les modèles de la biomasse aérienne et du nombre de feuilles formées ont été choisis pour être expliqués ici puisque ces deux variables sont jugées les plus représentatives de la fonction croissance. Le Tableau 2 illustre chaque modèle proposé sur les groupes fonctionnels formés après analyses.

Tableau 2 : Modèle combinatoire de la croissance des plantes

	Biomasse aérienne	Nombre de feuilles
<b>A*</b>	{CZ}	{CZ}
<b>B</b>	{FumA, FumS}	{CB, Dol, HYP, MC, TATA, Ter}
<b>C</b>	{FarC, HYP, MC, NPK, TATA}	{CE, FarC, Fie, FumA, FumS, Gua, NPK, PP, Tar, VC4}
<b>D</b>	{CB, CE, Dol, Fie, Gua, PP, Tar, Ter, VC4}	
<b>3 meilleurs motifs*</b>	abd (3)	ac (4)
	abc (1)	abc (10)
	ad (6)	c (17)
<b>3mauvais motifs</b>	c (4)	bc (88)
	ac (2)	ab (2)
	d (20)	b (6)

\***A, B, C** et **D** : désigne les groupes fonctionnels

\***3 meilleurs motifs** : les trois meilleurs motifs d'assemblages

\***3 mauvais motifs** : les trois mauvais motifs d'assemblages

(1,2...) : fréquences d'utilisations des motifs d'assemblages

Pour la modélisation de la biomasse aérienne, 147 pots ont été utilisés par le modèle. Le coefficient d'ajustement est de  $R^2$  est de 0,84 avec un coefficient d'efficacité E de 0,69 ce qui donne un coefficient de robustesse  $E/R^2$  de 0.82. Le modèle a pu prédire 130 pots parmi les 147 utilisés car certains motifs ne sont représentés que par un seul pot. La modélisation du nombre de feuilles a utilisé 144 pots dont 127 ont été prédits. Les coefficients obtenus sont de  $R^2=0,65$ ,  $E=0,39$  et  $E/R^2=0,61$ . La corne de zébu constitue un premier groupe fonctionnel et permet à la fois d'avoir beaucoup de biomasse aérienne ainsi que beaucoup de feuilles lorsqu'elle est associée avec d'autres MAFORS appartenant à d'autres groupes fonctionnels (**abd**, **abc**, **ad / ac**, **abc**). Les matières {FumA, FumS} constituent le deuxième groupe fonctionnel « **B** » qui permettent une croissance des plantes en termes de biomasse aérienne et les matières {CB, Dol, HYP, MC, TATA et Ter} en termes de nombre de feuilles. Ensuite, celles du groupe « **C** » sont respectivement {FarC, HYP, MC, NPK, TATA} et {CE, FarC, Fie, FumA, FumS, Gua, NPK, PP, Tar, VC4}. Leurs assemblages avec de la corne de zébu et une matière du groupe « **B** » permettent d'avoir une croissance de plante élevée. Au contraire, le fait de ne rassembler que les MAFORS du groupe « **C** » ou « **D** » entres elles réduisent la production de biomasse (mauvais motifs **c** et **d**)

- *Activités photosynthétiques des plantes*

Les variables qui peuvent quantifier les activités photosynthétiques des plantes sont le NDVI, le PRI et le SPAD. La variable SPAD a été retenue pour élaborer le modèle combinatoire. Le coefficient d'ajustement ( $R^2=0,87$ ) est très élevé ainsi que le coefficient d'efficacité ( $E=0,41$ ) ce qui donne un coefficient de robustesse proche de 1( $E/R^2 =0.94$ ). Selon le Tableau 3, le modèle a pu prédire 127 pots parmi les 144 utilisés en les groupant dans 3 groupes fonctionnels « **A** », « **B** » et « **C** »

Tableau 3 : Modèle combinatoire du SPAD

<b>SPAD</b>	
<b>A*</b>	{CZ}
<b>B</b>	{Gua, MC, Ter, VC4}
<b>C</b>	{CB, CE, Dol, FarC, Fie, FumA, FumS, HYP, NPK, PP, Tar, TATA}
<b>2 meilleurs motifs*</b>	abc (5) ac (14)
<b>2 mauvais motifs*</b>	bc (65) c (43)

\***A, B, C** et **D** : désigne les groupes fonctionnels  
(1,2...) : fréquences d'utilisations des motifs d'assemblages

Une nouvelle fois, la corne de zébu {CZ} constitue à elle seule un groupe fonctionnel qui par ailleurs permet une forte activité photosynthétique (données non présentées). Les MAFORS classées dans le groupe « **B** » sont {Gua, MC, Ter, VC4} et ceux du groupe « **C** » sont {CB, CE, Dol, FarC, Fie, FumA, FumS, HYP, NPK, PP, Tar, TATA}. Les meilleurs assemblages de groupes fonctionnels (abc et ac) ont favorisé les activités photosynthétiques des plantes tandis que les mauvais assemblages (bc et c) les réduisent.

### 2.1.2. Nutrition des plantes

La nutrition des plantes peut être exprimée par la nutrition azotée et phosphatée des différentes parties (aériennes et racinaires). Les quantités totales des microéléments et macroéléments tels que le calcium, magnésium et potassium sont aussi considérées. Les tableaux 9 et 10 de l'Annexe 3 présente les valeurs caractéristiques exactes ainsi que les classifications obtenues pour chaque variable. En général, 144 pots ont été testés dont 127 ont servi pour prédire chacune des fonctions citées ci-dessus dans les deux compartiments de la plante. La moyenne du coefficient d'ajustement  $R^2$  était de 0,81 pour la partie aérienne et de 0,72 pour la partie racinaire. Le coefficient de prédiction E était faible par rapport au coefficient d'ajustement des parties aériennes et racinaires (qui sont respectivement  $E_{BA} = 0,62$  et  $E_{BR} = 0,54$ ). Les coefficients de robustesse  $E/R^2$  restent élevés pour confirmer la vigueur des classifications obtenues ( $E/R^2_{BA} = 0,76$  et  $E/R^2_{BR} = 0,71$ ). La classification des MAFORS varie selon les variables en question comme la présente la Figure 4 suivante

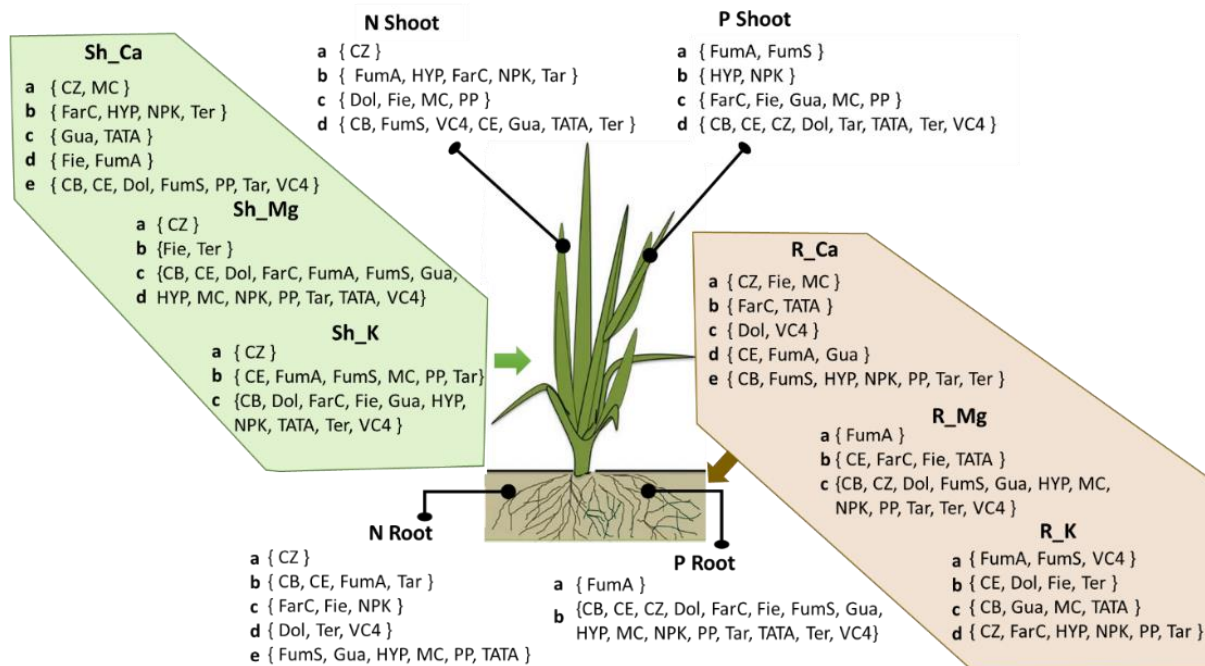


Figure 4 : Classification des MAFORS selon la nutrition des plantes



Pour la biomasse aérienne, avec une moyenne de 4 groupes formés, la corne de zébu reste souvent seul dans le groupe « **A** » pour la plupart des fonctions ( $N_{tot}$ ,  $Mg_{tot}$  et  $K_{tot}$ ). Elle est associée avec le Madacompost {MC} dans ce même groupe pour la fonction  $Ca_{tot}$  alors que la fonction  $P_{tot}$  sort les fumiers traditionnels et améliorés {FumS et FumA} dans le groupe « **A** ». Donc, si la corne de zébu ou parfois le madacompost permet d'expliquer une forte partie de la variance totale de la nutrition minérale dans la partie aérienne ; les fumiers expliquent une forte proportion de la variable "assimilation du phosphore". Les meilleurs assemblages sont obtenus en associant ces MAFORS du groupe « **A** » avec les autres des différents groupes.

A part ces quatre MAFORS, le NPK et l'hyperphosphate {HYP} se classent dans le groupe « **B** » dans les trois fonctions ( $N_{tot}$ ,  $P_{tot}$  et  $Ca_{tot}$ ). Les MAFORS {Fie, Ter} constituent le groupe « **B** » du  $Mg_{tot}$  et enfin les {CE, FumA, FumS, MC, PP, Tar} pour celle du  $K_{tot}$ . Leur présence dans chaque assemblage est indispensable pour une meilleure nutrition potassique.

Concernant la biomasse racinaire, les groupes fonctionnels formés varie de 2 à 5. Dans les fonctions P, Mg et K totaux, le FumA apparaît dans le groupe « **A** » suivi du CE, FarC et Fie dans le groupe « **B** ». Pour ces quatre fonctions, le motif (ab) apparaît toujours comme l'un des meilleurs assemblages (i.e. qui explique une forte proportion de la variance). A part le  $P_{tot}$  les MAFORS {CB, Gua et MC} sont classés dans le groupe « **C** ». Les motifs (abc) ou (ac) apparaissent aussi dans les meilleurs assemblages. La nutrition azotée ( $N_{tot}$ ) et le calcium total ( $Ca_{tot}$ ) dans les racines ont sorti respectivement le {CZ} et {CZ, Fie, MC} dans les groupes « **A** » dont leur présence est indispensable pour avoir les meilleurs résultats attendus. Ainsi le choix d'assemblage est un peu plus souple pour l'amélioration de la nutrition dans la partie racinaire comparée à celle de la partie aérienne.

### 2.1.3. Caractéristiques des sols

Après l'expérimentation, les sols dans chaque pot ont été caractérisés afin de voir l'efficacité des assemblages dans l'amélioration de leurs propriétés. Les variables étudiées étaient donc le pH du sol ainsi que les teneurs en carbone et azote totaux. Un modèle sur le rapport C/N a été élaboré pour apprécier la qualité des assemblages effectués.

En moyenne 144 pots ont été utilisés pour élaborer les modèles et 127 pots pour leurs prédictions. Les valeurs de  $R^2$  varient de 0,73 à 0,87 et ceux de E varient de 0,47 à 0,78. Le rapport  $E/R^2$  quant à lui varie de 0,64 à 0,92. Les groupes obtenus sont à peu près les mêmes avec 3 ou 4 groupes fonctionnels formés. Les trois premières fonctions (C, N et C/N) ont donné les mêmes résultats dont dans les groupes « **A** » figurent les matières suivantes : {FumA, FumS, PP, Tar}. Les matières suivantes sont dans les groupes « **B** » {CZ, Fie, MC} et parfois le {FarC} (pour le modèle du carbone).

Les groupes « C » et « D » commencent à varier selon les fonctions mais quelques MAFORS y restent fidèle à savoir {CB, CE, Ter, VC4} dans le groupe « C » et {HYP et NPK} dans le groupe « D ». Le modèle du pH quant à lui sort le {CZ} dans le groupe « A », {CB, Gua, HYP, VC4} dans le groupe « B », {CE, Dol, FarC, PP} dans le groupe « C » et {Fie, FumA, FumS, MC, NPK, Tar, TATA, Ter} dans le groupe « D ». Les fonctions C, C/N et pH sont arrivés à 4 groupes fonctionnels tandis que la fonction N reste sur 3 groupes fonctionnels. Les meilleurs et mauvais assemblages effectués sont illustrés dans le tableau 4.

Tableau 4 : modèle combinatoire des caractéristiques du sol

	So_C	So_N	So_C/N	pH
<b>Meilleurs motifs d'assemblages</b>	ad (11)*	abc (17)	c (6)	d (2)
	ab (7)	ac (34)	cd (38)	cd (37)
	abd (13)	ab (3)	bc (3)	bcd (33)
<b>Mauvais motifs d'assemblages</b>	cd (19)	bc (37)	ad (16)	acd (4)
	d (3)	c (36)	acd (22)	abc (5)
	b (2)		abc (5)	ab (2)

(1, 2, ...) \* : fréquence d'utilisation dans l'expérimentation

D'après ce tableau, les motifs d'assemblages qui améliorent le stockage de carbone dans le sol sont ceux regroupant le fumier, la poudrette de parc et/ou du Taroka associé avec l'une ou deux des MAFORS du groupe « B », « D » ou «BD ». Or le fait de mélanger les matières du groupe « B » ou « D » seul défavorise le stockage de carbone dans le sol ; il en de même pour les mélanges (cd).

La fertilité du sol peut être appréciée par la teneur en azote dans le sol ainsi que la quantité de phosphore échangeable. Ce dernier n'étant pas encore disponible, le modèle sur la teneur en azote totale peut donner un aperçu sur cette fertilité. Pour son amélioration, il est toujours indispensable d'apporter du fumier ou du PP ou du Tar dans les assemblages et les associer avec de la fiente ou de la corne de zébu ou du Madacompost selon leur disponibilité. Les autres MAFORS du groupe « C » peuvent être utilisés si ces MAFORS ne sont pas disponibles, on peut choisir entre les cendres (CB et CE), ou le terreau ou la vermicompost.

Le rapport C/N est surtout utilisé pour apprécier la qualité de la matière organique du sol. Ainsi celles qui sont dans le groupe « C » {CE, Dol, Gua, TATA, Ter, VC4} sont plutôt des MAFORS à valeur amendante.

Par contre, les motifs d'assemblages qui favorise la fertilité (adéquate au modèle N) tels que (abc) et (acd) ont des valeurs fertilisantes. Finalement, le pH du sol qui variait de 4.08 à 6.32 a sorti 4 groupes après analyse combinatoire. Les MAFORS du groupe « D » {Fie, FumA, FumS, MC, NPK, Tar, TATA, Ter} rassemblés entre elles ont induit les pH les plus élevés tandis que le motif (ab) c'est-à-dire la corne de zébu avec trois autres MAFORS {CB, Gua, HYP, VC4} ont induit les pH les plus acides.

## 2.2. Indices multifonctionnels

### 2.2.1. Indice multifonctionnel de croissance

Pour rappel, l'indice multifonctionnel de croissance des plantes (IM1) a été obtenue en faisant une analyse séquentielle sur les variables suivantes : biomasse aérienne, nombre de tiges et de talles ainsi que le nombre de feuilles. Les MAFORS ont été classés dans quatre groupes comme l'illustre la Figure 5 suivante

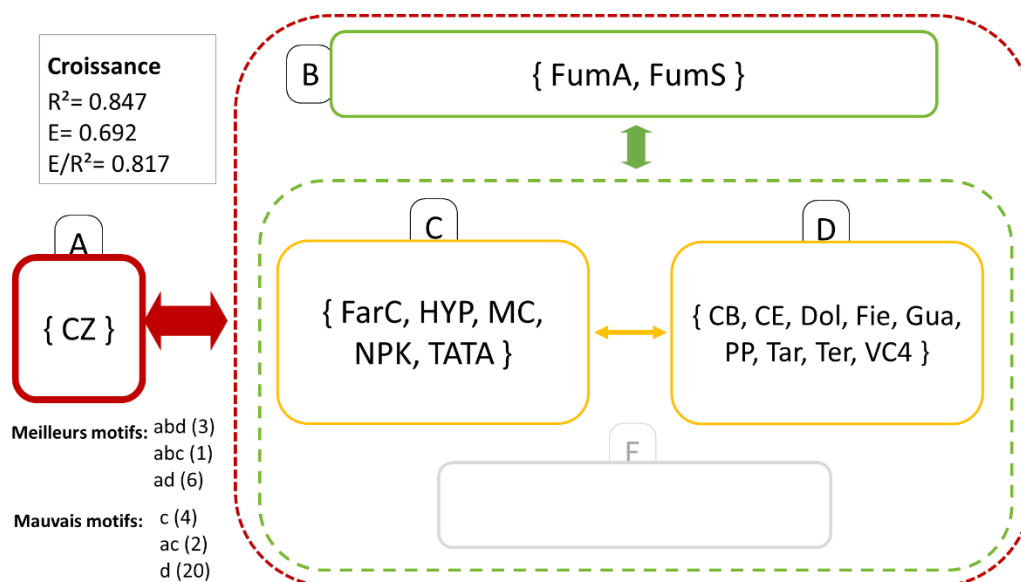


Figure 5 : Groupes fonctionnels de la croissance des plantes

Le rapport  $E/R^2$  obtenu est de 0,82 qui est une valeur acceptable pour la robustesse du test. Le modèle est aussi bien ajusté et bien prédit. La corne de zébu seule constitue le groupe « A ». La croissance des plantes peut être améliorée en mélangeant cette matière avec les MAFORS du groupe « B » et celles du groupe « D » ou « C » ou tout simplement avec le motif (ac). Nous pouvons prendre les exemples suivants :

- abd :** {CZ, FumA, Tar}, {CZ, FumS, CE}
- abc :** {CZ, FumA, FarC}, {CZ, FumS, NPK}
- ad :** {CZ, CB,}, {CZ, Tar}

Les mélanges entre les MAFORS appartenant au groupe « C » ou « D » ne sont pas favorables à la croissance des plantes, de même que pour les assemblages des MAFORS du motif (ac).

### 2.2.2. Indice multifonctionnel de la nutrition des plantes

Pour rappel, un indice multifonctionnel sur la nutrition des plantes (IM2) a été calculé à partir des quantités totales en : azote, phosphore, magnésium, potassium et calcium. La Figure 6 modélise les classifications dans des groupes fonctionnels après analyse séquentielle.

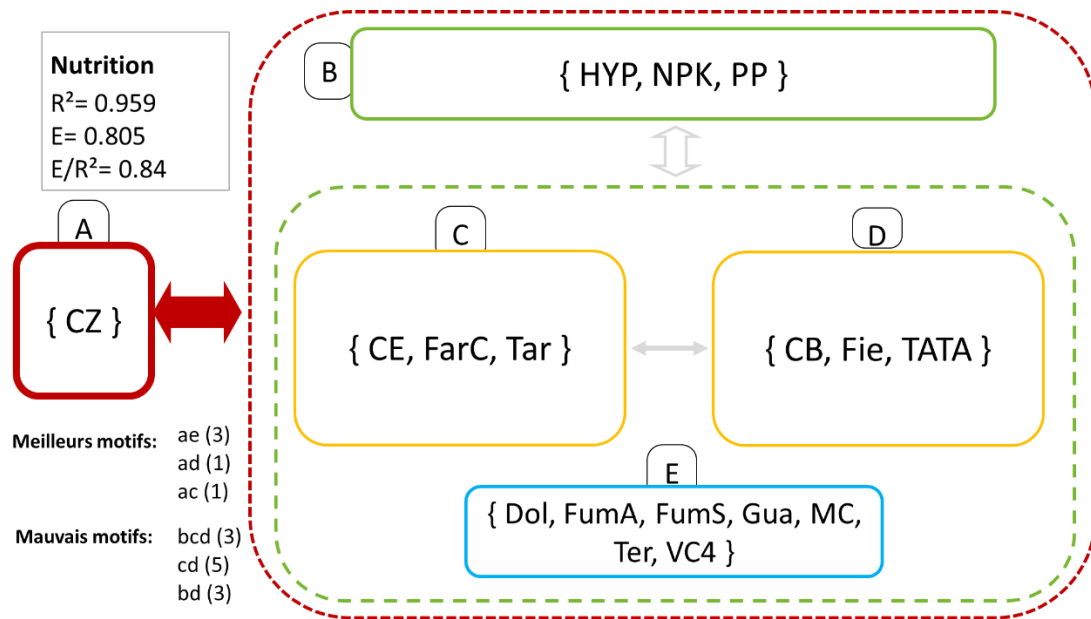


Figure 6: Groupes fonctionnels impactant la nutrition des plantes

Le rapport indiquant la robustesse du modèle est assez élevé  $E/R^2 = 0,83$ . La corne de zébu { CZ } est la seule MAFOR du groupe « A ». Vu les meilleurs assemblages effectués, il est indispensable d'avoir la corne de zébu dans les assemblages pour avoir des résultats optimums (ae, ad et ac). Entre autres, les assemblages de MAFORS à éviter sont donc : bcd, cd et bd.

### 2.2.3. Indice multifonctionnel des fonctions écologiques du sol

Pour les fonctions écologiques du sol, un indice multifonctionnel (IM3) a été aussi calculé à partir du pH, des teneurs en carbone et d'azote dans le sol ainsi que le rapport C/N après analyse séquentielle. La Figure 7 présente les groupements obtenus après classifications.

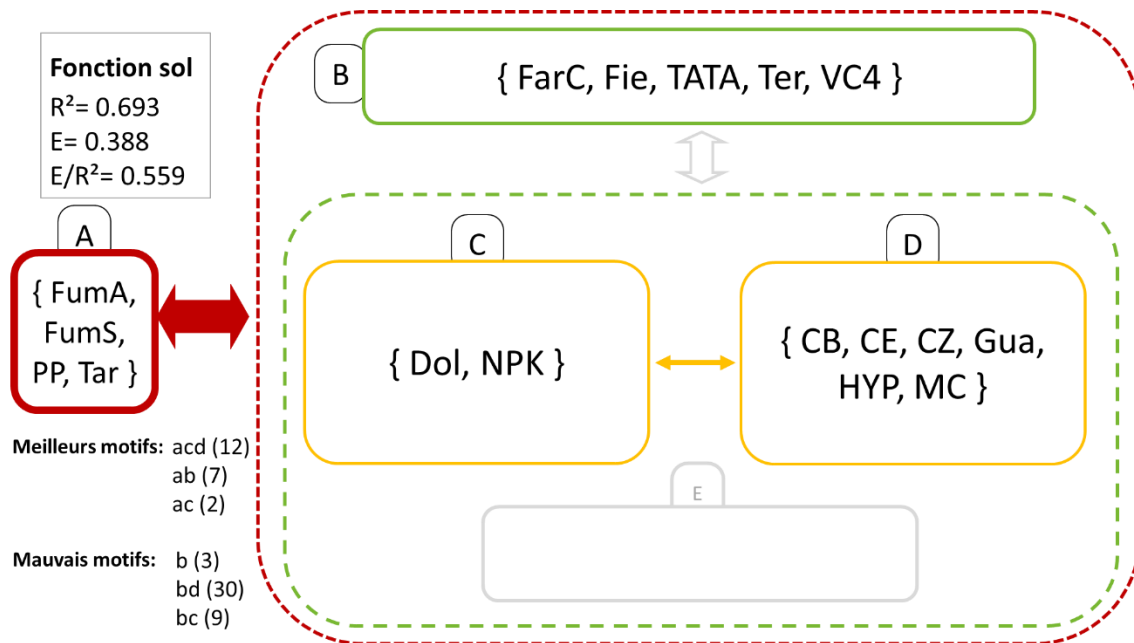


Figure 7 : Groupes fonctionnels impactant les fonctions écologiques du sol

Le coefficient d'ajustement  $R^2 = 0,69$  est élevé comparé au coefficient d'efficacité qui est un peu faible  $E = 0,38$  mais le rapport  $E/R^2 = 0,559$  est assez élevé pour valider le modèle. Les matières ont été classés dans quatre groupes fonctionnels. Le premier groupe « **A** » est constitué de {FumA, FumS, PP et Tar}. Les MAFORS {FarC, Fie, TATA, Ter, VC4} constituent le groupe « **B** » tandis que {Dol et NPK} constituent le groupe « **C** » et celles du groupe « **D** » sont {CB, CE, CZ, Gua, HYP, MC}. En vue de redresser la fertilité du sol et d'avoir des effets pérennes, les fertilisations recommandées sont les motifs d'assemblages : (acd), (ab) et (ac). Il est donc primordial de choisir une MAFOR du groupe « **A** » dans les assemblages afin d'atteindre ces objectifs. Ensuite, une large gamme de choix s'impose entre les MAFORS du groupe « **C** » et « **D** ».

## 2.3. Classification finale des MAFORS et pratique paysanne

### 2.3.1. Indice multifonctionnel total (IMT)

En regroupant tous les groupements obtenus dans le cadre de cette étude, la classification dans la Figure 8 ci-dessus a été obtenue. Une analyse séquentielle a été effectuée par le modèle de Jaillard selon les trois grandes fonctions (croissance, nutrition et sol). Les variables étudiées dans ce modèle final étaient les mêmes que ceux des précédents modèles sur les IM. Les valeurs caractéristiques étaient :  $R^2= 0,89$ ,  $E= 0,67$  et  $E/R^2= 0,75$  ainsi le modèle est fiable.

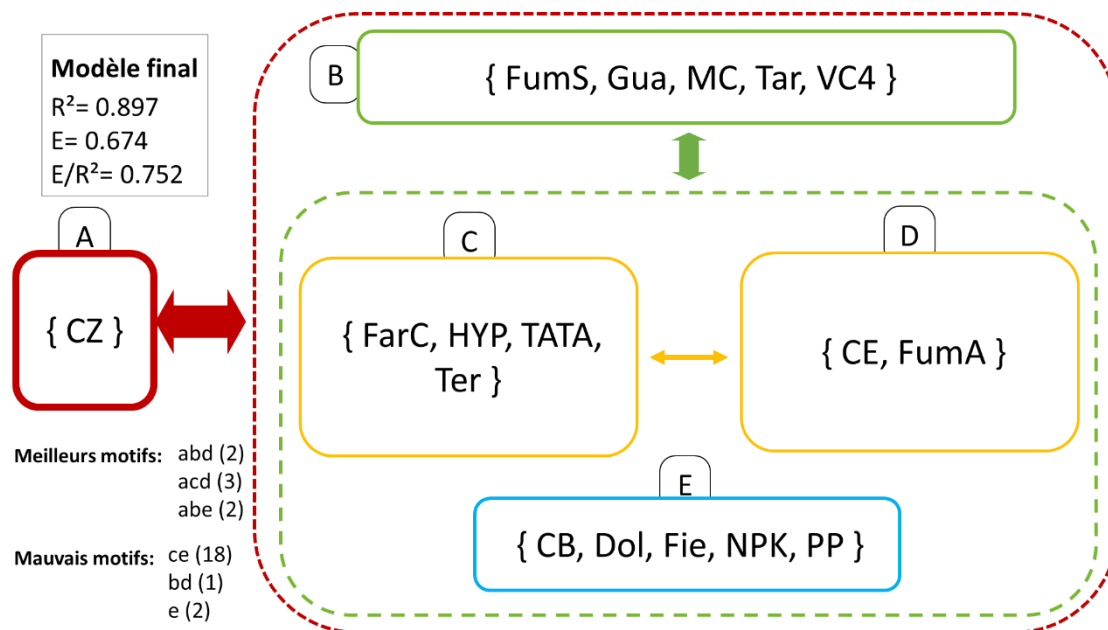


Figure 8 : Classification finale des MAFORS

Au final les MAFORS ont été classés dans cinq groupes. Comme dans la majorité des modèles effectués, la corne de zébu est le seul à rester dans le groupe « A ». Les MAFORS du groupe « B » sont {FumS, Gua, MC, Tar et VC4}. Les MAFORS {FarC, HYP, TATA, Ter} constituent le groupe « C » et celui du groupe « D » est constitué de {CE et FumA}. Les MAFORS du dernier groupe « E » sont {CB, Dol, Fie, NPK, PP}. Les motifs d'assemblage (Tableau 5) qui ont répondu aux critères des trois fonctions sont : (abd), (acd) et (abe).

Tableau 5 : Exemples des meilleurs assemblages qui ont répondu à tous les critères

Motifs d'assemblages	abd	acd	abe
	{ CZ, VC, FumA }	{ CZ, TATA, FumA }	{ CZ, Gua, Dol }
<b>Exemples</b>	{ CZ, Tar, FumA }	{ CZ, Ter, FumA }	{ CZ, Gua, CB }
		{ CZ, FarC, CE }	

### 2.3.2. Situation paysanne

Cette dernière partie des résultats tente de situer la pratique paysanne par rapport aux résultats obtenus. Les agriculteurs fertilisent leurs champs avec une association de deux MAFORS qui sont : le fumier traditionnel noté FumS et les cendres de balle de riz noté CB. Par rapport aux motifs d'assemblages issus des modèles de la croissance et de la nutrition de la plante, les pratiques paysannes sont situés dans la Figure 9 suivante.

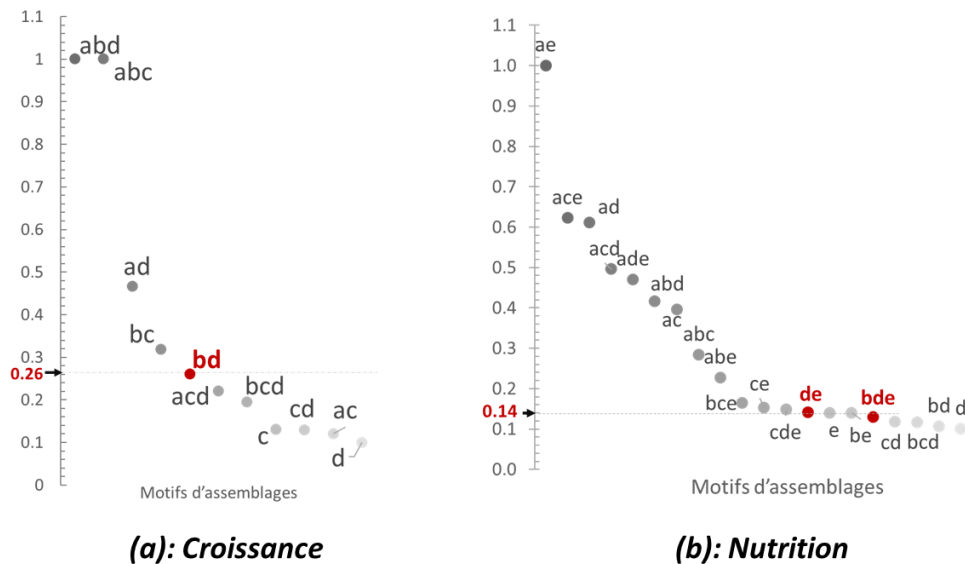


Figure 9 : Situation de la pratique paysanne par rapport à la croissance et nutrition des plantes

D'après la Figure 9 (a), la pratique paysanne (**bd**) se trouve à une moyenne de **0,26** par rapport aux autres motifs d'assemblages réalisés. Par ailleurs les motifs (abd) et (abc) se différencient des autres en termes de croissance des plantes. L'association « fumier » et « cendre de balle de riz » apparaît dans deux motifs d'assemblages dans le cadre de la nutrition des plantes : (**de**) et (**bde**). La moyenne de ces deux motifs est faible 0,14. Le motif (ae) se démarque des autres avec une moyenne maximale de 1.

Par rapport aux motifs d'assemblages issus des modèles des fonctions écologiques du sol et du modèle final, les pratiques paysannes sont situées dans la Figure 10 suivante.

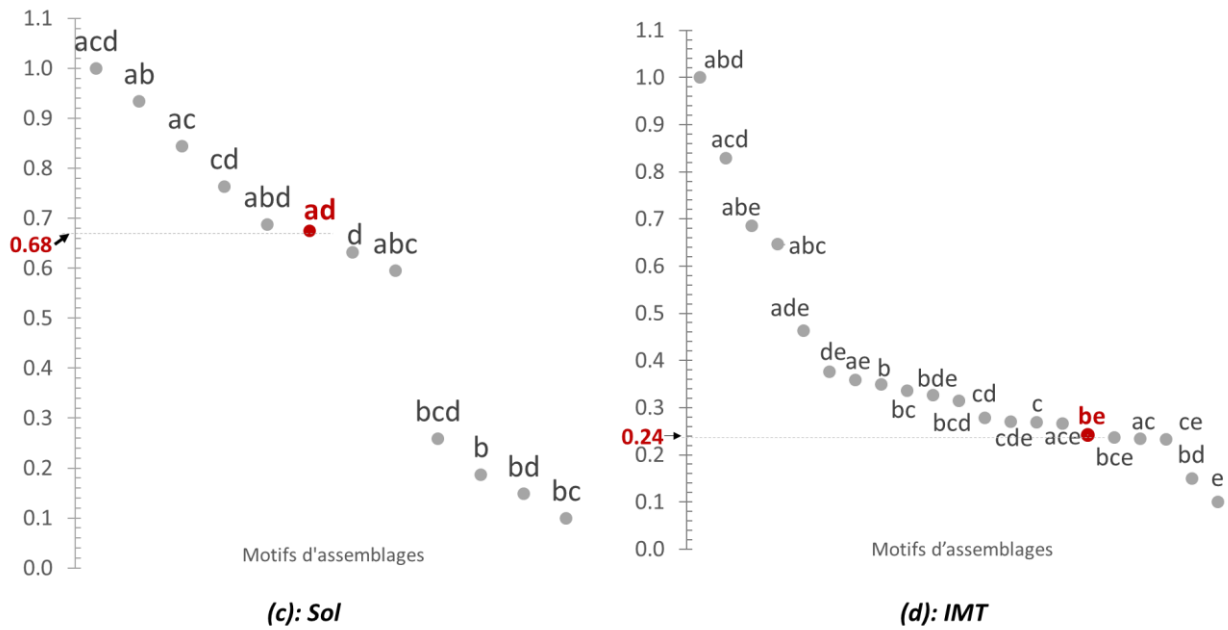


Figure 10 : Situation de la pratique paysanne par rapport à l'écologie du sol et de l'IMT

D'après la figure 10 (c) suivante, la pratique paysanne (**ad**) se trouve à une moyenne de 0,68 en fonction de l'écologie du sol. Les motifs d'assemblages peuvent être divisés en deux grandes catégories d'après cette figure. La première catégorie comprend les motifs d'assemblage avec des moyennes inférieures à 0,3 qui améliorent peu les caractéristiques du sol alors que la seconde ayant des moyennes supérieures à 0,6 améliorent nettement les propriétés du sol. Ainsi la pratique paysanne d'assemblages de MAFORS {FumS, CB} peut améliorer les fonctions écologiques du sol. L'indice multifonctionnel total (IMT) rassemble les trois fonctions concernant la plante et le sol. Dans cette approche globale (figure 10.d), la pratique paysanne désignée par le motif (**be**) se trouve à une moyenne de 0,24.



**DISCUSSIONS ET  
PERSPECTIVES**

### III. DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

Les discussions et perspectives seront orientées selon les trois grandes fonctions constituant l'objectif de l'étude à savoir : la favorisation de la croissance de la plante, l'amélioration des nutriments pour assurer un bon développement de la plante ainsi que la maximisation des fonctions écologiques du sol. Après les discussions auront lieu les points forts et faibles de l'étude puis les perspectives.

#### 3.1 Assemblages de MAFORS pour une meilleure croissance de la plante

En observant les variables indiquant la croissance des plantes (biomasses aériennes, nombre de tiges et talles et nombre de feuilles), les modèles combinatoires issus de ces variables ont des coefficients d'ajustement  $R^2$  variant de 0,65 à 0,85 et des coefficients de robustesses  $E/R^2$  variant de 0,61 à 0,82 (Annexe 3). Ainsi, la fonction de croissance est expliquée avec des meilleurs coefficients lorsque les MAFORS sont classées dans des GF. Ceci justifie l'hypothèse 1 qui stipule que « Les MAFORS peuvent être classées dans différents GF dont les assemblages expliqueront de manière satisfaisante ( $R^2 > 0,7$ ) les fonctions mesurées »

Le modèle combinatoire de la croissance des plantes (issus de l'IM1) a sorti la corne de zébu dans le groupe « A ». En étudiant la classification « *a priori* » selon les caractéristiques des MAFORS (Annexe 3), cette matière constitue aussi le premier groupe avec une richesse en carbone, en azote et en matière organique. Cette richesse minérale lui permet donc de fournir de l'azote minéral (diffusible) avec une vitesse lente sans épuiser les ressources tout au long du développement de la plante. Elle a donc une valeur fertilisante élevée mais diffusive. Ainsi sa présence est un atout pour améliorer la fertilisation sur le long terme. Or, une matière ne peut combler à elle seule les multiples carences des sols ferrallitiques. Ainsi la croissance des plantes ne peut être améliorée qu'en mélangeant la corne de zébu avec les MAFORS des autres groupes fonctionnels (Ballot *et al.*, 2016). Le modèle sur la croissance des plantes a donc sorti les motifs d'assemblages pour lesquels la croissance des plantes est maximale. Les différents motifs d'assemblages formés témoignent que l'interaction ou la complémentarité avec les autres matières est nécessaire pour augmenter la quantité d'éléments apportée (Barantal *et al.*, 2011). De plus, chaque MAFOR a ses propres propriétés intrinsèques (Annexe 2). Le nombre de matière à apporter détermine alors la chance d'avoir des complémentarités des effets. Les classifications obtenues sont donc liées à des effets de composition des MAFORS apportées, ce qui justifie l'hypothèse 2.

### 3.2 Assemblages de MAFORS améliorant la nutrition des plantes

Les modèles sur les variables expliquant la nutrition des plantes (N, P, K, Ca, Mg et K) ont eu des coefficients d'ajustement  $R^2$  variant de 0,7 à 0,9 et des coefficients de robustesses  $E/R^2$  variant de 0,6 à 0,9 (Annexe 3). La fonction nutrition des plantes est donc bien expliquée lorsque les MAFORS sont classées dans des GF d'où la validation de l'hypothèse 1.

Le modèle combinatoire sur la nutrition des plantes (IM2) a sorti cinq groupes fonctionnels différents. L'obtention de ces cinq GFs témoigne que chaque groupe a ses fonctions de nutrition sur la plante selon les caractéristiques des MAFORS qui les composent. Le groupe « **A** » est encore composé de la corne de zébu. Les meilleurs motifs d'assemblages obtenus nécessitent la présence de cette manière. Donc, la nutrition des plantes est encore conditionnée par la présence de la corne de zébu dans les assemblages. Les matières du groupe « **B** » sont riches en éléments minérales, celles du groupe « **C** » sont riches en cations échangeables ( $Ca^+$  et  $Mg^+$ ) et celles du groupe « **D** » riches en silice et potassium. Certaines MAFORS du groupe « **E** » assurent la nutrition phosphatée des plantes (fumier amélioré ou fumier traditionnel) et d'autres ont différentes fonctions selon leurs caractéristiques. Ceci confirme l'hypothèse 2 qui affirme que « Les classifications dans des GF sont liées à des effets de composition, selon les fonctions ».

La corne de zébu est riche en azote permettant à la plante de réaliser la photosynthèse et donc de croître. La quantité d'azote absorbée détermine le niveau d'absorption des autres éléments. C'est pour cette raison que l'azote est considéré comme le pivot de la culture (Chabalier *et al.*, 2006). Mais comme cet élément n'est pas suffisant pour le développement de la plante, il est nécessaire de l'associer à d'autres matières. A l'exemple des fumiers (source de carbone organique), fiente ou TATA (riche en P et N), cendres ou farine de crabe ou taroka (riche en K, Ca, ...). Des études faites par Andrianarimanana (2014) sur le vermicompost TATA ont affirmé que ce MAFOR est riche en P assimilable et en azote totale si bien que son association avec des matières riches en composés organiques stimule les activités microbiennes d'où la minéralisation du C et N et la libération d'autres éléments indispensables pour la plante.

A part l'azote, la disponibilité du phosphore est indispensable pour la plante puisque le P joue un rôle important dans la stimulation de la croissance des racines ; la stimulation d'un tallage plus actif avec des talles fertiles pour le riz ; la maturation des grains ; et la formation des graines (Pande *et al.*, 1997). Selon Raharinosy (1983), le fumier mélangé avec du TSP constitue d'une part, une source de N, P, K et d'autres éléments minéraux mineurs (Palm *et al.*, 1997) nécessaires au développement des plantes.

Rakotoson (2009) a trouvé une corrélation positive entre le C organique et la quantité de P prélevé par le riz pluvial ainsi qu'une corrélation entre la biomasse végétale totale récoltée et le P prélevé par les échantillons de plante. Ce qui signifie alors que plus la quantité de C organique dans les intrants est élevée, plus il y a une amélioration du prélèvement du P par le riz pluvial, et plus la production de biomasse végétale est élevée.

### **3.3 Assemblages de MAFORS maximisant les fonctions écologiques du sol**

Les fonctions écologiques du sol sont appréciées par sa capacité à stocker du carbone, par sa fertilité et son pH. Les modèles combinatoires sur ces variables ont sorti des coefficients d'ajustement  $R^2$  variant de 0,7 à 0,9 et des coefficients de robustesses de 0,6 à 0,9. L'hypothèse 1 est encore vérifiée puisque les fonctions écologiques du sol sont bien expliquées avec les assemblages de MAFORS obtenus.

Dans un modèle combinatoire des fonctions écologiques du sol (IM3), les MAFORS ont été classés dans quatre groupes fonctionnels. Le premier GF « **A** » regroupe des matières riches en matière (carbone) organique. Le deuxième GF « **B** » regroupe des matières riches en éléments minéraux et cations basiques. Le troisième GF « **C** » quant à lui regroupe deux matières commerciales la dolomie et le NPK. Le quatrième et dernier groupe « **D** » est composé de six MAFORS qui ont chacun leur particularité mais qui auront les mêmes effets sur les fonctions du sol dans le cas d'assemblages.

Le stockage du carbone ainsi que la disponibilité de l'azote dans le sol nécessitent la présence du fumier, de la poudrette de parc et/ou du Taroka dans les assemblages. Les MAFORS primordiales à associer avec eux sont la fiente, la corne de zébu et le Madacompost ou le TATA et NPK pour la correction du pH. D'après Hermann et al. (2002), la minéralisation des matières organiques durant une première période après enfouissement correspond à la dégradation des composés solubles ou composés labiles qui sont les formes organiques les plus facilement décomposables. Et vu que les MAFORS (du groupe « **A** ») sont composés surtout de cellulose, leur minéralisation pourrait être rapide. Cette minéralisation sera surtout réalisée par les microorganismes du sol (Fontaine et al., 2003). Certes, vu que ces MAFORS ont des teneurs faibles en azote, les microorganismes ne pourront minéraliser qu'une partie des substances organiques. C'est pourquoi, leurs associations avec des MAFORS riche en azote (Fiente, TATA et NPK) est nécessaire.

Le sol est un facteur important de cinétique de minéralisation des matières organiques à travers les faunes qu'il renferme (Rabetokontany, 2013). Les caractéristiques du sol conditionnent la dynamique de la biomasse microbienne ainsi que la dégradation des matières organiques (Balesdent *et al.*, 2000). Les effets de ces décompositions impacteront la disponibilité par la plante des éléments issus des assemblages. Tout d'abord, les effets auront lieu sur l'accès des microorganismes aux substrats (Angers *et al.*, 1997) et par la suite des effets sur la disponibilité en azote et en d'autres éléments (Corbeels *et al.*, 2003) et enfin sur le stockage de carbone dans le sol (Balesdent *et al.*, 2000). En raisonnant sur les assemblages effectués, les exemples illustrés dans le Tableau 7 répondent à ces critères

Tableau 6 : Effets des assemblages sur les fonctions écologiques du sol

Effets	Impacts	Modèles affectés	Exemples
Accès des microorganismes aux substrats	Décomposition des MO	Teneur en C	{Fum, Dol, Gua} {Fum, HYP, NPK} {PP,Gua, TATA}
	Amélioration des propriétés du sol	pH	{Fum, MC, TATA} {Fum, MC, Tar} {Fum, Dol, CE/Gua}
Effet sur la disponibilité de N	Amélioration de la fertilité du sol	Teneur en N	{Fum, Dol, Gua} {Fum, CB, Fie} {MC, VC, Tar}
Stockage de C	Accumulation de réserve dans le sol	Rapport C/N	{VC, Dol, CE/Gua} {TATA, Dol, CE/Gua} {Ter, CB, Gua} {Ter, Dol, CE}

D'après ce tableau, des assemblages permettent à la fois d'avoir des effets multiples améliorant à la fois l'habitat des organismes du sol tout en rendant disponibles les éléments nécessaires pour la plante. Aussi, la diversité de la composition des apports a une efficacité croissante sur l'activité microbienne (Falindirina, 2010) et peut restaurer la fertilité du sol d'une manière pérenne.

### **3.4 Motifs d'assemblages de MAFORS pour une innovation agronomique**

Les résultats de cette étude se concentrent dans la constitution de groupes fonctionnels et l'indication des meilleurs motifs d'assemblages scientifiques. Ces motifs d'assemblages ont surtout des valeurs écologiques. Mais à part la performance écologique, la considération de la performance agronomique est nécessaire pour l'aspect appliqué des résultats. C'est la raison pour laquelle le motif d'assemblage correspondant à la pratique paysanne a été située par rapport aux motifs d'assemblages scientifiques testés. Les motifs du modèle final ont été considérés puisque ce modèle résume les trois grandes fonctions de l'étude. Tandis que la pratique paysanne dominante qui ressort des enquêtes socio-économiques a été considérée : l'association fumier+ cendre de balle de riz. Comparées aux meilleurs assemblages scientifiques testés, les pratiques paysannes d'assemblages de MAFORS se basant sur une approche empirique présentent des effets faibles sur les trois fonctions. Une marge de progression serait probable dans cette pratique suite à l'observation des assemblages scientifiques. Les résultats de la recherche doivent ainsi être transférés au niveau paysan.

En prenant compte les aspects socio-économiques, des contraintes s'imposent sur l'application des résultats. Les mêmes résultats peuvent être obtenus sur le champ puisque l'efficacité des modèles a été testée. L'agriculteur à son tour peut choisir les assemblages de MAFORS en fonction de ces connaissances empiriques, des disponibilités des matières ou de leurs coûts. A partir des groupes fonctionnels proposés, il peut ainsi piocher les MAFORS qui lui convient à partir des contraintes citées précédemment. A partir de ces informations, une clé est alors fournie aux agronomes systèmes pour concevoir un système de culture avec des itinéraires techniques pour les paysans. L'hypothèse 3 qui stipule que les motifs d'assemblages et les groupes fonctionnels de MAFORS peuvent constituer un support théorique pour favoriser une innovation agronomique est donc vérifié.

### 3.5 Evaluation de l'étude

#### 3.4.1. Atouts et limites

Afin d'évaluer judicieusement l'étude réalisée y compris l'expérimentation, des soulèvements des points forts ou atouts étaient effectués suivies des points faibles ou limites.

- *Atouts de l'étude*

Les études précédentes effectuées sur les MAFORS ont surtout été basées sur leurs caractéristiques potentielles c'est-à-dire leurs interactions au contact du sol et leurs modes d'action. Les travaux de recherche de Rabetokotany en 2013 avaient pour objectif d'élaborer une typologie de MAFORS pour orienter leur valorisation agronomique et énergétique. Ils ont donc adopté une méthode de typologie multicritère à l'aide d'une prédiction par le SPIR suivi d'une évaluation multicritère pour classer les MAFORS selon les objectifs de l'orientation de recyclage. Le modèle est un modèle basé sur des approche *a priori* auxquels ils ont intégré les caractéristiques analytiques et potentielles des MAFORS suivi d'une attribution de scores selon ces caractères. Andrianaivonirina en 2011 a aussi fait des études sur la caractérisation MAFORS issues de l'élevage pour une valorisation optimale mais ces études se sont focalisées sur la minéralisation potentielle des MAFORS ainsi les orientations fournies se basaient sur ces approches. Rakotoarivelo en 2011 a aussi fait des études sur la caractérisation agronomique de MAFORS issues des déchets d'industries agricoles alimentaires et des déchets ménagers urbains et a sorti des classifications en trois groupes à partir des données de la minéralisation du carbone et de l'azote. Dans différents pays, plusieurs études ont été menées pour classer ou caractériser les MAFORS sans le moindre test avec une plante : Bernard *et al.* en 2009 et Kranet *et al.* en 2010.

L'originalité de cette étude se pose donc sur la mesure des effets des assemblages sur des plantes. Les MAFORS utilisées ont été caractérisées, les propriétés du sol avant et après l'expérimentation ont été analysées, même si des analyses sont encore en cours. Les plantes ont été observées puis elles ont été analysées pour voir leurs réponses sous l'effet des assemblages. Ces interventions nous permettent de procéder à une approche *a priori* en premier lieu mais surtout d'opter pour une approche *a posteriori* finalement.

Les résultats obtenus à partir du modèle sont fiables et robustes puisque différents tests sont effectués : test d'ajustement, test d'efficacité via la cross-validation et qui est un test d'apprentissage. Finalement, les résultats de cette étude serviront à développer un outil d'aide à la décision puisqu'elle offre une base de données sur les assemblages de MAFORS sous différents objectifs.

- *Limites de l'étude*

Vu que c'est la première expérimentation de prototypage réalisée dans l'unité de recherche, quelques améliorations techniques peuvent être effectuées. Concernant les doses apportées, une approche *a priori* a été adoptée pour choisir les doses d'apport : 6T/Ha pour les fertilisants organiques et 500 Kg/Ha pour les fertilisants minéraux. Pour la composition l'approche *a posteriori* a été adoptée. Un regroupement basé sur des concepts similaires aurait été nécessaire pour classer les MAFORS afin de décider les doses à apporter. Or, adopter une approche *a posteriori* avec les doses d'apport s'avère impossible. Des bornes doivent être fixées. Tout d'abord cela multiplierait le nombre de pots à tester et le modèle ne permet pas de classer les MAFORS avec différents critères variés (composition + dose). Donc, il est nécessaire de partir sur des bases socio-économiques pour avoir les « doses paysannes ». Les résultats seront ainsi transférables au niveau paysan.

A part les monocultures, des assemblages de MAFORS purement organiques ont été réalisés d'où la quantité apportée par pot a été triplée ( $6\text{T}/\text{Ha} \times 3 = 18\text{T}/\text{Ha}$ ). De ce fait, des surestimations des effets peuvent être considérées pour ces pots (au nombre de onze) si dans les autres pots, à part les monocultures, on ne retrouve qu'environ 7T/Ha de MAFORS [ $6\text{T}/\text{Ha} + (500\text{Kg} \times 2) = 7\text{T}/\text{Ha}$ ]. En guise de vérification, ces pots ont été supprimés de la base de données initiale afin d'observer les classifications des MAFORS dans le modèle final (IMT). Les GF obtenus n'ont pas changé. Par conséquent, la présence de ces pots n'était pas un facteur perturbant au niveau de la classification. Néanmoins, il serait intéressant que dans les prochains essais ces mêmes pots soient reconsidérés avec des doses plus faibles. Après l'acquisition des résultats, l'utilisateur pourrait donc choisir à sa convenance les pots (assemblages) qu'il veut introduire dans son modèle.

Faute de temps, les résultats sur les caractéristiques du sol (P échangeable) ne sont pas encore rassemblés d'où leur absence dans ce manuscrit ainsi que dans les résultats considérés.



### 3.4.2. Perspectives d'amélioration et recommandations

Les quelques remarques suivantes serviront d'amélioration pour les études à venir.

Premièrement, lors des futurs travaux de recherche sur les assemblages, la démarche la plus appropriée est d'avoir des doses fixes identiques aux doses paysannes. Les connaissances issues des enquêtes socio-économiques sont donc à considérer. Les meilleurs assemblages et les mauvais doivent être repris de façon à valider les résultats. Les fréquences d'utilisation des motifs d'assemblages pourraient être améliorées. Des MAFORS non testées peuvent être introduites à l'exemple des lisiers de porc. Un test avec différentes variétés serait aussi intéressant.

Deuxièmement, les résultats obtenus serviront de panel de référence pour les expérimentations aux champs. Ils doivent aider les agriculteurs et paysans à orienter leur choix d'assemblages. Les paysans peuvent bénéficier des classifications dans des GF en choisissant des MAFORS d'un même groupe qui ont les mêmes effets selon leurs objectifs. Si l'utilisateur veut des rendements en feuille, les assemblages qui favorisent la croissance et développement des plantes sont recommandés. Si l'utilisateur veut des rendements en grain, les assemblages optimisant la croissance des plantes sont nécessaire mais surtout les assemblages qui améliorent et stabilisent la fertilité du sol pour que les réserves puissent combler les besoins des plantes jusqu'à la fin du cycle.

Troisièmement, la gestion des ressources du sol est très importante pour des fins agronomiques. Les rendements récoltés ne sont pas les réussites d'une agriculture durable mais le plus important est le fait de maintenir la fertilité du sol. Si ce n'est pas encore le cas, la restauration de cette fertilité est prioritaire avant d'entreprendre des activités agricoles. Une grande partie de nos résultats peut servir à ce raisonnement en vue d'orienter les pratiques de fertilisation par des assemblages de MAFORS. Ces optiques rentrent dans le cadre de l'agroécologie.

Quatrièmement, après un deuxième essai de cette expérimentation sous des mêmes conditions contrôlées, des réalisations sur terrain sont nécessaires pour valider les résultats aux champs et surtout sur des sites et différentes régions.

# **CONCLUSION**

## CONCLUSION

Au final, dans le but de promouvoir la riziculture pluviale ; l'étude s'attache à fournir une réponse au problème de fertilité des sols de *Tanety*. Ainsi, une orientation de la fertilisation a été proposée afin d'apporter tous les éléments nécessaires pour la production : l'assemblage de MAFORS. Le but était alors de valoriser les MAFORS présentes dans les régions Itasy et Vakinankaratra dans lesquelles le projet SECURE est mis en œuvre.

Les effets des assemblages de trois MAFORS tirées au hasard ont été testés au niveau de la production végétale et de l'amélioration des propriétés du sol. Les classifications issues du modèle combinatoire de Jaillard ont donné des modèles robustes (biens ajustés et bien prédits). Le coefficient de robustesse  $E/R^2$  minimal obtenu était de 0,4 alors que le coefficient maximal obtenu a atteint 0,94. Les fonctions citées précédemment ont été bien expliquées par le modèle combinatoire.

La fonction de croissance est expliquée par 4 GFs alors que celle de la nutrition par 5GFs. La présence de la corne de zébu dans les assemblages améliore ces deux fonctions. Elle contribue aussi à l'amélioration du pH du sol. Riche en matières organiques et en azote, elle a le pouvoir de minéraliser lentement l'azote depuis ses réserves pour la rendre disponible pour la plante tout au long de son cycle. Les effets sont cumulés lors des assemblages avec diverses autres matières grâce aux synergies qui surviennent entre elles. La quantité d'éléments libérée dans la solution du sol augmente, les interactions entre les MAFORS qui ont leurs propres spécificités sont prononcées. Les différentes MAFORS classées dans différents GF sont complémentaires. Les réponses au niveau des plantes sont accélérées tout en alimentant les réserves du sol.

Les fumiers (améliorés et traditionnels), la poudrette de parc et le Taroka sont nécessaires dans les assemblages pour les fonctions écologiques du sol. Leur richesse en carbone organique ou matière organique alimente la microflore et la faune du sol. Leur association avec d'autres MAFORS riches en azote tels que la fiente, le Guanomad ou le NPK est indispensable. L'azote minéral de ces MAFORS vont nourrir les microorganismes du sol. Ces derniers vont décomposer les substances organiques des fumiers, de la poudrette de parc ou du Taroka. La minéralisation de ces substances organiques va alimenter la solution du sol en rendant disponible pour la plante divers éléments. Entre autres, les substances organiques non minéralisées vont être stockées dans le sol pour des utilisations antérieures. La capacité du sol à stocker des matières organiques permet d'avoir une durabilité de son pouvoir fertilisant

En tenant compte des pratiques paysannes qui associent les fumiers avec des cendres ; ce mode d'apport est favorable pour le sol. Des effets faibles sur la croissance des plantes peut être obtenus mais ne favorise pas autant la nutrition des plantes. A partir des résultats de cette étude (IMT), les agriculteurs peuvent choisir des MAFORS clefs contenus dans un groupe où leurs associations avec d'autres MAFORS habituels auront des réponses positives dans la production à long terme en tenant compte des contraintes socio-économiques.

Au final, cette étude a pu ouvrir une porte dans le domaine de la recherche scientifique puisqu'elle a permis de fermer la boucle des diverses études déjà effectuées sur les caractérisations des MAFORS à des fins agricoles en les testant avec des plantes. Elle servira d'aperçu pour les orientations de fertilisation selon les objectifs de l'utilisateur.

## BIBLIOGRAPHIE

**Andrianaivonirina R.M., 2011.** « Caractérisation des matières organiques exogènes issues de l'élevage par la minéralisation potentielle pour une valorisation optimale » Mémoire d'ingénieur, ESSA département Agriculture. 60p

**Andrianarimanana H. T., 2014.** « Caractérisation et amélioration de la qualité microbiologique et chimique du lombricompost pour favoriser le développement du haricot *Phaseolus vulgaris* » Mémoire de DEA en sciences de la vie Option : Biotechnologie-Microbiologie, Faculté des Sciences Naturelles, 72p.

**Angers D.A. et S. Recous. 1997.** « Decomposition of wheat straw and rye residues as affected by particle size », *Plant and Soil* 189 (2). P197-203

**Balesdent J. C., Chenu and M. Balabane, 2000.** « Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage » *Soil & Tillage Research*. P 215-230

**Ballot C.S., Semballa S., Atakpama W., Yangakola T.M., Doubro Bo-Mbi A., Blavet D., Zinga I., Wala K., Batawila K. et Akpagana K., 2016.** « Effet de fumures minérales sur le rendement et la qualité organoleptique du manioc (*Manihot Esculenta crantz*) dans la zone de savane au centre-sud de Centrafrique ». *European Scientific Journal*, 12, 185-211

**Barantal S., Roy J., Fromin N., Heidy S., Hättenschwiler S., 2011.** « Long-term presence of tree species but not chemical diversity affect litter mixture effects on decomposition in a neotropical », *ecosystem ecology*, 13p

**Bernard M.P., Albuquerque J. et Moral R., 2009.** « Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment ». *Bioresource Technology*, 100p

**Blanchart E., et Jouquet P., 2012.** « Rôle des vers de terre et des termites pour la restauration de la productivité des sols en milieux tropicaux ».

**Breman H., & Debrah S.K., 1999.** « Agricultural intensification within sustainable production systems », *Soil Fertility Initiative for Sub-Saharan Africa* , *Proceedings SFI/FAO Consultation*, pp.54-55, *World Soil Resources Reports 85*, FAO, Rome

**Caccia M., Nardo L., Santoro R., Schaffhauser D., 2019,** « Silicon Photomultipliers and SPAD imagers in biophotonics: Advances and perspectives », *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A 926, 101-117

**Chabaliier P., Van Der Kerchove V. et Saint Macary H., 2006.** « Guide de la fertilisation organique à La Réunion. Saint Denis ». Cirad, Chambre d'Agriculture de La Réunion.

- Corbeels M. A.**, O'Connell M., Grove T.S., Mendham D.S. and Rance S.J., **2003**. « Nitrogen release from eucalypt leaves and legume residues as influenced by their biochemical quality and degree of contact with soil ». *Plant and Soil* 250p : 15-28
- Dumas T.**, **1984**. « Determination of carbon dioxide at the ppm level: a statistical comparison of a single-filament and a four-filament thermal conductivity detector », *Journal of Chromatography A*, 299,432-435
- Falinirina, M. V.**, **2010**. « Valorisation agricole des apports organiques contenus dans les déchets urbains : Qualité des matières organiques et service écosystémique »: IRD, LRI, UMR-Eco&SOIs, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques.
- FAO, PAM**, **2013**. Mission FAO/PAM d'évaluation de la sécurité alimentaire à Madagascar. Rapport spécial. 75p
- Fontaine S.**, Mariotti A. et Abbadie, L., **2003**. « The priming effect of organic matter: a question of microbial competition ». *Soil Biology and Biochemistry*, p. 837-843.
- Hermann A.** et Witter, E., **2002**. « Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils ». *Soil Biology and Biochemistry*,
- Jaillard B., Deleporte P.**, Loreau M., & Violle C., **2018**. «A combinatorial analysis using observational data identifies species that govern ecosystem functioning». *PloS one*, 13(8), e0201135.
- Jaillard B., Richon C.**, Deleporte P., Loreau M., & Violle, C., **2018**. «An a posteriori species clustering for quantifying the effects of species interactions on ecosystem functioning». *Methods in Ecology and Evolution*, 9(3), 704-715.
- Kranet M.**, Gottschall R., Bruns C. et Hafner G., **2010**. « Energy or compost from green waste? A CO<sub>2</sub> based assessment » *Waste Management* 30p
- Murphy J.** and Riley J.P., **1962**, «A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters» *Analytica chimica acta*
- Olsen S.R.**, **1954**. « Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate ». *USDA Circ. 939*. USDA, Washington, DC.
- Palm C.A.**, Myers R.K. et Nandwa S.M, **1997**. « Combined use of organic and inorganic nutrient sources for soil fertility maintenance and replenishment ». *Replenishing soil fertility in Africa*, Special publication. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Vol. 55, p 193-213.
- Pande H.K.**, Tran D.V. et That T.T, **1997**. « Systèmes améliorés de riziculture pluviale ». *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. 93p

**Rabeharisoa L., 2004.** « Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des hautes terres de Madagascar ». Thèse de Doctorat d'état de l'Université d'Antananarivo, spécialité : Science de Sol. 202 pp

**Rabetokontany R.N., 2013.** « Matières organiques exogènes issues de l'élevage et de la ville en milieu tropical : Apport de la spectrométrie proche infrarouge pour leur orientation d'usage agronomique et/ou énergétique ». Thèse en Sciences, ESPA, Département génie chimie, 256p.

**Raboin L.M., Ramanantsoaniririna A., Dzido J.L., Radanielina T., Tharreau D., Dusserre J. et Ahmadi N., 2013.** Création variétale pour la riziculture d'altitude à Madagascar : bilan de 25 années de sélection. Cahiers Agriculture n°5, 22, 64-73

**Raharinosy R.V, 1983.** « Etude de l'influence des différentes doses de fumier sur la libération du phosphore d'un sol ferrallitique de Madagascar ». Cahier ORSTOM. 1983. Vol. XX, p129-146.

**Rakotoarivelo N. F., 2011.** « Caractérisation agronomique des matières organiques exogènes issues des déchets d'industries agricoles alimentaires et des déchets ménagers urbains par l'étude de la minéralisation du carbone et de l'azote ». Mémoire d'ingénieur en Science Agronomique, ESSA, 71p.

**Rakotoson Tovohery, 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, ESSA, Département Agriculture, 41p

**Sanchez P.A., Shepherd K, Soule M., Place F, Bruesh, R., Izac A, Mokwunye A, Kwesiga F, Ndiritu C, Woome P., 1997.** « Soil fertility replenishment and investment in natural resource capital ». Replenishment soil fertility in Africa. SSSA Special publication, 51p

**Segalen, P., 1995.** « Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique ». Mém. In. Rech. Sci. Madagascar. P 561-565

**Steven R., Garrity, Lee A. Vierling, Keith B., 2010.** « A simple filtered photodiode instrument for continuous measurement of narrowband NDVI and PRI over vegetated canopies », Agricultural and Forest Meteorology 150 (2010) 489–496

**Subba Rao A., 1997.** « Malachite Green Method Compared to Ascorbic Acid for Estimating Small Amounts of Phosphorus in Water, 0.01M Calcium Chloride, and Olsen Soil Extracts » ; COMMUN. SOIL SCI. PLANT ANAL., 28(6-8), 589-601.

**Velasqueza E., Lavelle P., Andrade M., 2007.** « GISQ, a multifunctional indicator of soil quality », Soil Biology & Biochemistry 39, 3066–3080.

## **ANNEXE**

### **LISTE DES ANNEXES**

Annexe 1 : Cadre de l'étude .....	I
Annexe 2 : Caractéristiques et classification <i>a priori</i> des MAFORS .....	I
Annexe 3 : Modèles combinatoires de chaque fonction étudiée .....	V



## **Annexe 1 : Cadre de l'étude**

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet **SECURE** (Soil ECological fUnction REstoration) ou « Restauration des fonctions écologiques du sol pour augmenter les services agrosystémiques dans les systèmes rizicoles pluviaux en transition agroécologique ». Ce projet est financé par Agropolis Fondation et a une durée de deux ans et demi (juin 2017- décembre 2019). L'objectif du projet est de fournir des pratiques de restauration des fonctions du sol (SFR) basées sur les connaissances locales et scientifiques, de façon à accroître la performance agronomique, socio-économique et écologique des systèmes agroécologiques, en contexte tropical. Le projet est basé sur un consortium multidisciplinaire localisé à Madagascar. Les participants au projet SECURE sont rattachés à des institutions françaises et malgaches à savoir : l'Université d'Antananarivo (représentée par le LRI et l'ESSA), le FOFIFA, le CIRAD et l'IRD. Deux sites d'étude se différenciant par leur type de sol, leur climat et leurs pratiques agricoles sont considérés: la région d'Imerintsiatosika près d'Antananarivo et le Moyen-Ouest du Vakinankaratra. Les travaux sont divisés en cinq tâches de travail ou Work Package (WP) selon les participants:

**WP1:** Connaissances des agriculteurs locaux sur la restauration des fonctions des sols (FOFIFA &, Cirad Aida)

**WP2 :** Connaissances scientifiques sur la restauration des fonctions des sols (FOFIFA, IRD et LRI)

**WP3 :** Essais sur le terrain de restauration de la fonction des sols (LRI &, Cirad Selmet)

**WP4 :** Evaluation de la restauration des fonctions des sols (IRD & FOFIFA)

**WP5 :** Mise en réseau, co-apprentissage et diffusion des connaissances sur la restauration des fonctions des sols (Cirad & Montpellier SupAgro).

La présente étude est située dans le WP2, ayant comme site de référence celui d'Imerintsiatosika. Des travaux d'analyses de sols ainsi que des expérimentations soustractives d'éléments nutritifs dans le sol ont été déjà réalisés dans ce WP avant cette expérimentation sur les matières fertilisantes organo-minérales.

### *Logo du projet et de l'investisseur*



**Annexe 2 : Caractéristiques et classification à priori des MAFORS**

Les caractéristiques potentielles et analytiques des MAFORS sont rassemblées dans le tableau suivant

*Tableau 7 : Caractéristiques des MAFORS*

<b>Matières</b>	<b>C%</b>	<b>N %</b>	<b>P%</b>	<b>K%</b>	<b>Ca %</b>	<b>Mg %</b>	<b>MO %</b>
<b>FumS</b>	19.51	1.46	0.35	0.37	0.36	0.30	40.22
<b>FumA</b>	21.97	1.69	0.29	1.99	1.07	0.33	44.66
<b>MC</b>	16.62	1.36	0.47	0.53	4.40	0.91	35.00
<b>CZ</b>	46.04	15.50	0.12	0.05	0.34	0.04	88.14
<b>VC4</b>	11.24	0.97	0.18	0.32	0.50	0.24	25.27
<b>TATA</b>	23.13	2.00	0.37	1.71	0.76	0.38	46.76
<b>Ter</b>	11.29	0.60	0.37	0.26	0.90	0.19	25.38
<b>Tar</b>	7.15	0.41	0.38	0.48	2.83	0.29	17.90
<b>PP</b>	14.05	1.03	0.16	0.69	0.36	0.26	30.35
<b>FarC</b>	19.50	2.39	1.20	0.35	11.73	1.40	40.20
<b>CB</b>	3.17	0.19	0.12	0.69	0.16	0.08	10.70
<b>CE</b>	6.35	0.05	3.91	8.45	8.44	2.21	16.45
<b>Fie</b>	18.30	2.67	2.55	2.15	3.26	0.70	38.03
<b>Gua</b>	4.46	1.26	6.85	0.22	6.17	0.44	13.04
<b>HYP</b>	0.34	0.04	8.29	0.03	7.92	0.17	5.59
<b>Matières</b>	<b>pH eau</b>	<b>Solubles</b>	<b>Hemicellulose</b>	<b>Cellulose</b>	<b>Lignine</b>	<b>LIC</b>	
<b>FumS</b>	7.56	28.06	0.65	52.74	15.61	0.23	
<b>FumA</b>	9.40	20.87	2.99	54.40	19.66	0.26	
<b>MC</b>	8.12	26.66	4.72	55.19	13.43	0.18	
<b>CZ</b>	5.85	3.95	2.72	11.16	82.17	0.86	
<b>VC4</b>	7.15	13.49	3.68	69.48	12.32	0.14	
<b>TATA</b>	8.10	24.48	6.35	46.26	22.91	0.30	
<b>Ter</b>	7.81	29.21	1.69	59.52	9.58	0.14	
<b>Tar</b>	8.04	29.61	7.41	50.76	12.21	0.17	
<b>PP</b>	8.65	13.79	11.43	56.20	18.57	0.22	
<b>FarC</b>	8.98	66.20	12.96	17.43	3.41	0.10	
<b>CB</b>	7.72	8.14	0.96	85.95	4.95	0.05	
<b>CE</b>	11.15	43.18	16.93	19.12	20.77	0.37	
<b>Fie</b>	6.03	58.43	9.11	19.62	7.01	0.20	
<b>Gua</b>	6.38	82.19	9.62	7.76	0.43	0.02	
<b>HYP</b>	7.85	18.29	44.90	34.85	1.97	0.02	

En rassemblant les données potentielles et données analytiques des MAFORS, une analyse des composantes principales (ACP) a été effectuée avec le logiciel R. Seuls les deux premiers axes (F1 et F2) ont été retenus pour interpréter les résultats. Le pourcentage cumulé de ces deux axes est de 68,3% dont 43,2% des informations sont portés par l'axe F1 et 25,1% par l'axe F2. Les deux figures suivantes illustrent la dispersion des variables et des individus sur ces deux axes.

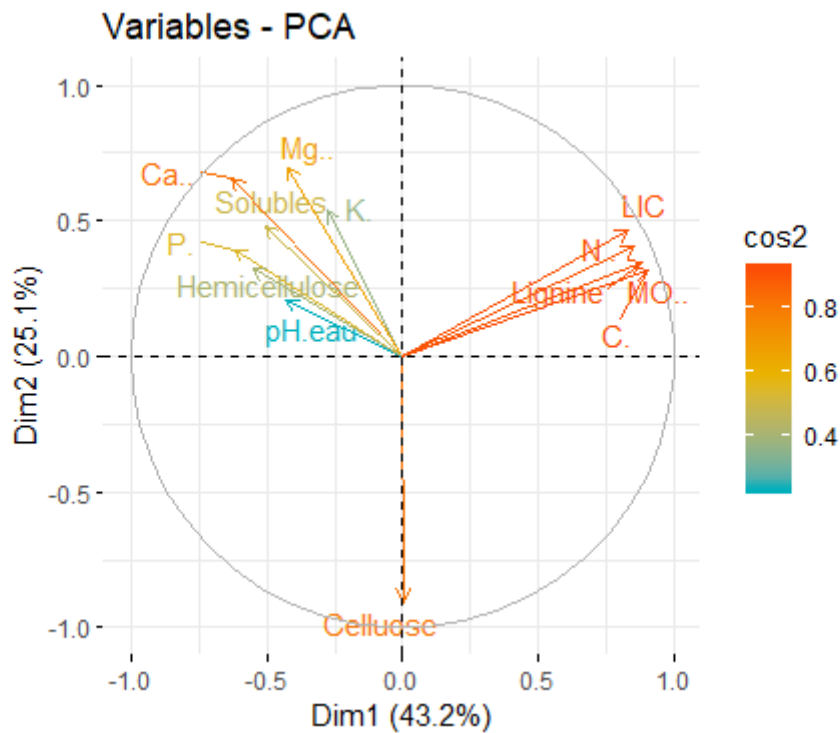


Figure 11 : Cercle de corrélation caractéristiques des matières

Les variables qui ont contribué à la construction de l'axe F1 sont : le Calcium et le Magnésium (+) et la cellulose (-). Celles qui ont contribué à la construction de F2 sont : la lignine et LIC, la quantité de carbone (C) et d'azote (N) et de la matière organique (MO).

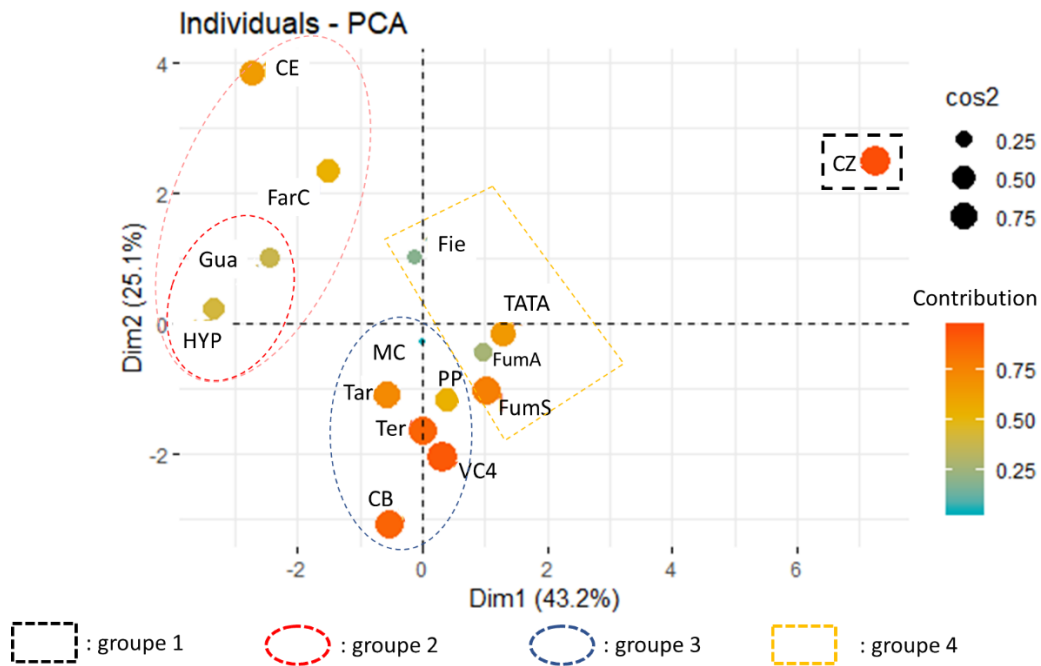


Figure 12 : Graphe des individus

Les individus ont été divisés en quatre groupes selon leur dispersion. La corne de zébu se distingue des autres MAFORS en contribuant fortement sur l'axe F1. Cette matière a donc des teneurs en C et N, de MO et de lignine différents (plus élevés) aux autres. Le deuxième groupe est composé du : HYP, Gua, FarC et CE qui sont des MAFORS commerciales riche en phosphore (P), de cations (Ca et Mg) ou des substances solubles. Le troisième groupe est formée par l'assemblage de : Fie, FumA, FumS et TATA qui sont plutôt des MAFORS paysannes qui peuvent être riche en matières organiques qui ne sont pas encore disponibles pour la plante. Le quatrième groupe est celui qui est corrélé négativement avec l'axe F2 composé par des MAFORS riches en cellulose à savoir : MC, PP, Tar, Ter, VC4 et CB. Ces matières sont donc riches en substance.

**Annexe 3 : Modèles combinatoires de chaque fonction étudiée**

Les résultats sur les modèles de la croissance des plantes sont résumés dans le tableau suivant

Tableau 8 : Modèles combinatoires de la croissance des plantes

	<b>BA</b>	<b>BR</b>	<b>Sh/R</b>	<b>BT</b>	<b>Hauteurs</b>	<b>Nb_feuilles</b>
<b>Modèle_choisi</b>	Red	Red	Cor_Red	Cor_Red	Cor_Red	Cor_Red
<b>Nbr de pots</b>	147	147	144	144	146	144
<b>R<sup>2</sup></b>	0.847	0.537	0.472	0.588	0.733	0.648
<b>E</b>	0.692	0.308	0.195	0.416	0.608	0.393
<b>E/R<sup>2</sup></b>	0.817	0.573	0.412	0.708	0.83	0.606
<b>Predicting Clusters</b>	130/130	130/130	127/127	127/127	129/129	127/127
	4	3	3	3	3	3
<b>a</b>	{ CZ }	{ FumA }	{ CZ, Tar }	{ CZ }	{ CZ, FumA }	{ CZ }
<b>b</b>	{ FumA, FumS }	{ FarC, FumS, Gua, HYP, MC, NPK, PP, Tar, TATA, VC4 }	{ Dol, Fie, FumA, HYP, NPK, VC4 }	{ FumA }	{ CE, FarC, Fie, Gua, Tar, TATA }	{ CB, Dol, HYP, MC, TATA, Ter }
<b>c</b>	{ FarC, HYP, MC, NPK, TATA }	{ CB, CE, CZ, Dol, Fie, Ter }	{ CB, CE, FarC, FumS, Gua, MC, PP, TATA, Ter }	{ CB, CE, FarC, Fie, FumS, Gua, HYP, MC, NPK, PP, Tar, TATA, Ter, VC4 }	{ CB, Dol, FumS, HYP, MC, NPK, PP, Ter, VC4 }	{ CE, FarC, Fie, FumA, FumS, Gua, NPK, PP, Tar, VC4 }
<b>d</b>	{ CB, CE, Dol, Fie, Gua, PP, Tar, Ter, VC4 }					
<b>3_best_ass</b>	abd (3) abc (1) ad (6)	ac (5) ab (4) abc (11)	ab (8) b (6) ac (8)	abc (3) bc (16)	ab (7) ac (10) abc (17)	ac (4) abc (10) c (17)
<b>3_worst_ass</b>	c (4) ac (2) d (20)	c (8) b (19) bc (83)	c (21) abc (13) bc (71)	ac (13) c (95)	c (18) b (5) bc (72)	bc (88) ab (2) b (6)

Les modèles combinatoires sur la nutrition des plantes sont détaillés dans le tableau suivant

Tableau 9 : Modèles combinatoires de la nutrition des biomasses aériennes

	<b>Biomasses aériennes</b>				
	<b>Sh_N</b>	<b>Sh_P</b>	<b>Sh_Ca</b>	<b>Sh_Mg</b>	<b>Sh_K</b>
<b>Nbr de pots</b>	144	143	144	144	143
<b>R<sup>2</sup></b>	0.898	0.826	0.835	0.691	0.679
<b>E</b>	0.563	0.722	0.566	0.564	0.41
<b>E/R<sup>2</sup></b>	0.626	0.875	0.679	0.816	0.604
<b>Predicting Clusters</b>	127/127	126/126	127/127	127/127	126/126
	4	4	5	3	3
<b>a</b>	{ CZ }	{ FumA, FumS }	{ CZ, MC }	{ CZ }	{ CZ }
<b>b</b>	{ FumA, HYP, FarC, NPK, Tar }	{ HYP, NPK }	{ FarC, HYP, NPK, Ter }	{ Fie, Ter }	{ CE, FumA, FumS, MC, PP, Tar }
<b>c</b>	{ Dol, Fie, MC, PP }	{ FarC, Fie, Gua, MC, PP }	{ Gua, TATA }	{ CB, CE, Dol, FarC, FumA, FumS, Gua, HYP, MC, NPK, PP, Tar, TATA, VC4 }	{ CB, Dol, FarC, Fie, Gua, HYP, NPK, TATA, Ter, VC4 }
<b>d</b>	{ CB, FumS, VC4, CE, Gua, TATA, Ter }	{ CB, CE, CZ, Dol, Tar, TATA, Ter, VC4 }	{ Fie, FumA }		
<b>e</b>			{ CB, CE, Dol, FumS, PP, Tar, VC4 }		
<b>3_best_ass</b>	abd (4) acd (1) ad (2)	ad (7) ac (4) acd (12)	abc (2) ade (6) acd (1)	abc (3) ac (13)	ab (1) abc (3) bc (73)
<b>3_worst_ass</b>	db (3) d (8) acb (1)	d (8) bcd (13) bd (17)	de (13) be (24) e (4)	c (74) bc (37)	b (2) c (36) ac (11)

Tableau 50 : Modèles combinatoires de la nutrition des biomasses racinaires

	<b>Biomasses racinaires</b>				
	<b>R_N</b>	<b>R_P</b>	<b>R_Ca</b>	<b>R_Mg</b>	<b>R_K</b>
<b>Nbr de pots</b>	144	144	142	144	143
<b>R<sup>2</sup></b>	0.921	0.241	0.773	0.722	0.603
<b>E</b>	0.754	0.0921	0.479	0.586	0.286
<b>E/R<sup>2</sup></b>	0.818	0.381	0.619	0.812	0.474
<b>Predicting Clusters</b>	127/127	127/127	125/125	128/128	126/126
	5	2	5	3	4
<b>a</b>	{ CZ }	{ FumA }	{ CZ, Fie, MC }	{ FumA }	{ FumA, FumS, VC4 }
<b>b</b>	{ CB, CE, FumA, Tar }	{ CB, CE, CZ, Dol, FarC, Fie, FumS, Gua, HYP, MC, NPK, PP, Tar, TATA, Ter, VC4 }	{ FarC, TATA }	{ CE, FarC, Fie, TATA }	{ CE, Dol, Fie, Ter }
<b>c</b>	{ FarC, Fie, NPK }		{ Dol, VC4 }	{ CB, CZ, Dol, FumS, Gua, HYP, MC, NPK, PP, Tar, Ter, VC4 }	{ CB, Gua, MC, TATA }
<b>d</b>	{ Dol, Ter, VC4 }		{ CE, FumA, Gua }		{ CZ, FarC, HYP, NPK, PP, Tar }
<b>e</b>	{ FumS, Gua, HYP, MC, PP, TATA }		{ CB, FumS, HYP, NPK, PP, Tar, Ter }		
<b>3_best_ass</b>	abc (2) abd (2) ab (2)	ab (18)	abc (2) acd (6) bde (10)	abc (7) ab (2) ac (9)	ab (5) abc (9) ac (4)
<b>3_worst_ass</b>	be (15) de (13) ade (1)	b (109)	de (9) e (5) ce (10)	bc (68) b (2) c (40)	c (2) bd (18) d (2)