



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
Ecole Doctorale Agriculture, Elevage et
Environnement



THESE

Pour l'obtention du Diplôme de **Doctorat en Sciences Agronomiques**

***Conception d'assemblages complexes de matières
fertilisantes organiques et minérales pour accroître la
fertilité des Ferralsols des Hautes Terres de
Madagascar***

Par

Manoa Arifetra RAMINOARISON

Soutenue le 01 Juillet 2021 devant le jury composé de

Lilia RABEHARISOA	Professeur titulaire ESSA-Université d'Antananarivo	Président du jury
Andry ANDRIAMANANJARA	Docteur HDR LRI-Université d'Antananarivo	Rapporteur
Sabine HOUOT	Docteur HDR UMR ECOSYS - INRA Grignon	Rapporteur
Harilala ANDRIAMANIRAKA	Professeur ESSA-Université d'Antananarivo	Examineur
Laurent THURIES	Docteur HDR UR Recyclage et Risque- CIRAD Saint-Denis	Examineur
Tantely RAZAFIMBELO	Professeur titulaire LRI-Université d'Antananarivo	Directeur de thèse
Eric BLANCHART	Docteur HDR UMR Eco&Sols - IRD Montpellier	Co-directeur de thèse
Jean TRAP	Docteur UMR Eco&Sols - IRD Montpellier	Encadrant



*“Hidera Anao aho; fa ...
mahatalanjona ny nanaovanao ahy;
Mahagaga ny asanao” Salamo 139, 14^a*

REMERCIEMENTS

Me voici à terme de ce travail ! Si je décris en quelques mots, ces trois années furent une riche aventure, à la fois professionnelle et personnelle, qui m'ont permis de découvrir davantage le monde merveilleux de la recherche, de m'épanouir et de me redécouvrir autrement. Sûrement, ces années vont me marquer à vie ;)

A travers ces quelques lignes, je tiens à exprimer mes vives et sincères reconnaissances à toutes les personnes et entités, qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce travail et sans qui il m'aurait autrement plus ardu de réaliser cette thèse.

La thèse s'insère dans le cadre du projet **SECuRE** (financé par Agropolis Fondation et coordonné par **Eric BLANCHART**), et a été soutenue financièrement par le projet. Elle a également obtenu une bourse de mobilité (Bourse du Gouvernement Français) octroyée par le gouvernement Français en 2019.

Mes profondes gratitude s'adressent :

- A l'encontre de mes directeur et co-directeur de thèse : **Tantely RAZAFIMBELO** et **Eric BLANCHART**. Merci pour vos riches implications, vos directives et vos enseignements que vous m'avez dispensés.
- A mon encadrant : **Jean TRAP**. Merci infiniment pour ces précieux encadrements et ces rigueurs que tu m'as transmis et surtout pour ton investissement permanent. Tu as toujours su trouver les solutions quand je suis dans le doute. C'était plaisant de discuter avec toi et on en sort toujours plus déterminée qu'avant.

Un immense merci à vous trois pour m'avoir accordé une si grande confiance, pour m'avoir choisi pour un projet si captivant, d'avoir su me motiver et m'encourager tout au long de ce travail. Vos qualités humaines m'impressionnent et j'en suis profondément reconnaissante. Je ne saurai jamais vous remercier assez !

Je souhaite également remercier :

- **Christian MOREL** qui m'a chaleureusement accueillie et a accepté de m'encadrer lors de mon séjour en France. Merci Christian pour ces conseils toujours pertinents et de votre rigueur scientifique qui m'ont richement aidée à m'améliorer dans la concrétisation de ma thèse. Merci également pour votre générosité, de m'avoir fait découvrir un des plus beaux lieux touristiques d'Europe; ce fut un grand privilège.
- **Benoît JAILLARD** pour votre sens de partage exemplaire et d'avoir accepté d'être importuné à chaque fois que je me trouve en difficultés avec le fameux modèle. Analyse combinatoire. Approche *a posteriori*. Motifs d'assemblages. Groupes fonctionnels. Ces

termes tellement nouveaux pour moi font partie des décors de ma thèse, et désormais de ma carrière scientifique.

- Les membres de jury d'avoir voulu ausculter cette thèse malgré vos nombreuses et précieuses occupations. J'adresse donc mes remerciements à **Lilia RABEHARISOA** d'avoir accepté de présider le jury, à **Andry ANDRIAMANANJARA** et **Sabine HOUOT** d'avoir consacré de leur temps en étant rapporteurs de cette thèse, à **Harilala ANDRIMANIRAKA** et **Laurent THURIES** qui ont voulu minutieusement examiner ce travail.
- Tous les membres du comité de pilotage composé de **Dominique MASSE**, **Tovonarivo RAFOLISY**, **Hervé SAINT-MACARY** et **Christian MOREL**, vous avez été de bon conseil et avez porté la réflexion à un autre niveau, merci pour vos apports respectifs.

Mes remerciements s'adressent également aux responsables des deux Laboratoires qui m'ont accueilli, le Laboratoire des Radio Isotopes/ Antananarivo et le Laboratoire INRA/Bordeaux. Merci à tous les Chercheurs, les Techniciens et les Responsables administratifs qui à un moment ou un autre m'ont donné leur appui, et dont je cite particulièrement **Damase RAZAFIMAHAFALY** et Feu **Modeste RAKOTONDRAMANANA** pour leur aide infaillible au laboratoire et lors des descentes sur terrain; **Tovohery RAKOTOSON** pour ses apports dans la rédaction de notre premier article; **Marie-Paule RAZAFIMANANTSOA** pour la vérification de nos résultats en laboratoire; **Coralie CRESSERON** qui m'a été d'une aide particulière dans la manipulation des éléments radio-isotopes et qui m'a transmise une certaine rigueur technique.

Je remercie également mes aînés doctorants, dont je cite spécialement **Onja** pour sa grande empathie, **Ravaka** pour son sens de partage et **Kanto** pour sa rigueur.

Je ne saurais oublier les stagiaires en M2 qui ont réalisés leurs Mémoires de fin d'études dans le cadre de cette thèse : **Sandrine RAKOTOARIMALALA**, **Nancia ANDRIAMANTENA**, **Sarobidy RAKOTORAHALAHY** et **Koloïna RAHAJAHARILAZA**. Un clin d'œil spécial à Koloïna.

Mes remerciements vont également à **Solofo** qui nous a été d'une grande aide au cours des expériences aux champs, aux **personnels administratifs de l'IRD** pour l'organisation des descentes et **aux chauffeurs** qui ont ambiancé nos moments passés sur terrain.

Un petit mot à toutes les **Professeures**, **Docteures** et **Doctorantes** du LRI, femmes et mères, vous êtes des modèles exemplaires et je suis tellement honorée d'avoir fait vos connaissances.

A la team Doctorants A2E 'Mamay sy Mandoro' accueillis au LRI, **Angéline**, **Sariaka**, **Noelly**, **Roberta**, **Toavina**, **Rinasoa**, **Hoby**, **Bruce** et **Ismaël**. Un immense merci pour notre cohésion, pour ces discussions où on parle de tout et de rien, pour ces vendredis détente autour d'un bon plat (Miam !!!), pour ces fous rires. Je vous souhaite à toutes et à tous courage et réussite !

J'adresse un clin d'œil particulier à mes **chères amies** et à leurs compagnons respectifs. Merci pour ces moments de détente autour d'un bon vin et ces escapades de rafraîchissement. Merci de me rappeler qu'il n'y a pas que la thèse et le travail dans la vie. Cheers!

Merci à la famille **RAZAFIMAHATRATRA**, qui a toujours été présente et qui répondait constamment à nos appels. Quelle chance, plutôt quelle bénédiction, d'être une des vôtres !

Je remercie bien évidemment et profondément mes parents d'avoir fait de moi ce que je suis aujourd'hui. **Dada** et **Neny**, merci pour votre soutien inégalé, votre amour inconditionnel et votre confiance dans toutes mes décisions. Un grand merci à mes frères **Joro** et **Jina** pour leurs appuis et leurs encouragements, merci d'être des tontons adorables.

Un merci, aussi distingué que le concerné, s'adresse à mon mari, **Hery RAZAFIMAHATRATRA**, pour son soutien attentif au quotidien durant toutes ces longues années. A mes deux bouts de chou, **Nathan** et **Aryan**, qui me motivent chaque jour à être le meilleur de moi-même. Merci mes amours pour toutes ces fois où vous aviez dû supporter mes stress et mes énervements, merci pour vos sacrifices. Vous trois êtes ma source d'inspiration ; à vous, je dédie cette thèse.

Manoa Arifetra

RESUME

L'objectif de cette thèse est de proposer une stratégie innovante de méthode d'assemblages de matières fertilisantes (MF) pour accroître la fertilité des sols des Hautes Terres de Madagascar destinés à la riziculture pluviale. Il s'agit de combiner deux approches conceptuellement différentes mais complémentaires : les approches de typologie *a priori* et *a posteriori*. L'approche *a posteriori* offre une classification des matières fertilisantes basée sur les effets d'interaction réellement observés, tandis que les informations *a priori* des matières fertilisantes sont utilisées pour formuler les explications des résultats issus de la classification *a posteriori*. Les objectifs spécifiques sont (i) d'identifier et d'hierarchiser les éléments nutritifs les plus limitants des Ferralsols des Hautes Terres, (ii) de caractériser les matières à l'aide d'analyses physicochimiques standard en laboratoire et des essais spécifiques, et (iii) d'établir par approche *a posteriori*, une typologie des matières possédant les mêmes réponses afin d'identifier les assemblages performants. A l'aide d'un essai soustractif, le phosphore (P) constitue le premier facteur limitant la productivité des Ferralsols des Hautes Terres. La perte de la production en biomasse du riz en absence du P peut aller jusqu'à 97% par rapport à une fertilisation adéquate. L'azote (N), le calcium et le magnésium agissent comme le second facteur limitant la productivité du riz, mais leurs disponibilités dans le sol varient en fonction de la pédogénèse. Le modèle combinatoire a été utilisé pour la typologie *a posteriori* des MF. Une centaine d'assemblages de MF composés de trois types de MF ont été testés; à la fin de l'expérience, les réponses des assemblages sur la croissance de la plante et sur les paramètres du sol ont été mesurées. Le modèle classe ensuite les MF dans des groupes fonctionnels (GF). Les MF appartenant aux mêmes GF possèdent les mêmes réponses, quand elles sont en assemblages, sur une fonction étudiée. Apportée à 6T matières sèches ha⁻¹ quels que soit les assemblages, la présence de la corne de zébu, à forte valeur à la fois amendante et fertilisante azotée, induit les performances les plus élevées en termes de production en biomasse et de nutrition des plantes. Les matières appartenant à d'autres GF, telles que la fiente de chauve-souris et la cendre d'*Eucalyptus*, sont par la suite indispensables pour combler les autres carences. A partir d'une calibration de la dose d'apport à la même masse totale, l'ajout dans un assemblage, d'un GF des matières fabriquées à base de déjections animales [fumiers ou (lombricomposts)], avec un GF des matières capables de fournir immédiatement des nutriments (fiente de volailles ou lisier de porc), renforce la production en grains du riz. Les fumiers et leurs dérivés sont nécessaires pour apporter du carbone au sol, de fournir de l'N tout au long du développement du riz et de modifier les propriétés du sol susceptibles d'améliorer la phytodisponibilité en P. Par ailleurs, dans ces conditions de calibration, la capacité individuelle des matières constitutives d'un assemblage influence grandement la performance des assemblages. Cette étude, qui est une approche exploratoire, suggère ainsi un nouveau cadre de fertilisation grâce aux GF formés permettant d'offrir un large choix d'assemblages performants adaptés aux contextes des agriculteurs des Hautes Terres de Madagascar.

Mots clés : analyse combinatoire, fertilité des Ferralsols, phosphore phytodisponible, amendements organiques, engrais, fertilisation.

ABSTRACT

The current thesis aims to provide innovative method strategy to assembly organic and/or mineral fertilizer resources (OMR) in order to increase soil fertility in the rainfed rice system of Malagasy Highlands. The method consists in combination of two complementary but conceptually different approaches: an *a priori* and a *a posteriori* typology approaches. The *a posteriori* approach cluster OMR based on observed effects of OMR interactions, while the *a priori* knowledge of OMR qualities offer an explanatory hypothesis of the *a posteriori* clustering results. The specific objectives are (i) to identify and rank the nutrients limiting on Ferralsols of Central Madagascar, (ii) to characterizes OMR in order to known their physical and chemical properties and (iii) to elaborate a typology build with *a posteriori* approach to identify the performing assemblages. Nutrient omission trial showed that phosphorus (P) is the most limiting nutrients in Ferralsols of Malagasy Highland. An average loss of approximately 97% of shoot dry mass under P omission was identified in comparison with the adequate fertilization level treatment. Nitrogen (N), calcium (Ca) and magnesium (Mg) limited also plant growth but their limiting effects depend on soil origin and pedogenesis. A combinatorial model was carried out to elaborate on *a posteriori* clustering of OMR. A hundred OMR assemblies composed by three types of products were tested; at the end of experiences, assembly responses related to plant growth and soil parameters were measured. The model cluster then the OMR into functional groups. OMRs that belong to the same functional group display similar response in assemblage, on a given response. At a rate of 6 T dry matter ha⁻¹ whatever the assemblages, presence of zebu horn, with high amendment and nitrogen fertilizer values, exhibited the higher performances in terms of plant biomass and nutrition. Products belonging to other functional group such bat guano droppings and *Eucalyptus* ash were then required to alleviate the other nutrient deficiencies. From a calibration dose at the same total dry mass, assemblage of OMR functional group manufactured from animal dejections [manures or (vermi)composts] with OMR functional group characterized by rapidly nutrient release (poultry droppings or pig manures) induce positive effect on rice grain yield. Animal manures and their by-products are essentials to build up soil organic carbon, to release diffusively mineral N and to modifies soil properties susceptible to ameliorate P phytoavailability. Besides, under these calibration dose conditions, the individual capacity of the constituent materials within the assemblage affect significantly the assemblage performances. This study, which is an exploratory approach, thus suggest a new framework of fertilization thanks to functional groups, making it possible to offer a wide choice of performing assemblages adapted to the contexts of farmers in the Highlands of Madagascar.

Keywords: combinatorial analysis, Ferralsols fertility, P phytoavailability, organic amendments, fertilizer, fertilization

FINTINA

Ny tanjona lehibe an'ity asa fikarohana ity dia ny hanolotra paikady vaovao amin'ny fomba fanambarana zezika mifanaraka amin'ny voly vary an-tanety eo afovoan-tanin'i Madagasikara. Izany paikady izany dia mampifanaraka haitoa roa samy hafa fa mifameno: ny fombafomba fanoritana antsoina hoe *a priori* sy *a posteriori*. Ny haitao *a posteriori* dia manome fanasokajiana ireo zezika mifototra amin'ny fifandraisana tena niseho teo amin'ireo zezika, raha toa ka handrafetana fanazavana ny antony nahazoana io fanasokajiana *a posteriori* io ny haitao *a priori* na ny fahalalana mialoha ny toetoetran'ireo zezika. Ny tanjona kendrena dia (i) ny mamantatra sy manao ny laharam-pahamehana ireo singa faran'izay fetra indrindra ny tany Ferralsols afovoan-tanin'i Madagasikara, (ii) ny hahafantatra ny toetoetra manokana ara-fizika sy simika an'ireo zezika, ary (iii) ny hametrahana, amin'ny alàlan'ny haitao *a posteriori*, ny sokajin'ireo zezika manana fiasa mitovy mba hamantarana ireo fanambarana zezika tsara indrindra. Araka ny fikarohana, tamin'ny alalan'ny andrana natao hoe *soustractif*, dia ny fôsfôro (P) no singa voalohany mametra ny famokarana vary amin'ny tany Ferralsols afovoan-tanin'i Madagasikara. Ny fahaverezan'ny fitomboan'ny vary raha ampiana ireo singa rehetra afa-tsy ny fôsfôro ny tany dia mahatratra hatramin'ny 97% raha oharina amin'ny tany izay misy ny singa rehetra. Ny azôta (N), ny kalsiôma ary ny maneziôma dia amin'ny laharana faharoa mametra ny famokaran'ny vary, saingy ny fahampian'izy ireo na tsia ao anatin'ny tany dia miova arakaraka ny toetoetry ny tany. Ny maodely kômbinatôrialy no nampiasaina ho an'ny fanasokajiana ireo zezika. Fitambaran-jezika aman-jatony, izay ahitana karazana zezika telo isaky ny tambatra, no nanaovana andrana; tamin'ny faran'ny fanandramana dia norefesina ny valin'ny fitambaran-jezika eo anivon'ny fitomboan'ny vary sy ny fahalonaky ny tany. Ny maodely avy eo dia manasokajy ny zezika ho vondrona miasa. Ireo zezika izay voasokajy anaty vondrona miasa iray dia manana valiny mitovy, rehefa atambatra amin'ny zezika hafa. Raha afafy amin'ny lanja $6T \text{ ha}^{-1}$ na inona na inona fanambarana, ny fisian'ny vovoka tandrok'omby, izay manana tahan'ny karbôna sy azota ambony indrindra, dia miteraka fitomboan'ny vary avo indrindra. Ireo zezika voasokajy anaty vondrona miasa hafa, toy ny taina ramanavy sy ny lavenon-kininina, dia ilaina avy eo mba hamenoana ireo singa hafa anaty tany tsy ampy taha. Raha afafy amin'ny fatra mitovy avy ireo fanambaran-jezika, ny vondrona miasa vita amin'ny taim-biby (toy ny zezi-pahitra na kaompositra na zezi-kankana), miaraka amina vondrona miasa afaka manome singa malaky (toy ny tain'akoho na zezika kisoa), dia mampitombo ny voka-bary. Ny zezi-pahitra sy ireo zezika mitovy aminy dia ilaina mba hitondrana karbôna amin'ny tany, hamatsiana azota mandritra ny fitomboan'ny vary ary hanovana ny toetran'ny tany mety hanatsara ny tahan'ny fôsfôro azon'ny zava-maniry ampiasaina. Ankoatr'izay, raha afafy amin'io fatra mitovy io, ny fahombiazan'ny zezika tsirairay ao anaty fitambaran-jezika iray dia mamaritra ny fahombiazan'ny fanambaran-jezika iray. Ity andrana ity, izay sokajiana ho asa fitrandrahana hatreto, dia manolotra paikady vaovao momba ny fanambarana zezika noho ireo vondrona miasa azo ka manome safidy maro amin'ny haro tsara azo atao, mifanaraka amin'ny toe-piainan'ny tantsaha eo afovoan-tanin'i Madagasikara.

Teny manan-danja: maodely kômbinatôrialy, fahavokaran'ny tany Ferralsols, fôsfôro azon'ny zava-maniry ampiasaina, zezika ôrganika, zezika afaka manome singa ao malaky, fampiasana zezika

TABLE DES MATIERES

Remerciements	i
Résumé	iv
Abstract	v
Fintina.....	vi
Table des matières	vii
Liste des sigles et abréviations	xii
Liste des figures	xiii
Liste des photographies	xvi
Liste des tableaux	xvi
Glossaire.....	xviii
Introduction générale.....	1
Contexte et état des connaissances	3
1. Sécurité alimentaire à Madagascar : Place de l’agriculture sur les Hautes Terres.....	4
2. Fertilité des Ferralsols	5
3. Gestion intégrée de la fertilité des sols dans l’Afrique Sub-saharienne.....	8
3.1. Gestion de la matière organique parmi les principes de l’Agroécologie	8
3.2. Définition et principes de la gestion intégrée de la fertilité des sols.....	9
3.3. Influences des matières organiques sur la fertilité des sols	10
4. Approches méthodologiques pour dresser une typologie des matières fertilisantes et pour proposer des assemblages performants : Deux types d’approche	17
4.1. Approche <i>a priori</i>	18
4.2. Approche <i>a posteriori</i>	19
5. Objectifs, hypothèses et organisation de la thèse	21
Partie I. Carences nutritives des Ferralsols : Cas du riz pluvial à Madagascar.....	22
Partie II. Caractéristiques des matières fertilisantes organiques et minérales disponibles des Hautes Terres de Madagascar	22
Partie III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols	24
Partie IV. Discussion générale et perspectives.....	25
<u>PARTIE I.</u> Carences nutritives des Ferralsols : cas du riz pluvial à Madagascar	27
1. Introduction	28
2. Materials and methods	29
2.1. Soil sampling	29
2.2. Soil analyses.....	29

2.3.	Rice cultivars	31
2.4.	The nutrient-omission experiment device and fertilization	31
2.5.	The cultivar-soil reciprocal transplant experiment design.....	32
2.6.	Measurements during and at the end of the experiment	32
2.7.	Data analyses	33
3.	Results	33
3.1.	Soil characteristics at the beginning and at the end of the experiment	33
3.2.	Plant biomass	34
3.3.	Plant nutrition.....	35
3.4.	Cultivar-soil crossing effects on rice nutrition.....	37
4.	Discussion	38
5.	Conclusion.....	42
	Synthèse de la Partie I.....	44
	<u>PARTIE II.</u> Caractéristiques des matières fertilisantes organiques et minérales disponibles sur les Hautes Terres de Madagascar	46
	Présentation de la Partie II.	47
	Chapitre II.1. Chemical and biochemical quality of organic and/or mineral fertilizer resources - A dataset from the Highlands of Madagascar.....	49
1.	Introduction	49
2.	Methods.....	50
2.1.	Soil sampling and analysis for laboratory incubations	50
2.2.	OMR sampling and preparation.....	50
2.3.	Chemical and biochemical analyses	53
2.4.	Potential CO ₂ mineralization experiment	53
2.5.	Potential net N mineralization experiment	53
3.	The dataset.....	54
3.1.	Chemical and biochemical composition	54
3.2.	Potential CO ₂ mineralization	56
3.3.	Potential net N mineralization	58
4.	Synthesis: N classification	60
	Chapitre II.2. Modifications of orthophosphate ions concentration in solution and its soil-solution transfer after applying Malagasy organic and/or mineral resources	61
1.	Introduction	61
2.	Materials and methods	63
2.1.	Soil sampling	63
2.2.	OMR characteristics.....	64

2.3.	Setup of the experiment	64
2.4.	Mathematical description of the dynamic of diffusive P-ions at the solid-to-solution interface vs C_P and time	65
2.5.	Statistical analysis	67
3.	Results	69
3.1.	Orthophosphate ions concentration in soil solution across treatments	69
3.2.	Dynamics of Pr vs C_P and time	70
3.3.	Setting in equation diffusive phosphate ions at the solid-to-solution interface of fertilized soils and comparison of parameters estimates	71
3.4.	Soil solution composition	74
3.5.	Comparison of the E values ($E=Qw+Pr$) across treatments	74
3.6.	Determinants of C_P , v , w and p parameters variation	76
4.	Discussion	77
4.1.	Variation in C_P after OMR addition.....	77
4.2.	Effects of OMR addition on the dynamic of diffusive orthophosphate ions (Pr)..	77
4.3.	Determinants of C_P , v , w and p parameters variation	80
5.	Conclusion.....	82
	Synthèse de la Partie II.....	84
	<u>PARTIE III.</u> Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes de pour accroître la fertilité des sols.....	89
	Chapitre III.1. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols – Conditions en serre	90
1.	Introduction	90
2.	Matériels et méthodes.....	92
2.1.	Échantillonnage et analyse des sols	92
2.2.	Collecte des matières fertilisantes organiques et minérales et doses d'apport	93
2.3.	Variété de riz utilisée	94
2.4.	Description de l'expérience	94
2.5.	Variables mesurées	95
2.6.	Analyses statistiques	96
3.	Résultats	101
3.1.	Typologie des matières à partir des assemblages	101
3.2.	Indices multicritères.....	106
3.3.	Classification finale des matières fertilisantes et situation de la pratique paysanne	108
4.	Discussion	111

4.1.	Appréciation des critères statistiques.....	111
4.2.	Assemblage des matières fertilisantes pour une meilleure croissance et nutrition des plantes.....	112
4.3.	Assemblages de matières fertilisantes pour améliorer les propriétés du sol.....	114
4.4.	Motifs d'assemblages des matières fertilisantes pour une innovation agronomique	114
4.5.	Évaluation de l'étude	115
5.	Conclusion.....	117
Chapitre III.2. Amélioration de la fertilité des sols à travers l'identification des effets des matières fertilisantes en assemblage - Conditions au champ		
1.	Introduction	119
2.	Matériels et méthodes.....	121
2.1.	Localisation de la zone d'étude.....	121
2.2.	Préparation des assemblages.....	121
2.3.	Variété de riz utilisée	124
2.4.	Conduite de la culture	125
2.5.	Variables mesurées	125
2.6.	Analyses statistiques	126
3.	Résultats	129
3.1.	Statistiques descriptives de la performance des matières seules ou en assemblage	129
3.2.	Typologie des matières fertilisantes par rapport à la hauteur finale des plantes..	130
3.3.	Typologie des matières fertilisantes par rapport au nombre de talles.....	133
3.4.	Typologie des matières fertilisantes par rapport aux rendements en grains et en pailles	136
3.5.	Situation de la pratique paysanne.....	141
4.	Discussion	141
4.1.	Validité des critères statistiques.....	141
4.2.	Assemblages performants dépendant de l'effet des matières seules.....	141
4.3.	Identification des effets induits par les matières pour proposer des assemblages performants.....	142
4.4.	Perspectives et limites.....	147
5.	Conclusion.....	148
<u>PARTIE IV. Discussion générale et perspectives</u>		
1.	Rappel sur les objectifs et originalité de la thèse	151
2.	Synthèse des résultats.....	152

2.1. Quels éléments nutritifs limitent la productivité du riz pluvial des Hautes Terres de Madagascar ?.....	152
2.2. Dans quelle mesure les matières fertilisantes diffèrent entre elles en termes de composition élémentaire et en termes de disponibilité en nutriments ?.....	152
2.3. Les approches <i>a priori</i> et <i>a posteriori</i> pour une typologie des matières fertilisantes sont-elles complémentaires dans la constitution des assemblages performants ?	157
3. Validation des hypothèses.....	160
4. Assemblages des matières fertilisante, une pratique innovante de fertilisation vers l'intensification écologique : les avantages du modèle combinatoire.....	162
5. Limites et perspectives	165
5.1. Carences nutritives de la population microbienne des Ferralsols des Hautes Terres de Madagascar.....	165
5.2. Réponses de différentes variétés de riz aux assemblages complexes	165
5.3. Prédiction de la phytodisponibilité de P induite par les matières : C_P et des paramètres (v , w et p)	166
5.4. Construction d'une typologie <i>a posteriori</i> en variant la calibration de la dose d'apport	166
5.5. Effets à long terme des assemblages des matières.....	167
5.6. Effets contaminants ou polluants des assemblages des matières.....	168
5.7. Relation entre les caractéristiques des matières fertilisantes et les groupes de matières formés	168
5.8. Approche exploratoire de l'analyse combinatoire sur les matières fertilisantes..	169
Références bibliographiques	170
Liste des annexes.....	188

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

³²P :	Isotope radioactif du phosphore dont le numéros atomique est 32
Anova :	Analyse de variance (Analysis of variance)
ASS :	Afrique Sub-saharienne
BA :	Biomasse aérienne
BR :	Biomasse racinaire
CIRAD :	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
C_P :	Concentration des ions-P dissous dans la solution du sol
FAO :	Food and Agricultural Organization
FOFIFA :	Foibem-pirenena momba ny fikarohana ampiarina amin'ny fampandrosoana ny ambany vohitra
IM :	Indice multicritère
INRA :	Institut National de la Recherche Agronomique
ions-P :	Ions orthophosphates
IRD :	Institut de Recherche pour le Développement
ISFM :	Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols/ Integrated Soil Fertility Management/
ITPS :	Groupe Technique Intergouvernemental sur le Sol/ Intergovernmental Technical Panel on Soils
LRI :	Laboratoire des Radio Isotopes
MF/ OMR :	Matières fertilisantes/ organic and/or mineral resources
MFM :	Matières fertilisantes minérales
MFO :	Matières fertilisantes organiques
MO :	Matières organiques
MOS :	Matières organiques du sol
MS :	Matières sèches
NDVI :	Normalized Difference Vegetation Index
PCA :	Principal component analysis
PIB :	Produit Intérieur Brut
Pr :	Ions-P diffusibles à l'interface solide-solution du sol
PRI :	Photochemical Reflectance Index
UMR	Unité mixte de recherche « Ecologie fonctionnelle et biogéochimie des
Eco&sols :	sols et des agroécosystèmes

LISTE DES FIGURES

Contexte et états de connaissances

Figure 1: Etendue des Ferralsols à Madagascar	6
Figure 2 : Classification des résidus organiques en quatre catégories selon leur mode de gestion à partir de leurs teneurs en azote (N), lignine et polyphénols, d'après Palm et al., 2001a.....	19
Figure 3: Schéma conceptuel de la thèse	26

PARTIE I.

Figure 4: Final shoot (white bars) and root (black bars) dry biomass for (A) Chhomrong Dhan and (B) Nerica 4 rice cultivars grown in acidic ferrallitic soils from Imerintsiatosika and Ivory, respectively.....	35
Figure 5: Final amounts of nitrogen (A), phosphorus (B), calcium (C), and magnesium (D) in Chhomrong Dhan rice cultivar tissues grown in an acidic ferrallitic soil from Imerintsiatosika, according to fertilization treatment.....	38
Figure 6: Final amounts according to treatments of nitrogen (A), phosphorus (B), calcium (C), and magnesium (D) in the shoot and root tissues of the NERICA 4 rice cultivar grown in an acidic ferrallitic soil from Ivory.....	40
Figure 7: Nutrient (N, P, Mg, Ca) amounts in plant shoots according to rice cultivars (Chhomrong Dhan "CD" and NERICA 4 "N4") and soil type (Imerintsiatosika "IM" and Ivory "IV") under adequate fertilization level treatment (A, C, E, and G) and without fertilizer (B, D, F, H).	41

PARTIE II.

Chapitre II.1.

Figure 8 : Principal Component Analysis performed on (bio)chemical properties of organic and mineral fertilizers. (A) individual factorial plan (axes 1 and 2). (B) Correlation circle. (C) Eigenvalue diagram.	56
Figure 9 : Cumulative C mineralization rates of the 19 organic and mineral fertilizers measured during 150 days of incubation (g C-CO ₂ g ⁻¹ C applied)..	57
Figure 10 : Potential net (A) ammonification, (B) nitrification and (C) nitrogen mineralization rates of the 19 organic and mineral fertilizers measured at day 15, 52, 95 and 150 after incubation (µg. N. kg ⁻¹ soil. day ⁻¹)..	59

Chapitre II.2.

Figure 11: Variation of P ions concentrations in relation with amounts of P added from different sources of fertilizer..	69
--	----

Figure 12: (A) Variation in P-ions concentration in soil solution (C_p) and (B) isotopic dilution ratio (r/R) during three times (3, 30 and 300 minutes) of isotopic dilution.....	71
Figure 13: (A) and (B) comparison of ComL vs ManI where (v, w, p) parameters are not significantly different ($Prob=0.60$). (C) and (D) comparison between VCL vs DroP where (v, w, p) parameters are significantly different ($Prob<1\times 10^{-20}$).....	73
Figure 14: Kinetics of E-values ($Q_w + Pr$) . of soil fertilized with the 16 organic and/or mineral products and the control over a period of 150 days.	75

PARTIE III.

Chapitre III.1.

Figure 15: Schéma conceptuel des deux approches de typologie des matières..	91
Figure 16: Schéma récapitulatif des variables mesurées au cours de l'expérimentation..	96
Figure 17: Etapes de constitution d'une typologie des composants par approche a posteriori (d'après Jaillard et al. 2018b)	99
Figure 18 :Typologie par modèle combinatoire des matières fertilisantes organiques et/ ou minérale sur les quantités en nutriments (N, P, K, Ca et Mg) dans les parties aérienne et racinaire des plantes.....	103
Figure 19: Typologie par approche combinatoire des matières fertilisantes organiques et/ou minérales sur l'indice multicritère de croissance des plantes.....	106
Figure 20: Typologie par approche combinatoire des matières fertilisantes organiques et/ou minérales sur l'indice multicritère de nutrition des plantes.....	107
Figure 21: Typologie par approche combinatoire des matières fertilisantes organiques et/ou minérales sur l'indice multicritère des propriétés du sol..	108
Figure 22: Typologie par approche combinatoire des matières fertilisantes organiques et/ou minérales sur l'indice multicritère total.	109
Figure 23: Situation du motif d'assemblages de la pratique paysanne (motif coloré en rouge), correspondant à l'association du fumier et de cendre de balle de riz, par rapport aux motifs d'assemblages observés sur (a) la croissance des plantes, (b) la nutrition des plantes, (c) les propriétés du sol et (d) l'indice multicritère total.....	110

Chapitre III.2.

Figure 24: Dispositif expérimental de l'essai sur les assemblages des matières fertilisantes en conditions réelles au champ. Les chiffres indiquent le numéro des assemblages.	124
Figure 25 : Calendrier cultural et périodes de mesures durant l'expérience. JAS : jours après semis	126
Figure 26 : Répartition de la performance des matières fertilisantes, (A) sur la hauteur finale des plantes et (B) sur le rendement en grains, des matières seules et en assemblage..	129

Figure 27: Typologie des matières fertilisantes basée sur la performance de la hauteur des plantes à la récolte...	131
Figure 28 : Typologie des matières fertilisantes basée sur la performance du nombre de talles fertiles..	134
Figure 29 : Boîtes à moustaches des performances observées rassemblées par motifs d'assemblage, (A) sur le rendement en grains, et (B) sur le rendement en pailles..	137
Figure 30 : Relation entre les performances observées et modélisées sur (A) et (C) le rendement en grains, et (B) et (D) sur le rendement en pailles, suivant une modélisation séparée (A) et (B) en effet d'interaction, et (C) et (D) en effet de composition.....	140
Figure 31 : Schéma récapitulatif des effets des matières fertilisantes en assemblage sur le rendement en grains du riz.....	147
Figure 32: Schéma synthétique d'une typologie a posteriori des matières fertilisantes, disponibles sur les Hautes Terres de Madagascar, à l'aide du modèle combinatoire et en se basant sur deux méthodes de calibration de la dose d'apport.....	164

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

- Photo 1: Essai sur l'identification des carences nutritives des sols des Hautes Terres de Madagascar à l'aide d'un essai soustractif, Serre du Laboratoire des Radio Isotopes 2018..... 27
- Photo 2: Etat des matières fertilisantes après séchage et broyage (à gauche) et disposition des microcosmes dans la salle d'incubation pour les mesures de la respirométrie (à droite), Laboratoire des Radio Isotopes 2018. 46
- Photo 3: Préparation des assemblages des matières fertilisantes et du sol pour l'essai en serre (en haut à gauche), disposition des pots d'assemblages en conditions contrôlées sous serre (en bas à gauche), disposition des assemblages sur terrain en conditions réelles (à droite). 89
- Photo 4: Installation de l'expérience, (A) : trouaison, (B) : mise en place des assemblages dans les trous et semis, (C) : état final des parcelle après l'installation. 125

LISTE DES TABLEAUX

PARTIE I.

- Table 1 : Main characteristics of the Malagasy soils used in the experiment. 30
- Table 2 : Mean values (standard deviation) of soil exchangeable aluminum and soil pHwater of ferralsols collected from Imerintsiatosika and Ivory in Madagascar after growth of rice cultivar Chhomrong Dan and Nerica 4, respectively, according to nutrient omission trials..... 34
- Table 3: Final nutrient contents (mean) in the rice shoot and root according to the treatments for Chhomrong Dhan cultivar growing in Imerintsiatosika soil. 36
- Table 4 : Final nutrient contents in the rice shoot and root according to the treatments for Nerica 4 cultivar growing in Ivory soil..... 36
- Table 5: Two-way ANOVA statistics for shoot weight and nutrients amounts (N, P, Ca, Mg) measured after 57 days of growth in soil origins (Imerintsiatosika/Ivory) and variety types (Chhomrong Dhan and Nerica 4) under adequate fertilization level (AFL) and without fertilization (Ctl) treatments..... 37

PARTIE II.

Chapitre II.1.

- Table 6 : Description and origin of 19 organic and/or mineral resources available in the Highlands of Madagascar (A French version is available on Annexe 2)..... 51
- Table 7: Dry matter, contents of total carbon (Total C), total nitrogen (total N), total phosphorus (total P), total sulphur (total S), total potassium (total K), total calcium (total Ca), total magnesium (total Mg), C:N ratio, pH and C content of the biochemical fractions for the organic and/or mineral resources used in the study. 55

Table 8: N mineralization repartition of organic and/or mineral materials according to the N mineralization typology defined by Lashermes et al. (2010).....	60
--	----

Chapitre II.2.

Table 9: Mean (and standard error) of P-ions concentration in soil solution (C_P) after organic an/or mineral resources addition and estimates (and asymptotic standard error) of the v, w, p parameters of kinetic Freundlich equation ($P_r = v C_P^w t^p$) for all organic and/or mineral resources treatments and the control soil.	72
--	----

Table 10: Soil solution composition of the untreated- and the OMR-treated soils.....	74
--	----

Table 11: Statistics of Partial Least Squares (PLS) regressions including OMR characteristics and fertilized soil solution composition as independent variables and the C_P , v, w and p parameters as dependent variables. The most relevant and significant independent variables for explaining the dependent variable presented a Variable Importance of Projection (VIP) > 1.	76
---	----

PARTIE III.

Chapitre III.1.

Tableau 12: Caractéristiques du sol utilisé dans l’essai	93
--	----

Tableau 13: Classification des matières fertilisantes à partir des enquêtes paysannes et leurs doses d’apport	94
---	----

Tableau 14: Typologie par modèle combinatoire des matières fertilisantes organiques et/ ou minérale sur la biomasse aérienne et le nombre de feuilles	101
---	-----

Tableau 15: Typologie par modèle combinatoire des matières fertilisantes organiques et/ ou minérale sur la valeur SPAD.....	102
---	-----

Tableau 16: Performance des motifs d’assemblage observés sur les teneurs totales en carbone et en azote, sur le rapport C/N et sur le pHeau des sols.	105
--	-----

Chapitre III.2.

Tableau 17 : Classification des matières fertilisantes à partir des enquêtes paysannes et leurs doses d’apport.	123
--	-----

Tableau 18 : Analyse de la variance des performances des assemblages expliquées par les groupes et les interactions entre les groupes sur la hauteur des plantes à la récolte	132
---	-----

Tableau 19: Analyse de la variance des performances des assemblages expliquées par les groupes et les interactions entre les groupes sur le nombre de talles fertiles à la récolte	135
--	-----

Tableau 20: Typologie des matières fertilisantes en se basant sur les rendements en grains et en pailles des plantes.....	136
---	-----

Tableau 21: Analyse de la variance des performances des assemblages expliquées par les groupes et les interactions entre les groupes sur le rendement en grains.....	138
--	-----

Tableau 22: Analyse de la variance des performances des assemblages expliquées par les groupes et les interactions entre les groupes sur le rendement en pailles	139
--	-----

GLOSSAIRE

- Agrosystème :** Synonyme d'écosystème cultivé ou écosystème productif.
- Amendements organiques/ organic amendments :** Matières fertilisantes composées principalement de combinaisons carbonées d'origine végétale et/ou animale et végétale, destinées à l'entretien ou à la reconstitution du stock de matière organique du sol et à l'aménagement de ses propriétés physiques et/ou chimiques et/ou biologiques. La dénomination 'amendements organiques' exige un produit dans lequel la teneur en matière organique est d'au moins 20 % et la teneur en un nutriment majeur inférieure à 3 % sur le produit brut.
- Dégradation des sols :** Les processus de dégradation des sols incluent les phénomènes d'érosion, la compaction et l'imperméabilisation, l'acidification, la perte en matières organiques, le déséquilibre des nutriments, la perte de biodiversité et la pollution. La dégradation résulte en une perte de services rendus par les sols, notamment sa capacité productive.
- Ecosystème :** Un écosystème est un complexe dynamique de communautés végétales, animales et de micro-organismes (biocénose) et l'environnement non vivant (biotope) interagissant en tant qu'unité fonctionnelle. Les humains font partie intégrante des écosystèmes. Les écosystèmes varient énormément en taille ; un étang temporaire dans un arbre creux et un bassin océanique peuvent tous deux être des écosystèmes.
- Engrais/ fertilizers :** Matières fertilisantes qui ont pour principale fonction d'apporter aux plantes des éléments fertilisants directement utiles à leur nutrition. La réglementation française impose d'appeler 'engrais' tout produit contenant au moins 3% d'un élément nutritif majeur (azote, ou phosphore, ou potasse). Lorsque la totalité des éléments fertilisants est d'origine organique, animale ou végétale, on peut utiliser la dénomination 'engrais organique'. Quant à la dénomination 'engrais organo-minéral', elle est réservée aux mélanges d'engrais organiques et d'engrais minéraux.
- Fertilité d'un sol :** La fertilité d'un sol représente son aptitude de façon régulière et répétée la croissance des cultures et l'obtention des récoltes. Elle est la résultante de diverses composantes qui amènent à distinguer : la fertilité chimique, la fertilité physique et la fertilité biologique. Gérer la fertilité d'un sol, c'est lui appliquer les techniques qui lui permettront de produire abondamment aussi de reproduire ou d'améliorer sa fertilité à long terme, donc d'une manière durable.
- Matières fertilisantes/ Organic and/or mineral resources :** Les matières fertilisantes comprennent les engrais (NF U42-001) et les amendements (NF U44-051) et, d'une manière générale, tous les produits dont l'emploi est destiné à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux, ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.
- Fonctions écologiques des sols :** Ensemble de processus écologiques par lesquels le sol fournit des services écosystémiques. Les fonctions principales sont (i) la dynamique de la matière organique du sol, (ii) le cycle des nutriments, (iii) le maintien de la structure du sol et (iv) la régulation des ravageurs. Ces

fonctions écosystémiques sont associées du point de vue des plantes à (i) leur nutrition, (ii) le milieu physique dans lequel les plantes se développent, (iii) leur santé et, (iv) les interactions entre plantes. Elles sont fournies par l'activité des organismes du sol et sont parfois regroupés sous le terme de santé du sol.

Phytodisponibilité d'un élément :

La quantité d'un élément nutritif dans le sol que la plante peut utiliser

Qualité du sol :

La capacité du sol à produire des biens et services économiques et à réguler l'environnement

Riz pluvial :

A Madagascar, deux systèmes de production de riz pluvial existent : en pente ou en *tanety* qui domine sur les Hautes Terres et sur brûlis ou *tavy*. Dans ce manuscrit, nous nous intéressons à la riziculture pluviale des *tanety*.

Santé du sol :

Une propriété intégrative qui reflète la capacité du sol à répondre à l'intervention agricole, de sorte qu'il continue de soutenir à la fois la production agricole et la fourniture d'autres services écosystémiques

Services écosystémiques :

Les services écosystémiques sont les avantages que les gens retirent des écosystèmes. Il s'agit notamment des services d'approvisionnement tels que la nourriture et l'eau ; des services de régulation tels que la régulation des inondations, de la sécheresse, de la dégradation des terres et des maladies ; des services de soutien tels que la formation des sols et le cycle des nutriments ; et les services culturels tels que les avantages récréatifs, spirituels, religieux et autres non matériels.

⌘ INTRODUCTION GENERALE

« Une agriculture qui ne peut produire sans détruire porte en elle les germes de sa propre destruction » Pierre Rabhi

“A nation that destroys its soils destroys itself” Franklin Roosevelt

Dans son rapport sur l'état des ressources en sol du monde, le Groupe Technique Intergouvernemental sur les Sols (ITPS) met en exergue la place primordiale des sols dans la vie de l'homme (FAO et ITPS, 2015) et, nous alerte en même temps sur les menaces majeures que subissent les sols. Il a été souligné que l'atteinte des objectifs du développement durable (ODD) n'est possible que si les ressources naturelles cruciales - dont les sols - sont gérés de manière durable. Le sol constitue en effet une ressource naturelle qui fournit de nombreux services à l'homme, notamment la très grande majorité de son alimentation. Il assure directement l'atteinte de la sécurité alimentaire et nutritionnelle à l'échelle mondiale (Objectif 2 Faim « Zéro ») ; investir dans la gestion durable des sols est d'une importance capitale pour soutenir la productivité agricole afin de nourrir les 9 milliards de personnes en 2050 (Banque Mondiale, 2007).

Dans les systèmes cultivés (agrosystèmes), les sols sont fréquemment sujets soit à la surutilisation soit au manque ou à l'absence d'utilisation de fertilisants (FAO et ITPS, 2015). Tous deux mettent en péril la capacité du sol à remplir ses fonctions affectant la durabilité du système et la sécurité alimentaire. L'apport excessif en fertilisants (organiques et/ou minéraux) peut entraîner des risques environnementaux indésirables, notamment un excès de nutriments (eutrophisation), l'immobilisation des nutriments essentiels, la contamination des eaux souterraines, l'émission de gaz à effet de serre et l'acidification ou la salinisation des sols (Urrea *et al.*, 2019). Au contraire, l'insuffisance d'apports aura comme conséquences l'épuisement des nutriments du sol aggravant l'insécurité alimentaire (Bekunda *et al.*, 2010). Dans ce contexte, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'Agriculture a développé le Code de conduite international pour l'utilisation et la gestion durables des fertilisants (FAO, 2019). Ceci permet la mise en œuvre des techniques et politiques générales de la gestion durable des sols et promeut des pratiques incluant le recyclage des nutriments et la gestion des cultures pour améliorer la santé des sols. La Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols (ISFM) pour l'application des pratiques de gestion de la fertilité des sols en Afrique sub-Saharienne (ASS) fait partie des références privilégiées dans le Code (FAO, 2019).

En ASS dont Madagascar, la faible fertilité inhérente de la majorité des sols et l'épuisement des nutriments du sol constituent le principal obstacle au maintien de la production agricole, alors que l'activité principale de la majorité de la population est centrée sur l'agriculture (Bekunda *et al.*, 2010 ; Lichtfouse, 2017 ; Sanginga et Woomer, 2009). La perte de la fertilité des sols (i) amplifie davantage l'insécurité alimentaire déjà alarmante dans cette région, (ii) entrave le développement économique de l'échelle exploitation à l'échelle nationale, et (iii) exacerbe

plusieurs problèmes environnementaux, dont l'érosion des sols entraînant la sédimentation des parcelles en aval, la diminution du stock de carbone (C) contribuant à une émission additionnelle de CO₂. La gestion de la fertilité des sols présente ainsi un défi particulier pour produire de la nourriture (et fournir d'autres services écosystémiques) et soutenir l'économie de nombreux pays, dont Madagascar.

L'utilisation des matières fertilisantes organiques (MFO) est une pratique classique chez les agriculteurs en ASS pour fertiliser leur sol ; elles sont les principales sources de fertilisants. En plus d'apporter des nutriments pour les plantes, l'apport de ressources organiques favorisent l'accumulation de la matière organique du sol (MOS) et peut améliorer sa fertilité à long terme. Cependant, ces MFO peuvent ne pas être disponibles en quantités suffisantes pour soutenir la production, d'autant plus que la majorité d'entre elles sont de qualité moyenne à faible et induisent ainsi une disponibilité limitée à court terme des nutriments (Palm *et al.*, 2001b; Vanlauwe et Giller, 2006). Les fertilisants minéraux (ou matières fertilisantes minérales MFM) issus des gisements minéraux locaux et les produits minéraux importés existent également (Van Straaten, 2002). Ils peuvent remédier aux carences en nutriments à court terme du sol mais ne contribuent pas directement à l'accumulation de la MOS et à la production à long terme. De plus, ces MFM ne sont apportées au sol qu'à des quantités relativement faibles dû à leur coût et/ou à leur disponibilité sur le marché (Vanlauwe et Giller, 2006). Afin de valoriser les ressources disponibles, l'assemblage d'apport de matières différentes (organiques et minérales) semble une pratique prometteuse pour les agriculteurs en profitant des effets combinés des fertilisants (Bekunda *et al.*, 2010; Lichtfouse, 2017; Sanginga et Woomer, 2009). Par exemple, la combinaison des fertilisants peut entraîner une immobilisation temporaire et une libération ultérieure de nutriments appliqués par les fertilisants minéraux, améliorant ainsi la synchronisation entre la disponibilité des nutriments et les demandes des cultures (Vanlauwe *et al.*, 2001; Gentile *et al.*, 2009). Ces interactions peuvent entraîner la limitation des pertes des nutriments et indirectement améliorer les conditions de croissance de la plante grâce à l'amélioration de nombreuses propriétés du sol (par exemple, la capacité de rétention en eau, la structure, la vie biologique, ...).

Ainsi, la présente étude s'intéresse à l'amélioration de la fertilité des sols à partir d'assemblages des matières fertilisantes organiques et minérales (MFOM), et plus particulièrement sur les Ferralsols des Hautes Terres de Madagascar en riziculture pluviale.

En effet, l'objectif d'atteindre la sécurité alimentaire dans le pays peut être obtenu en améliorant les rendements rizicoles des Hautes Terres de Madagascar (Breumier *et al.*, 2018). Des progrès scientifiques sur le développement de variétés à haut rendement, résistantes au froid et aux maladies fongiques (Raboin *et al.*, 2013) ont rendu possible l'exploitation des zones à haute altitude. Pour profiter des efforts déployés, une formulation appropriée des techniques de fertilisation pour l'amélioration de la faible fertilité native des Ferralsols est ressentie.

& CONTEXTE ET ETAT DES CONNAISSANCES

1. Sécurité alimentaire à Madagascar : Place de l'agriculture sur les Hautes Terres

Madagascar est un Etat insulaire situé dans le Sud-Ouest de l'Océan Indien et rattaché géographiquement dans le continent africain. C'est la cinquième plus grande île du monde avec une superficie de 587 040 km². Le nombre de la population est estimé à 25 674 196 habitants en 2018 dont 80% vivent en milieu rural (INSTAT, 2020).

L'économie de Madagascar est centrée sur le développement de la filière agricole. Le secteur représente 72% de la population active mais couvre uniquement 26% du PIB national (Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique [MESupReS], 2015), indiquant un faible niveau de la productivité agricole. La plupart des ménages agricoles vivent dans le milieu rural, caractérisés par des exploitants marginaux, et la riziculture occupe la culture majoritaire de ces ménages (85% des exploitants ; Penot *et al.*, 2011). Malgré la place de l'agriculture, l'insécurité alimentaire reste parmi les principaux obstacles au développement du pays. La prévalence du retard de croissance chez les enfants de moins de 5 ans est de 47%, quand la prévalence à la sous-alimentation est de 43% (INSTAT, 2013). Plus d'un tiers de la population, notamment dans les milieux ruraux souffre d'une situation d'insécurité alimentaire et/ou nutritionnelle (PND, 2015). D'un côté, le taux de pauvreté du pays figure parmi les plus élevés au niveau mondial : 78% de la population vivent dans l'extrême pauvreté dont 78% des foyers se trouvent dans les régions rurales (Banque Mondiale, 2015).

Le riz constitue l'aliment de base des malgaches, l'essor des cultures vivrières de base est un défi majeur du pays, essentiel à la fois à la sécurité alimentaire et au développement économique des ruraux pauvres en majorité. L'importance du riz à Madagascar en fait un secteur privilégié pour atteindre les objectifs économiques, sociaux et écologiques du développement durable. Sur la Grande Ile, sa consommation nationale se classe parmi les plus élevées au monde avec un taux moyen de 154 kg par an et par habitant en 2013 (FAOSTAT, 2018). Néanmoins, la riziculture malgache n'a pas vraiment connu de progrès en termes de production depuis son indépendance en 1960. Le rendement moyen national n'est passé que de 1,7 T ha⁻¹ en 1960 à 2,4 T ha⁻¹ en 2004 (Minten *et al.*, 2007), et a presque stagné depuis (environ 2,5 T ha⁻¹ en 2016, Min. Agri, 2016). En 2017, la production totale nationale du riz était de 3,4 millions de tonnes de paddy (PAM, 2019). La production est pourtant en deçà des besoins croissants de consommation, et les déficits enregistrés entraînent des importations estimées à 530.000 T pendant la campagne de commercialisation 2018/19 (FAO et PAM, 2017).

Pour pallier le déficit de la production rizicole, l'expansion de la riziculture vers des zones agroécologiques plus élevées en altitude est devenue possible après le développement des variétés résistantes au froid et aux maladies fongiques (Raboin *et al.*, 2013). Ces deux dernières décennies, l'exploitation des collines ou « *tanety* » a fortement modifié le paysage des Hautes

Terres de Madagascar pour la production du riz pluvial. La riziculture pluviale représente désormais 8,4% des zones rizicoles nationales (PAM, 2019). Grâce au développement du riz pluvial en altitude, la production rizicole des ménages a significativement augmenté (Breumier *et al.*, 2018). Cela a permis une réduction de la période de soudure et de la contrainte d'acheter du riz. La sécurité alimentaire améliorée a autorisé les exploitants à diversifier leurs activités notamment les activités d'élevage. Des descripteurs sur le bien-être mental (diminution des soucis, problèmes) ont été aussi associés à la diminution de la nécessité d'acheter du riz et à la hausse de l'autoconsommation (Breumier *et al.*, 2018). Le développement du riz pluvial garantit ainsi une amélioration de la sécurité alimentaire et de l'économie du pays. Néanmoins, les exploitations modestes, qui sont les plus nombreuses, ne bénéficient pas entièrement de ces avantages et restent à la recherche perpétuelle de l'autosuffisance alimentaire.

En effet, la production de riz pluvial y reste très faible, moins de 2 t ha⁻¹ (Minten *et al.*, 2007). La faible fertilité minérale des sols de « *tanety* », classifiés en tant que Ferralsols (FAO, 2014), l'accessibilité limitée des producteurs aux intrants chimiques ainsi que le mode de production et de gestion des terres expliquent ce faible rendement (Minten *et al.*, 2007). Le taux d'utilisation d'engrais est l'un de plus faibles en Afrique : moins 10 kg ha⁻¹ en moyenne (Sanchez *et al.*, 1997 ; WFP, MAEP et FAO, 2019), ne permettant pas de lever les différentes contraintes nutritionnelles des Ferralsols. Dans ce contexte, il apparaît crucial de développer un mode de production qui permette de lutter contre l'appauvrissement de la fertilité minérale des Ferralsols tout en respectant la durabilité du système.

2. Fertilité des Ferralsols

Les Ferralsols, selon la classification WRB ou Oxisols et Ultisols selon la classification américaine, sols ferrallitiques selon la classification française de la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols sont présents exclusivement dans les régions tropicales humides (Boyer, 1982). Ils s'étendent sur une superficie d'environ 750 million ha (FAO, 2014). Ils se localisent principalement sur les boucliers continentaux d'Amérique du Sud (en particulier le Brésil) et d'Afrique (en particulier le Congo, la République démocratique du Congo, le Sud de la République centrafricaine, l'Angola, la Guinée et Madagascar - FAO, 2014) et, dans l'Asie du Sud, dont la majorité sont des pays en voie de développement. En Afrique sub-saharienne, les Ferralsols s'étendent sur une très vaste zone agroécologique et sont présents en dominance depuis des zones de moyenne altitude jusqu'aux hautes terres (FAO, 1995 ; FAO / IIASA 2000 et 2002 in Sanginga et Woomer, 2009). Ils sont pour la plupart destinés aux cultures vivrières dont principalement le riz et le maïs. En se référant à la carte pédologique de Madagascar proposée par le FAO (1974), les Ferralsols occupent près de 35,4 % de la couverture pédologique de l'île et se distribuent essentiellement sur les Hautes Terres et la partie Est de Madagascar (Figure 1).

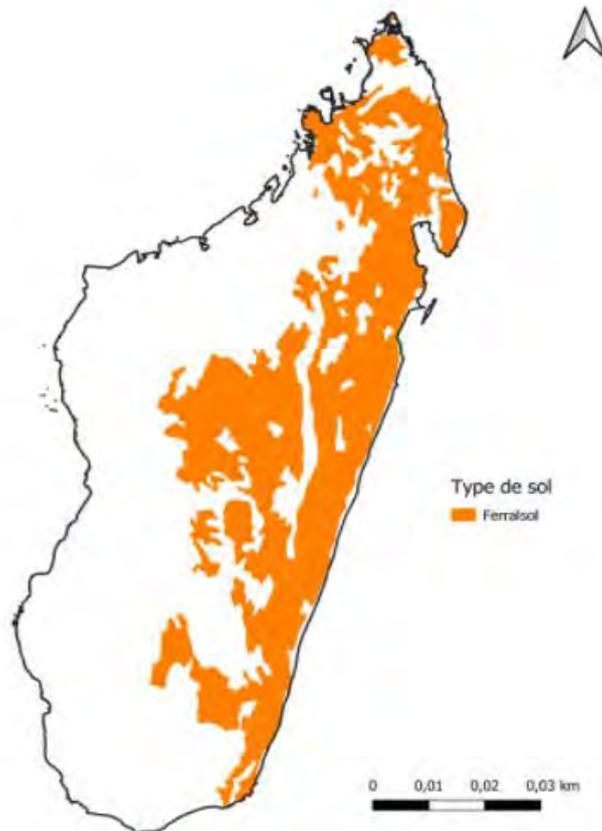


Figure 1: Etendue des Ferralsols à Madagascar (Source : FAO, 1974)

Le mot Ferralsol vient des mots latins *ferrum* et *alumen* qui signifient respectivement fer et aluminium, soulignant que ces sols sont riches en fer et en aluminium, sous formes d'oxyhydroxydes. Les critères retenus pour définir les Ferralsols concernent la présence des propriétés caractéristiques d'une forte altération dans un horizon (≥ 30 cm d'épaisseur), qui se traduit par une décomposition quasi-complète des minéraux primaires altérables, excepté le quartz, et une dominance de la kaolinite (phyllosilicate de type 1:1) et/ou de sesquioxydes de fer et d'aluminium dans la fraction argileuse (Van Wambeke, 1974). Il résulte de cette composition une capacité d'échange cationique (CEC) faible et des pH acides dus à la libération des cations basiques hors de la matrice. La CEC de ces sols n'excède pas $16 \text{ cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ et le pH est bien inférieur à 7. L'une des plus grandes contraintes de la mise en culture des Ferralsols est d'ailleurs leur problème d'acidité (pH souvent inférieur à 5.5) qui est corrélée directement avec la saturation en aluminium du site d'échange (Sartain et Kamprath, 1977; von Uexküll et Mutert, 1995). L'aluminium affecte négativement non seulement la croissance racinaire des plantes mais également l'activité microbienne du sol.

En plus de la toxicité aluminique, la valorisation des Ferralsols est contrainte par la faible disponibilité en P, bien que dans les Ferralsols des Hautes Terres de Madagascar, le P total soit présent en quantité relativement élevée (Rabeharisoa, 2004). La quantité en P disponible dans

la solution du sol ne dépasse pas $0,01 \text{ mg P kg}^{-1}$ de sol et cette quantité (mesurée à l'aide de membranes de résine échangeuse d'anions) est inférieure à 5 mg P kg^{-1} de sol (Randriamanantsoa *et al.*, 2015, 2013; Gérard, 2016). En effet, le P peut être fortement adsorbé sur la surface d'oxydes d'Al et de Fe et/ou précipité par l'Al soluble, présent en grandes quantités dans la phase solide et la solution du sol, respectivement (Haynes et Mokolobate, 2001). Les ions orthophosphates chargés négativement, qui sont la seule forme disponible pour la plante, forment une forte liaison avec les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium de charges positives, les rendant peu mobilisables à court terme (Robert, 1996). Cela nécessite une application conséquente de fertilisants phosphatés afin d'élever les quantités disponibles de P du sol à un niveau adéquat.

La faible disponibilité en N et en C des Ferralsols contraint également leur mise en culture. D'un côté, la matière organique du sol, jouant un rôle important sur la mise à disponibilité de l'azote, y est présente en quantité relativement faible, assez rarement modérée, due à la minéralisation rapide des composés sous température élevée (Tiessen *et al.*, 1994). Seule une infime proportion de la matière organique demeure stable (en formant de l'humus) sur le long terme (Fearnside, 2000). D'un autre côté, la faible quantité en substrats organiques du sol contraint les activités microbiennes du sol impliquées dans la fourniture de nombreux services (Brussaard, 1997; Brussaard *et al.*, 2007; Kibblewhite *et al.*, 2008). L'acidité des sols inhibe aussi l'activité minéralisatrice des microorganismes des sols même si le sol présente une quantité relativement moyenne en matière organique. Les pertes par volatilisation, en relation avec une évapotranspiration élevée, et par lixiviation, durant les fortes pluies tropicales, ne sont pas négligeables (Miller et Cramer, 2004). En outre, l'acidité du sol est caractérisée par des niveaux déficients en cations échangeables (Ca, Mg, K) et en quelques micronutriments (Mo, Si, Zn, B) (Fageria et Baligar, 2008; FAO, 2014).

Le pH conditionne ainsi significativement la solubilisation de l'aluminium qui devient toxique à $\text{pH} < 5,5$ (Duchaufour, 1965), la nutrition de la plante via la mise à disponibilité limitée des nutriments (cations et anions), et l'intensité réduite des activités des microorganismes responsables de la décomposition des matières organiques (MO). De ces propriétés, des sols acides et à faible fertilité (chimique et biologique principalement) font le stéréotype des Ferralsols des régions tropicales. Sous les tropiques, les Ferralsols occupent une superficie beaucoup plus grande que les autres classes des sols. Pour l'atteinte de la sécurité alimentaire mondiale, la gestion et l'utilisation durable des Ferralsols devraient être améliorées. De plus, les régions tropicales couvrent près de 40% de la superficie agricole de la planète, elles détiennent ainsi une énorme responsabilité pour assurer l'approvisionnement en nourriture d'une population mondiale croissante (FAO, 2014).

3. Gestion intégrée de la fertilité des sols dans l'Afrique Sub-saharienne

3.1. Gestion de la matière organique parmi les principes de l'Agroécologie

L'Agroécologie a émergé dans la conception des modèles de production agricole vers la fin des années 1980, après la crise environnementale et sociale engendrée par l'agriculture intensive et conventionnelle. Elle a pour objectif la transformation des systèmes alimentaires vers la durabilité (Gliessman, 2015 in FAO, 2015) en valorisant les potentialités écologiques, économiques et sociales d'un territoire. Dans ses pratiques, l'Agroécologie prône l'intensification des processus écologiques directement liés à la fertilité des sols, et des interactions entre les différentes composantes de l'agrosystème (Altieri, 1995; Barrios *et al.*, 2015). Les pratiques agroécologiques cherchent ainsi à maintenir ou à restaurer la fertilité des sols en postulant que c'est la base de la production durable. Parmi ses principes, l'Agroécologie se fonde sur la gestion de la matière organique de manière à garantir les conditions de sol favorables à la croissance des plantes (Altieri, 1995).

En effet, les effets de la matière organique (MO) sur presque toutes les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, placent la MO au centre de l'état de fertilité et de santé d'un sol (Gregorich *et al.*, 1994; Magdoff et Weil, 2004). La MO influence en conséquence les propriétés fonctionnelles du sol (Loveland et Webb, 2003), et grâce à une variété de processus biologiques, le sol et ses MOs représentent 'un carrefour multifonctionnel'. L'agrégation des différentes fonctions du sol est connue sous le terme de fonctions écologiques des sols desquelles dépend la santé du sol (Kibblewhite *et al.*, 2008). Ces fonctions sont au nombre de quatre : (i) la transformation des matières carbonées, (ii) le recyclage des nutriments, (iii) le maintien de la structure du sol et (iv) la régulation des populations. Elles vont par la suite rendre de nombreux biens et services, indispensables à l'homme et aux sociétés, et le sol ainsi que ses composants participent activement à la fourniture des quatre classes de services écosystémiques définis par le Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005). Ils fournissent, par exemple, des services de support tels que la pédogenèse, le recyclage des nutriments et la production primaire, sur lesquels reposent la production de tous les autres services. Ils participent aux services de régulation tels que la régulation du climat via l'émission de gaz à effet de serre et la séquestration du carbone (Lal, 2004). Ils contribuent à l'octroi des services d'approvisionnement via la productivité agricole mondiale (Lal *et al.*, 2014).

La MO du sol (MOS) est un composant omniprésent et très réactif du sol, très sensible aux pratiques de gestion des sols et des cultures. Grâce aux diverses fonctions écologiques des sols assurées par la MO, la gestion de la fertilité des sols incluant l'utilisation des fertilisants organiques a toujours été le principe pivot d'une agriculture durable (Lal, 2004). Les sols à forte teneur en matière organique et à activité biologique intense présentent généralement une bonne fertilité ainsi que des réseaux trophiques complexes favorisant le développement des

organismes bénéfiques (Altieri, 2002; Blanchart et Trap, 2020). En conséquence, le système devient à la fois productif et résilient face aux perturbations externes telles que la maladie et la sécheresse.

3.2. Définition et principes de la gestion intégrée de la fertilité des sols

La faible fertilité native des sols et l'épuisement des nutriments continuent à représenter les plus grands obstacles pour sécuriser les besoins en production en ASS. Le manque ou l'adoption très limitée en engrais et fertilisants par les exploitants agricoles explique l'épuisement continu des nutriments des parcelles agricoles (Akpan *et al.*, 2012; Tittonell et Giller, 2013). Cela est dû à leur accessibilité, c'est-à-dire à leur disponibilité et à leur prix prohibitif limitant leur utilisation (Bationo *et al.*, 2006; Frelat *et al.*, 2013). Dans le cas de Madagascar, les fertilisants de synthèse concernent moins d'une exploitation sur quatre, tandis que les amendements organiques sont épandus à peu près sur la moitié des exploitations (Rabeharisoa *et al.*, 2012). En raison, d'une exportation en nutriments significativement élevée par rapport à l'importation, le bilan nutritionnel du sol se trouve déficitaire. A titre indicatif, une moyenne de 660 kg N ha⁻¹, 75 kg P ha⁻¹ et 450 kg K ha⁻¹ a été perdue entre les années 60 et 90 sur environ 200 millions d'hectares de terres cultivées, en ASS (Sanchez *et al.*, 1997). Cette tendance n'a pas changé au cours des années, car Cobo *et al.* en 2010 ont rapporté dans leur étude sur l'Afrique que > 75% des parcelles étudiées restent déficientes en N et K, et un bilan négatif en P s'observe sur 56% des parcelles.

Sur la base des résultats de recherche dans de nombreux pays et diverses zones agroécologiques en ASS, un consensus s'est dégagé pour dire que les gains les plus profitables et les plus durables par unité de nutriments apportés sont obtenus par des mélanges d'engrais minéraux et d'intrants organiques (Padwick, 1983; Giller *et al.*, 1998; Vanlauwe *et al.*, 2001). La Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols (ISFM pour 'Integrated Soil Fertility Management') est définie ainsi comme l'ensemble des pratiques de gestion de la fertilité des sols qui incluent nécessairement d'un côté, l'utilisation combinée des matières fertilisantes organiques et minérales, et de l'autre côté l'adoption d'un matériel génétique amélioré (Sanginga et Woome, 2009; Vanlauwe *et al.*, 2014a). Aussi, l'ISFM associe dans ses pratiques les nouvelles technologies tout en les adaptant aux conditions locales (FAO, 2019; Sanginga et Woome, 2009; Vanlauwe *et al.*, 2014a). Pour profiter des efforts déployés sur le développement de variétés à rendement plus élevé et plus résistantes (Raboin *et al.*, 2013), les contraintes édaphiques (plus particulièrement la fertilité des sols) nécessitent en premier lieu d'être levées.

En se basant sur l'utilisation des fertilisants, les techniques de l'ISFM sont fondées sur deux principes : (i) la maximisation de l'utilisation des ressources organiques qui constituent les sources d'intrants les plus importants pour les exploitants (Bekunda *et al.*, 2010, Rabeharisoa *et al.*, 2012), et (ii) l'utilisation judicieuse des fertilisants de synthèse ainsi que la valorisation

des ressources en gisements minéraux. Il est à noter que l'ASS est dotée de ressources importantes en gisements agro-minéraux dont les plus connus sont les gisements en roches phosphatées et en dolomie (Van Straaten, 2002; van Kauwenbergh, 2006). L'ISFM est alors considérée comme l'approche la plus durable dans le contexte de l'ASS ; elle tient compte de l'amélioration de la productivité agricole en considérant les dimensions sociales et améliorerait également les services fournis par les agrosystèmes avec une diminution des impacts sur l'environnement (Lichtfouse *et al.*, 2017).

3.3. Influences des matières organiques sur la fertilité des sols

L'apport de fertilisants organiques influence les caractéristiques du sol par la modification interdépendante des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (Van Camp *et al.* 2004). Les changements au niveau des propriétés du sol peuvent être perçus après une application répétée à long terme (Herencia *et al.*, 2008; Diacono et Montemurro, 2010) ou sur un pas de temps plus court, au cours d'une seule saison culturale (Arancon *et al.*, 2004; Lazcano *et al.*, 2013).

3.3.1. Effets de la matière organique sur la fertilité biologique des sols

En ce qui concerne les avantages potentiels des amendements organiques sur les propriétés biologiques des sols, il est bien connu que ces matières peuvent stimuler (i) directement la croissance microbienne en fournissant de l'énergie (carbone) et des nutriments essentiels à leur survie et leur croissance, ou (ii) indirectement en favorisant la croissance des plantes et, par conséquent, la quantité des exsudats racinaires dans la rhizosphère (Abbott *et al.*, 2018; Bais *et al.*, 2006; Pascual *et al.*, 1998). Dans une étude sur des sols amendés par une combinaison d'apports organiques, la biomasse microbienne du sol a augmenté de 31% par rapport à une fertilisation conventionnelle, après 240 jours de croissance du curcuma (Dinesh *et al.*, 2010). Ferreras *et al.* (2006) ont montré que la respiration microbienne du sol (en $\mu\text{g CO}_2 \cdot \text{g}^{-1}$ de sol), après 7 jours d'incubation, augmentait d'un facteur 2 ou plus avec un apport de fumier de volailles ou de vermicompost provenant des déchets solides ménagers par rapport à une situation témoin sans apport. Cette augmentation de la respiration a été attribuée à une teneur en carbone organique du sol (COS) plus élevée dans les sols organiquement fertilisés. La respiration microbienne du sol, mesurée par la production de CO_2 par gramme de sol, est un indicateur direct de l'activité microbienne et reflète indirectement la disponibilité de la matière organique (Parkin *et al.*, 1996). Cet effet est aussi remarqué sur les autres classes d'organismes du sol (Larney et Angers, 2012) tels que les vers de terre puisque l'ajout d'un fumier animal entraîne une plus grande abondance de vers de terre qu'avec des engrais minéraux (Leroy *et al.*, 2008b). Par ailleurs Lavelle *et al.* (2001) soulignent la nécessité d'apporter des matières organiques pour favoriser et optimiser l'activité de la macrofaune des sols, notamment celle des vers de terre.

L'incorporation de divers composés, par les fertilisants organiques, sensibles à l'hydrolyse enzymatique conduit également à la stimulation des activités enzymatiques microbiennes du sol. Lazcano *et al.* (2013) ont montré que, comparés à un traitement d'engrais synthétique, le fumier et le vermicompost ont augmenté de 12% à 22% les activités enzymatiques du sol impliquées dans la dégradation des C, N et P organiques du sol (β -Glucosidase, protéase, et phosphomonoestérase), en utilisant le maïs comme plante test. Les activités enzymatiques du sol sont connues pour être positivement corrélées avec la teneur en matière organique du sol et avec le C organique soluble du sol (Chang *et al.*, 2007; Gilani et Bahmanyar, 2008). Par ailleurs, l'addition de C dans sol peut affecter la diversité et la composition microbiennes du sol, en augmentant le nombre de niches écologiques et en favorisant une variété d'interactions écologiques entre les organismes (Marschner *et al.*, 2003; Ros *et al.*, 2006; Urra *et al.*, 2019). Les activités microbiennes du sol sont d'une importance particulière car elles sont cruciales dans l'approvisionnement en nutriments des plantes étant donné leur rôle central dans la décomposition de la matière organique du sol et la dynamique des nutriments (Lazcano *et al.*, 2013).

3.3.2. Effets de la matière organique sur la fertilité physique des sols

Du point de vue physique du sol, la MO influence positivement la stabilité des agrégats, qui est un facteur clé dans les questions touchant la fertilité physique du sol. En ce sens, la structure du sol se trouve améliorée (porosité du sol, densité apparente du sol, capacité de rétention en eau du sol – Leroy *et al.*, 2008a; Liu *et al.*, 2014), avec des effets positifs concomitants sur le fonctionnement du sol et la productivité des cultures (Van-Camp *et al.*, 2004). Les sols riches en MO deviennent plus résistants aux processus d'érosion (Annabi *et al.*, 2007) et à la sécheresse (Bot, 2005). La matière organique stabilise la structure du sol par au moins deux mécanismes différents : (i) en augmentant la cohésion inter-particules au sein des agrégats et (ii) en améliorant leur hydrophobicité. L'effet principal des MO est en effet directement lié aux processus de décomposition par les microorganismes du sol (Lynch et Bragg, 1985). Les exopolysaccharides synthétisés par les microorganismes du sol ont été depuis longtemps désignés comme un des agents améliorant la stabilité structurale (Acton *et al.*, 1962). En particulier au début de la décomposition de la matière organique, ces composés agissent comme des liants de résistance faible et ont tendance à adsorber les particules minérales et à augmenter leur inter-cohésion (Van-Camp *et al.*, 2004). Cette action agrégeante s'observe sur des pas de temps plus courts. Les produits riches en composés humiques, tels que les fumiers ou les composts, devraient également augmenter l'hydrophobicité globale des argiles (Abiven *et al.*, 2008), en raison de la concentration accrue de colloïdes humiques dans le sol (Dorado *et al.*, 2003). Les composés humiques participent à l'amélioration de la stabilité structurale sur des pas de temps plus longs (Fortun *et al.*, 1989). La croissance des hyphes mycéliens peut influencer également l'agrégation du sol et la stabilité des agrégats (Rillig et Mummey, 2006 ;

Six et Paustian, 2014) grâce à la formation de larges structures arborescentes (Oades et Water, 1991). Une diminution notable de la densité apparente du sol, en moyenne de 15%, s'observe après addition à long terme de compost ou du fumier de ferme, ce qui correspond à une augmentation de la porosité du sol (Saviozzi *et al.*, 1999; Meng *et al.*, 2005; Tejada *et al.*, 2008). L'augmentation de la porosité réduit la formation des croûtes qui pourrait restreindre le mouvement de l'eau et de l'air à travers la matrice du sol (Zebarth *et al.*, 1999). Ces changements facilitent le développement des racines et améliorent la qualité de l'espace habitable par les communautés biologiques du sol (Urrea *et al.*, 2019).

3.3.3. Effets de la matière organique sur la fertilité chimique du sol

En plus d'améliorer les propriétés biologiques et physiques du sol, les fertilisants organiques sont connus pour influencer positivement les propriétés chimiques du sol. Les effets positifs susmentionnés sur les communautés microbiennes du sol sont souvent liés à des changements des caractéristiques chimiques du sol. Les fertilisants organiques peuvent avoir un effet direct sur la fertilité chimique des sols en fournissant une grande variété de macro- et micronutriments, qui soutiennent la croissance végétale et microbienne (Edmeades, 2003). Ils peuvent affecter le pH du sol et modifier la CEC, influençant ainsi indirectement la disponibilité et la rétention des nutriments. L'augmentation du stock de carbone organique correspond à une augmentation de la charge négative dans le sol capable de retenir des éléments et par conséquent la CEC (Diacono et Montemurro, 2010). Mandal *et al.* (2007) ont signalé, dans une expérience de fertilisation à long terme (de 7 à 35 ans) de cinq systèmes de riziculture différents, que l'ajout de fumier de ferme à raison de 5 à 10 t ha⁻¹.an⁻¹, ou du compost combiné avec du NPK minéral équilibré, a augmenté le carbone organique de 10,7%. Certains fertilisants organiques contiennent de grandes quantités de Ca et/ou de Mg, qui peuvent avoir un « effet de chaulage » sur les sols acides, augmentant leur pH (Whalen *et al.*, 2000). Aussi, sur des expérimentations à long terme, des effets résiduels de l'application de fertilisants organiques sur la production agricole et les propriétés du sol peuvent durer plusieurs années, car une seule fraction de nutriments devient disponible pour les plantes au cours de la première année d'épandage (Hartl *et al.* 2003; Eghball *et al.*, 2004). Tittarelli *et al.* (2007) ont estimé que le N disponible suite à un apport de compost au cours de la première année d'application est de 30–35% de la teneur totale en N du compost. La partie restante de l'azote qui peut être minéralisée est considérée comme disponible pour les plantes au cours des 2 années suivantes à un taux décroissant. En ce qui concerne le P, He *et al.* (2001) ont rapporté que les applications de compost peuvent augmenter le P phytodisponible dans le sol. Par rapport aux engrais minéraux, une minéralisation plus élevée du P dans les sols et ainsi une absorption de P plus élevée par les plantes avec une fertilisation à base de fumier et de vermicompost a été observée (Lazcano *et al.*, 2013). Cela correspond à une activité plus élevée de la phosphomonoestérase observée dans

les régimes de fertilisation avec de la matière organique (Lazcano *et al.*, 2013; Saha *et al.*, 2008).

Les effets de la matière organique sur les fertilités biologique, chimique et physique du sol auront des conséquences positives sur le développement et la croissance des cultures et donc sur le rendement. Sur une expérience à long terme (1991-2015), Cai *et al.* (2019) ont montré que le rendement moyen du maïs passait de 2,65 t ha⁻¹ avec du NPK à 3,89 t ha⁻¹ avec du fumier de porc, pour une quantité équivalente d'azote apportée. Hue (1992) a montré que la concentration en Ca dans la biomasse totale du *Desmodium intortum* était de 1,14% après un traitement avec du fumier de volailles contre 0,74% avec une application de chaux (CaCO₃) bien que la quantité de Ca apportée soit similaire. De plus, ces effets ont conduit à une augmentation considérable de la biomasse totale obtenue, qui passait de 1,72 g pot⁻¹ avec la chaux à 4,20 g pot⁻¹ avec le fumier. Ces résultats suggèrent que (i) le Ca dérivé du fumier pourrait être intrinsèquement plus disponible pour les plantes que le Ca dérivé de la chaux, et/ou (ii) les réactions entre les molécules organiques du fumier et les composants minéraux du sol réduiraient la rétention de Ca par la solide phase ; cela permettrait au Ca de rester plus longtemps dans la solution du sol et d'être plus disponible pour les plantes.

3.3.4. *Importance de la matière organique sur la fertilité des Ferralsols*

Les contraintes de mise en valeur des Ferralsols acides des régions tropicales ont été développées dans le paragraphe §2.1. Pour rappel, deux facteurs fondamentaux limitent la fertilité des sols acides ; la forte déficience en nutriments tels que le P, Ca et Mg, et la présence des substances phytotoxiques à l'exemple de l'Al libre (Haynes et Mokolobate, 2001). Ainsi, les études concernant l'amélioration de la fertilité des Ferralsols se sont concentrées principalement, jusqu'à présent, sur l'amélioration de l'acidité du sol, la réduction de la phytotoxicité aluminique et l'augmentation de la phytodisponibilité du P (e.g. Andriamananjara *et al.*, 2018; Fageria et Baligar, 2008; Haynes et Mokolobate, 2001; Hue, 1992).

- *Amélioration du pH du sol*

Le chaulage, c'est-à-dire l'application du CaCO₃, est la pratique commune pour augmenter le pH des sols acides à un niveau adéquat (Fageria et Baligar 2008). Pourtant, celui-ci doit être appliqué à une dose largement élevée, entre 2 et 10 T.ha⁻¹, pour satisfaire la croissance optimale des cultures (Haynes et Mokolobate, 2001). Comme alternative, l'efficacité de l'« effet chaulage » des résidus organiques a été prouvée par de nombreuses études (à l'exemple de Haynes et Mokolobate, 2001; Hue, 1992; Materechera et Mkhabela, 2002). Materechera et Mkhabela (2002) ont mesuré une efficacité supérieure de chaulage de 12% et 26% par rapport à la chaux, des cendres et du fumier de volailles, respectivement. Mokolobate et Haynes (2002) ont montré une augmentation du pH du sol d'environ 0,5 unité après l'application d'un compost de déchets ménagers, comparé au traitement témoin (sans apport), après 6 semaines

d'incubation d'un sol acide. L'élévation du pH grâce à l'utilisation des fertilisants organiques fait intervenir les mécanismes suivants (Haynes et Mokolobate, 2001; Mokolobate et Haynes, 2002; Whalen *et al.*, 2000) : (i) l'oxydation des anions organiques acides au cours la décomposition des composés organiques qui entraîne la consommation des protons H^+ (ou une libération de OH^-) ; (ii) l'ammonification des composés azotés qui libère des ions OH^- ; (iii) l'adsorption des molécules organiques (matières humiques et /ou acides organiques) sur les hydroxydes d'Al ou de Fe qui a pour conséquence la libération des ions OH^- ; et finalement (iv) la teneur substantielle en $CaCO_3$ et en cations (Ca, Mg, K) des fertilisants organiques qui neutralise l'acidité des sols. Par conséquent, la fertilisation organique augmente considérablement la teneur en éléments nutritifs du sol, principalement, le P, le K, le Ca et le Mg (Abbott *et al.*, 2018).

- **Réduction de la toxicité aluminique**

Outre le rôle des MO sur la correction de l'acidité des Ferralsols, de nombreuses littératures ont montré qu'elles pouvaient également altérer la toxicité aluminique des cultures, augmenter la disponibilité du P pour les plantes et diminuer la capacité d'adsorption du P de ces sols (Hue, 1992; Iyamuremye et Dick, 1996). Naramabuye et Haynes, (2006) ont signalé que l'Al échangeable a diminué d'environ 50% par rapport au témoin (aucun apport) lorsque le sol est fertilisé avec du fumier d'animaux à raison de 10 mg.g^{-1} de sol, et cette réduction de la teneur en Al échangeable est encore plus remarquable à une dose plus élevée. Hue (1992) a indiqué qu'avec l'utilisation de fumier d'animaux (à une dose de 5 g.kg^{-1} de sol), le P extrait au $NaHCO_3$ augmentait approximativement de $1,76 \text{ mgP.kg}^{-1}$ (moyenne obtenue avec le sol non fertilisé et le sol fertilisé avec de la chaux) à $3,75 \text{ mg P kg}^{-1}$.

Lors de la décomposition des débris végétaux et animaux, une gamme de composés organiques est libérée à partir des résidus et/ou synthétisés par les microorganismes décomposeurs. Les composés humiques solubles ainsi que les acides organiques sont impliqués dans la réduction de la phytotoxicité de l'Al et l'augmentation de la phytodisponibilité du P dans les sols acides (Harper *et al.*, 1995; Nziguheba *et al.*, 2000; Stevenson et Vance, 1989).

La détoxification de l'Al due à l'apport des résidus organiques implique les processus suivants : (i) l'augmentation transitoire du pH du sol après décomposition des MO fraîchement ajoutées induit une précipitation de l'Al échangeable et soluble dans la solution du sol en composés insolubles et une diminution de la saturation en Al du site d'échange (Wong *et al.*, 1998) ; (ii) la libération des substances humiques solubles et des acides organiques entraîne l'adsorption de l'Al soluble sur leurs surfaces ou la précipitation de l'Al avec l' OH^- libéré des réactions d'oxydo-réduction et/ou d'échange de ligands ; et finalement (iii) l'augmentation de la teneur en MO du sol nouvellement formées entraîne la complexation de l'Al sur celle-ci (Haynes et Mokolobate, 2001). L'effet détoxifiant des anions organiques acides peut être divisé en trois

groupes : (i) fort (dont les acides citrique, oxalique, tartrique), (ii) modéré (dont les acides malique, malonique, salicylique) et (iii) faible (dont les acides succinique, lactique, formique, acétique, phtalique) (Hue *et al.*, 1986).

- ***Amélioration de la phytodisponibilité du phosphore***

Quatre mécanismes sont proposés pour expliquer les effets positifs des fertilisants organiques sur l'amélioration de la disponibilité du P par les plantes : (i) la solubilité des ions phosphates associés aux hydroxydes de Fe et d'Al augmente grâce aux acides organiques (citrique et malique) qui sont capables de former des complexes stables mais solubles avec les ions Fe et Al (Kucey *et al.*, 1989) ; (ii) les composés humiques solubles ainsi que les acides organiques, chargés négativement, peuvent être adsorbés sur les oxydes d'Al et de Fe en surface rendant ainsi un site de compétition avec les ions orthophosphates (Haynes et Mokolobate, 2001); (iii) un effet transitoire de l'augmentation du pH réduit la sorption des ions orthophosphates (Haynes et Mokolobate, 2001); (iv) l'amélioration de l'humidité du sol en présence de certains résidus organiques (fumiers, composts) en relation avec l'amélioration de la capacité de rétention en eau du sol améliore la mobilité du P (Rakotoson *et al.*, 2016). Par ailleurs, lors d'une application continue de fertilisants organiques, à mesure que les résidus organiques se décomposent, le P est libéré et celui-ci peut être adsorbé sur les surfaces d'oxyde. Cela réduira à son tour le degré d'adsorption du P ajouté ultérieurement, augmentant ainsi la disponibilité du P (Haynes et Mokolobate, 2001). Aussi, l'ajout de MFO favorise l'activité des vers de terre, qui à leur tour, améliorent significativement la phytodisponibilité du P grâce à la modification du pH et à l'excrétion des composés organiques produits dans l'intestin des vers de terre (Chapuis-Lardy *et al.*, 2009).

- ***Amélioration de l'efficacité d'utilisation du phosphore et du stock en P disponible***

Dans les sols acides, le P issu des engrais minéraux peut être principalement et rapidement sorbé sur les oxyhydroxydes d'Al et de Fe, réduisant ainsi sa disponibilité et rendant l'utilisation de ces engrais inefficace (Nishigaki *et al.*, 2018). L'apport des ressources organiques est une gestion de fertilisation qui améliore l'efficacité de l'utilisation de P (Andriamananjara *et al.*, 2018; Simpson *et al.*, 2011). Sur les Ferralsols des Hautes Terres de Madagascar, Andriamananjara *et al.* (2018) ont démontré que l'efficacité d'utilisation du P dans la biomasse aérienne de la combinaison du triple superphosphate avec un apport de fumier de bovins à une dose de 10 T. ha⁻¹ était de 22% pendant 3 années continues d'application, contre 14% lorsque le TSP est apporté seul. A doses équivalentes de P, l'application du fumier de bovins, seul ou en combinaison avec du TSP entraîne également une augmentation du rendement du *Vigna subterranea* et du riz pluvial et de l'efficacité agronomique par rapport à l'application du TSP seul (Andriamananjara *et al.*, 2019). L'augmentation du rendement s'explique par les effets positifs des MO sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, et

particulièrement l'amélioration de la phytodisponibilité du P et la réduction de la phytotoxicité aluminique. Une meilleure efficacité d'utilisation de fumier de bovin est associée à une absorption plus élevée de P, suggérant que le P dérivé du fumier ou du sol est utilisé efficacement et est plus accessible et disponible pour les cultures que le P dérivé du TSP (Andriamananjara *et al.*, 2019).

En outre, les MO apportées deviennent le centre d'une zone très favorable au développement des microorganismes. La biomasse microbienne du sol représente un pool considérable de P contenant au moins 0,5% à 7,5% du P total dans les sols des prairies, et 0,4% à 2,4% du P total dans les sols arables (Oberson et Joner, 2005). Par ailleurs, les pratiques agricoles incluant l'utilisation des fumiers, composts ou cendres (Buehler *et al.*, 2002; Margenot *et al.*, 2017) accroissent les sources potentielles de P phytodisponible. En effet, le P phytodisponible peut être stocké dans deux compartiments du sol : (i) le P dans les composés organiques phosphatés qui devient disponible après minéralisation, et (ii) les ions orthophosphates sorbés sur la phase solide du sol, qui deviennent phytodisponibles par désorption (Becquer *et al.*, 2014; Hinsinger, 2001). Le pool de P organique peut représenter 6,7 à 29% du P total dans les rizières de Madagascar (Nishigaki *et al.*, 2018).

- ***Augmentation de la capacité de rétention en nutriments du sol***

La CEC est souvent faible dans les Ferralsols due à la faible activité des argiles minéralogiques dominées par la kaolinite. La faible capacité de rétention en nutriments des sols lessive fortement les éléments mobiles, tels les engrais azotés inorganiques, lors des fortes pluies tropicales, limitant l'efficacité des fertilisations conventionnelles (Giardina *et al.*, 2000 ; Renck et Lehmann, 2004). La MOS étant souvent la principale source de charge négative dans les sols tropicaux, son maintien est important pour l'adsorption des cations échangeables (Duxbury *et al.*, 1989). Tiessen (1994) affirme que la MOS constitue le premier réservoir des nutriments des Ferralsols pour les plantes car elle peut contenir jusqu'à 95% de l'N total et du S total et 20 à 75 % du P total. L'augmentation de la CEC est attribuée à une augmentation de la teneur en MOS (Gao et Chang, 1996 ; Miller *et al.*, 2016) formant un complexe argilo-humique stable capable de retenir des éléments nutritifs. Aussi, selon le taux de minéralisation, les MFO tels que le compost, le paillis ou le fumier libèrent progressivement les nutriments (Burger et Jackson, 2003) et peuvent être plus appropriées pour la rétention des nutriments dans des conditions de lixiviation élevée que les engrais synthétiques (Steiner *et al.*, 2007).

4. Approches méthodologiques pour dresser une typologie des matières fertilisantes et pour proposer des assemblages performants : Deux types d'approche

La combinaison des apports en matières fertilisantes organiques et minérales offre des avantages sur la fertilité à long terme du sol grâce à l'accumulation de la MOS avec les apports organiques, et remédie les carences en nutriments à court terme du sol grâce aux intrants minéraux. Les impacts des MF seules sur la fertilité du sol et leurs réponses sur le rendement varient largement, même au sein d'une même catégorie de matière (Palm *et al.*, 2001a; Vanlauwe *et al.*, 2001). Ces différences ont été attribuées principalement aux différences de qualité des matières et de l'état de fertilité du sol (Giller et Cadisch 1995; Palm *et al.*, 2001b). Étant donné que la qualité des matières affecte le taux de décomposition des résidus, la quantité d'immobilisation d'azote et le moment de la libération des nutriments (Heal *et al.*, 1997), elle influencera probablement l'interaction entre différentes matières.

Pour faciliter la sélection et la gestion des MF, il est important de définir les critères permettant de mieux anticiper l'effet des apports sur la dynamique de libération des nutriments dans le sol (Palm et Sanchez, 1991). Ainsi, leur valorisation requiert une maîtrise de leurs caractéristiques intrinsèques. Swift *et al.* (1979) désignent ces caractéristiques sous le terme de qualité de la MF. Les matières fertilisantes sont caractérisées au laboratoire par les méthodes suivantes : (i) la détermination de leurs teneurs totales en éléments nutritifs (C, N, P, K, Ca, Mg, ...); (ii) le fractionnement biochimique utilisant la méthode Van Soest; et (iii) l'étude des cinétiques de minéralisation du carbone et de l'azote au cours d'incubation en conditions contrôlées du mélange sol et MF. Le fractionnement Van Soest divise les composés organiques carbonés des MF en quatre compartiments selon leur biodégradabilité: l'équivalent soluble, hémicellulose, cellulose et lignine (Derenne et Largeau, 2001; Van Soest, 1963). Les composés équivalent soluble et facilement accessibles, qui définissent la fraction labile facilement minéralisés, sont principalement décomposés par les bactéries, tandis que les équivalents cellulose et lignine, qui sont moins facilement décomposables et conduisent à la formation des substances humiques, sont plutôt dégradés par les champignons (Swift *et al.*, 1979).

La connaissance *a priori* des caractéristiques des MF a été le plus souvent utilisée pour dresser une typologie ou une catégorisation des matières en fonction de leur disponibilité en nutriments (e.g. Lashermes *et al.*, 2009; Palm *et al.*, 2001a). Cette démarche se base sur des caractères pré-mesurés des matières sans utilisation de plante test et fournit des paramètres prédictifs sur le modèle de libération des nutriments par les intrants organiques. Récemment, une approche de classification *a posteriori* est possible à l'aide d'un modèle combinatoire (Jaillard *et al.*, 2018a, 2018b). Celui-ci consiste à préparer différents assemblages de matières, de fertiliser le sol avec ces mélanges et de construire une typologie des matières en se basant sur les réponses de ces assemblages (réponses sur les paramètres de fertilité du sol et/ou de développement de la

plante). Le modèle optimise l'explication des réponses observées en répartissant les matières fertilisantes dans des groupes.

4.1. Approche *a priori*

Le rapport C/N initial des ressources organiques est le plus utilisé comme indice pour évaluer la décomposition et la minéralisation en carbone et en azote des MO (Constantinides et Fownes, 1994; Heal *et al.*, 1997; Mafongoya *et al.*, 2000; Nicolardot *et al.*, 2001). Sur la seule connaissance du rapport C/N, il est généralement accepté que les matières avec un rapport C/N élevé se décompose plus lentement que celles avec un C/N plus faible (Parr et Papendick, 1978). L'étude de Mafongoya *et al.* (2000) sur des fumiers d'animaux et des feuilles d'arbres a montré que le C-CO₂ cumulé (en mg C-CO₂.kg⁻¹ de sol) était significativement corrélé avec la teneur initiale en N ($R^2= 0,83$; $p<0,05$) et le rapport C/N des intrants organiques ($R^2=0,80$; $p <0,05$). A partir des différents résidus de culture, Nicolardot *et al.* (2001) ont prédit efficacement la cinétique de minéralisation de l'N en utilisant le rapport C/N initial des résidus comme seul paramètre du modèle. Pourtant, ce rapport ne fournit pas toujours une corrélation significative avec le taux de décomposition et les cinétiques de minéralisation de C et de N des apports organiques (Recous *et al.*, 1995; Kumar et Goh, 2000). D'autres composants biochimiques tels que la lignine et les polyphénols (Constantinides et Fownes, 1994; Mafongoya *et al.*, 2000; Palm and Sanchez, 1991) influencent également la minéralisation nette de l'N et fournissent une base plus complète pour expliquer la cinétique de minéralisation de C et de l'N (Lashermes *et al.* 2009). Par exemple, au cours d'une incubation pendant 8 semaines des feuilles de légumineuses des régions tropicales, Palm et Sanchez (1991) ont trouvé que la minéralisation nette de l'N est corrélée négativement avec la teneur en polyphénols ($R^2= 0,63$) des matières ou bien avec leur rapport polyphénol/N ($R^2= 0,75$). Sur la base de ces paramètres, certains auteurs ont proposé une classification en grappes regroupant les MF selon des critères de composition et des taux de minéralisation similaires (Parnaudeau *et al.*, 2004 en travaillant sur les eaux usées industrielles ; Morvan *et al.*, 2006 sur les déchets d'animaux ; Palm *et al.*, 2001a sur les résidus végétaux ; Lashermes *et al.*, 2009 sur une large gamme de produits organiques).

La base de données, *Organic Resource Database*, développée par Palm *et al.* (2001a) incorpore des données de près de 300 espèces végétales dans les agrosystèmes tropicaux et a conduit à l'élaboration d'un système de classification conceptuel pour le mode de gestion des résidus organiques. Leur typologie divise les résidus en quatre classes de qualité basées sur leurs teneurs en N, lignine et polyphénols. La classe I regroupe les résidus organiques de haute qualité caractérisés par une libération rapide des nutriments en particulier l'N et peut être incorporée, seule, directement au sol. La classe IV est considérée comme regroupant les matières de faible qualité et pouvant être appliquées en tant que mulch à la surface du sol pour le contrôle de l'érosion. La classe IV induit une immobilisation de l'azote qui peut durer pendant de longues périodes. En revanche, les résidus organiques de qualité intermédiaire, c'est-à-dire

les classes II et III, doivent être ajoutés en combinaison avec des engrais azotés pour atténuer la libération lente de nutriments due à une teneur élevée en composés récalcitrants de la classe II et à une faible teneur en N de la classe III.

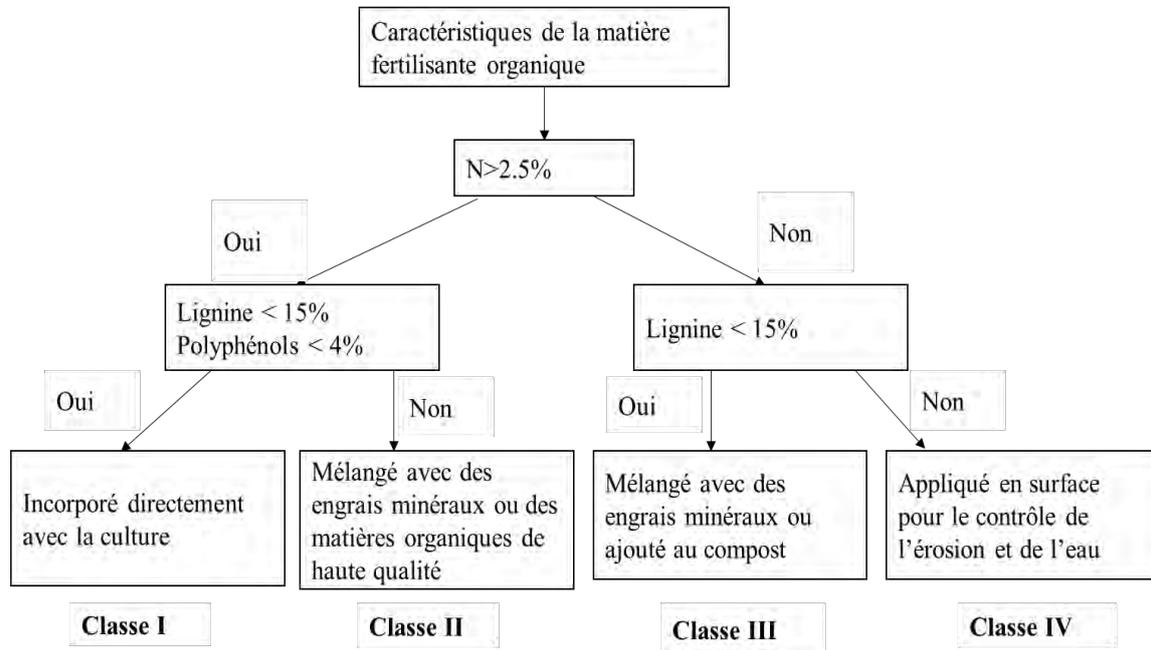


Figure 2 : Classification des résidus organiques en quatre catégories selon leur mode de gestion à partir de leurs teneurs en azote (N), lignine et polyphénols, d'après Palm *et al.*, 2001a.

Une formulation de la combinaison des apports peut ainsi être proposée à partir de ces typologies de matières, vis-à-vis de N. L'azote des MF de haute qualité ou qui ont un potentiel de minéralisation élevé peut être facilement perdu par lessivage s'il n'est pas libéré en synchronie avec la demande de la plante. L'azote des matières fertilisantes de faible qualité ou qui sont susceptibles à l'immobilisation peut ne pas être suffisant pour la croissance de la plante à court terme, et ralentir son développement. Une meilleure gestion des matières fertilisantes consiste de ce fait à combiner les deux types de fertilisants. Assemblées, l'azote minéral libéré par les matières de haute qualité (ou l'azote d'un fertilisant synthétique) sera immobilisé par les microorganismes et libéré ensuite à un rythme plus lent, minimisant ainsi sa perte et le mettant à la disposition de la plante à un rythme probablement similaire à l'absorption (Agegnehu *et al.*, 2015; Bekunda *et al.*, 2010; Chivenge *et al.*, 2011; Gentile *et al.*, 2011).

4.2.Approche a posteriori

Contrairement à l'approche *a priori* qui se base sur les caractéristiques et les mesures potentielles des matières, une classification *a posteriori* des matières identifie des groupes ou classes des matières en fonction des effets d'interaction réellement observés sur une fonction ciblée (Jaillard *et al.*, 2018a, 2018b). En d'autres termes, il s'agit de la mesure de la performance

des assemblages ou de leurs réponses sur un ou des paramètres donnés. La prédiction des interactions existant entre les assemblages, se basant sur des critères *a priori* des matières, peut paraître difficile du fait que de nombreuses interactions positives ou négatives ou même neutres peuvent se produire au sein des assemblages. Palm *et al.* (2001a) dans la construction de la base de données *Organic Resources Database* ont bien précisé que l'ORD peut fournir des hypothèses à tester pour la gestion de la fertilité des sols ; autrement dit la validation de l'arbre de décision nécessite des expériences en microcosmes ou en conditions réelles (e.g. Chivenge *et al.*, 2011; Vanlauwe *et al.*, 2005).

Le modèle combinatoire, qui est l'outil pour la classification *a posteriori* des entités (Jaillard *et al.* 2018a, 2018b), est une approche utilisée en écologie pour quantifier les relations entre la biodiversité et le fonctionnement d'un écosystème. Cette approche décrit les écosystèmes comme des assemblages de groupes (fonctionnels) d'espèces ou de composants, appelés motifs d'assemblages. Les composants classés dans un même groupe fonctionnent de manière identique et expriment les mêmes performances ou réponses (ex. sur la production de biomasse, les propriétés du sol, l'activité microbienne, ...). Aussi, l'assemblage des entités d'un même groupe n'interagissent pas entre elles. Les composants d'un même groupe auront également le même comportement lorsqu'ils seront mélangés avec des composants d'un autre groupe.

Plus précisément, le modèle montre comment la performance des assemblages ou le fonctionnement d'un écosystème, c'est-à-dire les interactions qui existent entre les entités/espèces, peut être déterminée en s'appuyant uniquement sur la connaissance de ses composants ou sa composition spécifique. L'explication du fonctionnement des assemblages se base sur la classification des composants dans des groupes en fonction de leurs effets sur une réponse observée, et pour laquelle l'ajustement aux données observées est maximisé. La procédure repose sur un processus itératif qui améliore pas à pas un critère de convergence. Le critère de qualité du modèle utilisé est le coefficient de détermination du regroupement des composants (Jaillard *et al.*, 2018b). Dans l'ensemble, le modèle construit un arbre hiérarchique de division des composants en groupes qui optimise l'explication des réponses observées.

5. Objectifs, hypothèses et organisation de la thèse

La faible fertilité native des Ferralsols des Hautes Terres pour le développement de la riziculture de pente (ou de colline) contraint fortement l'atteinte de la productivité alimentaire et de la sécurité alimentaire du pays. Cette situation est accentuée par la faible gestion de la fertilité des sols qui se caractérise par des apports faibles voire inexistantes en fertilisants entraînant l'épuisement des nutriments des sols et ainsi sa dégradation. Le recours à la fertilisation qu'elle soit organique ou minérale est inévitable pour améliorer ou restaurer la fertilité de ces sols. La combinaison de divers types de fertilisants a été démontrée comme étant une technique particulièrement efficace, mais cela requiert une typologie bien fondée des matières afin de profiter des interactions positives (synergiques ou complémentaires) qui peuvent se créer.

Deux approches méthodologiques conceptuellement différentes mais complémentaires existent pour identifier des assemblages performants des matières fertilisantes. La classification des matières pour la première approche se base sur des connaissances *a priori* des qualités des matières, alors que la seconde propose une classification des matières par rapport aux réponses des assemblages testés sans connaître au préalable les caractéristiques des matières. Cette dernière est qualifiée de typologie *a posteriori* des matières et a été appliquée jusque-là en écologie pour les études entre la biodiversité et le fonctionnement d'un écosystème.

Notre étude tente ainsi de combiner le concept des deux approches pour améliorer la fertilité des Ferralsols des Hautes Terres de Madagascar. L'approche *a posteriori* offre une classification des composants basée sur les effets d'interaction réellement observés tandis que les informations *a priori* des matières peuvent être utilisées pour formuler les hypothèses explicatives des résultats de la classification *a posteriori*.

Les questions de recherche que nous nous sommes posées sont de savoir :

- Quels éléments nutritifs limitent la productivité du riz pluvial des Hautes Terres de Madagascar ?
- Dans quelle mesure les matières fertilisantes diffèrent entre elles en termes de composition élémentaire et en termes de disponibilité en nutriments ?
- La combinaison des approches *a priori* et *a posteriori* permet-elle d'élaborer une typologie des matières fertilisantes et d'identifier les assemblages qui permettent d'améliorer la fertilité des Ferralsols des Hautes Terres de Madagascar ?

Les hypothèses de recherche avancées sont :

Hypothèse 1. *Les Ferralsols des Hautes Terres de Madagascar présentent des carences nutritionnelles multiples, notamment en P, en N et en cations basiques, mais également en S et en micronutriments.*

Hypothèse 2 : *Les matières peuvent être classées dans différents groupes selon leurs effets sur le sol et la plante, et les assemblages des groupes expliquent de manière satisfaisante les paramètres mesurés sur la fertilité des sols, la croissance et la nutrition des plantes.*

Hypothèse 3 : *La connaissance a priori des caractéristiques intrinsèques des matières constitue un élément informatif essentiel pour expliquer l'appartenance des matières dans des groupes fonctionnels, établis par l'approche a posteriori.*

L'objectif principal de notre étude consiste ainsi à **proposer une stratégie innovante de méthode d'assemblages de matières fertilisantes pour accroître la fertilité des sols des Hautes Terres de Madagascar destinés à la riziculture pluviale**. De cet objectif découle les trois objectifs spécifiques et successifs, qui forment les trois grandes parties de notre travail de recherche.

● **Partie I. Carences nutritives des Ferralsols : Cas du riz pluvial à Madagascar**

Le point de départ du processus d'amélioration ou de restauration et de la gestion de la fertilité des sols est l'évaluation de l'état des éléments nutritifs en hiérarchisant les nutriments les plus limitants. Ces informations sont cruciales pour développer des formulations de combinaisons de matières fertilisantes pour des sols et des cultures spécifiques. Le diagnostic de la fertilité des sols a été évalué à l'issue d'un essai soustractif. L'essai soustractif est une méthode expérimentale qui permet une hiérarchisation des facteurs nutritifs les plus limitants en appliquant la loi de Liebig sur le minimum.

Ainsi, le premier objectif vise à **identifier et hiérarchiser les éléments nutritifs dont les carences limitent la productivité du riz pluvial sur les Ferralsols des Hautes Terres de Madagascar**. Ce travail se base sur des expériences de fertilisation soustractives en conditions contrôlées pendant lesquelles différents nutriments seront testés.

● **Partie II. Caractéristiques des matières fertilisantes organiques et minérales disponibles des Hautes Terres de Madagascar**

Une large gamme de matières fertilisantes existe pour remédier les carences en nutriments des Ferralsols, allant des matières organiques non transformées aux matières minérales issues des gisements. Combinés, les interactions entre les types d'intrants peuvent directement améliorer l'efficacité de l'utilisation des éléments nutritifs et réduire les pertes d'éléments nutritifs.

Avant de proposer une typologie des matières, le deuxième objectif est de **définir les propriétés analytiques des matières fertilisantes organiques et minérales existantes sur les Hautes Terres de Madagascar à l'aide d'analyses physicochimiques standard en laboratoire et des essais spécifiques.**

Cette partie est divisée en deux chapitres:

- **Chapitre II.1. Composition élémentaire et dynamique de minéralisation du carbone et de l'azote des matières fertilisantes organiques et minérales disponibles sur les Hautes de Terres de Madagascar**

Cette partie a pour objectif de *déterminer les caractéristiques initiales des matières fertilisantes et de présenter leurs effets sur le sol, en insistant sur leur valeur amendante et leur valeur fertilisante azotée.* La valeur amendante, à l'aide de la teneur en carbone et du suivi de minéralisation du C, détermine la capacité des matières à entretenir le stock de carbone organique du sol pour maintenir sa fertilité (AFNOR, 2011). La valeur fertilisante azotée, à l'aide du suivi de minéralisation de N, correspond à l'aptitude des matières à fournir de l'azote aux plantes (AFNOR, 2011). La minéralisation du carbone sous forme de CO₂ et la quantité d'azote minéralisé au cours du temps ont été déterminées par des expériences en microcosmes au laboratoire.

- **Chapitre II.2. Analyse de la phytodisponibilité du P induite par les matières fertilisantes organiques et minérales à l'aide de l'échange isotopique**

Cette partie traite de *l'évaluation de la variation de la quantité des ions orthophosphates (ions-P) disponibles après application de différentes matières fertilisantes, à l'aide de l'échange isotopique, et de modéliser la phytodisponibilité du P en fonction des paramètres des matières.*

L'étude sur l'effet des matières fertilisantes à fournir du P phytodisponible semble essentielle dans la mesure où leur application modifie à la fois les propriétés physico-chimiques du sol qui régulent la phytodisponibilité du P et la teneur en P du sol capable de participer à la nutrition de la plante. En effet, il est admis par nombreux auteurs que les racines des plantes absorbent les ions orthophosphates (ions-P= H₂PO₄⁻ et HPO₄²⁻) présents dans la solution du sol et ceux susceptibles de passer entre les deux interfaces solide-solution du sol sous l'effet de la diffusion (Fardeau, 1996 ; Morel et Planchette, 1994).

La quantification des ions-P induites par l'addition des MF est évaluée au moyen d'une approche mécaniste qui consiste à déterminer la concentration des ions-P dans la solution du sol (C_P) et la dynamique de la quantité des ions-P du sol susceptibles de participer au maintien de l'équilibre sol-solution (Pr). Le couplage de deux expériences décrit expérimentalement la dynamique du transfert des ions-P diffusibles, et nécessite l'utilisation des marquages

isotopiques : la première consiste à une expérience de sorption/désorption et la deuxième à des expériences de marquage isotopique des ions-P de la solution suivie d'une analyse de la dilution isotopique (Fardeau, 1993; 1996). La quantité des ions-P diffusibles est ensuite paramétrée par la fonction, appelée équation cinétique de Freundlich.

● **Partie III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols**

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la fois à l'approche *a priori* et à l'approche *a posteriori* des matières fertilisantes afin de proposer une typologie et des assemblages qui permettent d'améliorer la fertilité des Ferralsols des Hautes Terres de Madagascar et la production rizicole de colline. Jusqu'alors, l'approche *a posteriori* a été utilisée pour les études entre la biodiversité et le fonctionnement d'un écosystème, par exemple l'interaction entre des espèces de bactéries sur l'oxydation de la xylose (Langenheder *et al.*, 2010) ou l'interaction entre des espèces de plantes sur la production de biomasse (Tilman, 2001). L'approche *a posteriori* à l'aide du modèle combinatoire peut prédire la performance des assemblages des matières sans aucune information sur la qualité des matières. Elle ne nécessite que la connaissance des composants des assemblages et la réponse qu'on souhaite mesurer des assemblages (ex. sur la biomasse de la plante, la teneur en nutriments, des changements au niveau du sol). Jaillard *et al.* (2018a) ont démontré que l'approche *a posteriori* est plus précise et plus efficace que l'approche *a priori*. Néanmoins, les deux approches sont complémentaires pour la définition d'une typologie d'un système interactif.

Une fois les caractéristiques intrinsèques des matières étudiées, le troisième objectif visera à **établir par approche *a posteriori*, une typologie des matières possédant les mêmes réponses (vis-à-vis de la croissance du riz) afin d'identifier les assemblages qui améliorent la fertilité des Ferralsols et la nutrition de la plante.**

A partir des éléments issus de la partie II, nous essaierons d'expliquer l'appartenance des matières dans une classe en fonction de leur qualité. Cette s'organise sous deux chapitres présentant le même objectif mais à des échelles expérimentales différentes : le premier essai a été réalisé en conditions contrôlées permettant des analyses des fonctions du sol et de la plante, tandis que le second a été effectué en conditions réelles, au champ pour mesurer le rendement.

- **Chapitre III.1. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols – Conditions en serre**

Cette étude est basée sur des expériences d'assemblages des matières fertilisantes menées en conditions contrôlées sous serre. Il s'agit d'un essai qui a duré pendant 57 jours de croissance

de riz et pendant lequel les performances des assemblages ont été évaluées par rapport à la nutrition des plantes de riz, la croissance des plantes de riz, et aux paramètres au niveau du sol.

- **Chapitre III.2. Amélioration de la fertilité des sols à travers l'identification des effets des matières fertilisantes en assemblage - Conditions au champ**

Cette étude est basée sur des expériences d'assemblages réalisées en conditions variables sur terrain. L'essai a duré pendant un cycle cultural du riz pluvial et la performance des assemblages a été évaluée à partir de la hauteur finale des plantes, du nombre de talles fertiles et de rendements en grains et en pailles.

● **Partie IV. Discussion générale et perspectives**

Une dernière partie conclura les principaux résultats de la thèse et apportera les discussions et les perspectives de recherche. Les hypothèses susmentionnées seront également statuées dans cette section.

La démarche adoptée pour cette thèse est résumée dans la Figure 3.

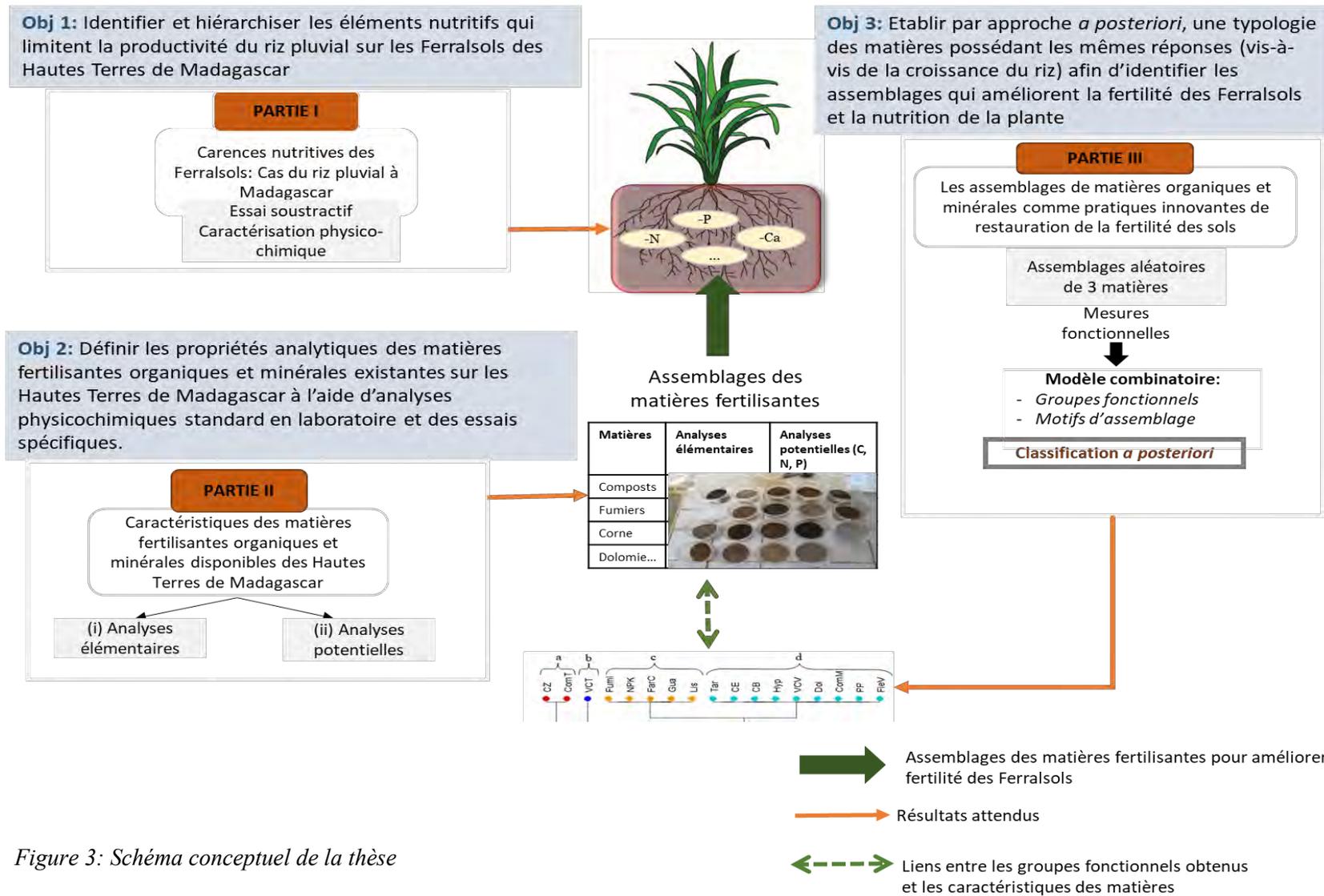


Figure 3: Schéma conceptuel de la thèse

❧ PARTIE I

Carences nutritives des Ferralsols : cas du riz pluvial à Madagascar

Cette partie a été rédigée en anglais sous forme d'un article scientifique et a été publiée dans Journal of Plant Nutrition (43(2), 270-284).

Raminoarison, M., Razafimbelo, T., Rakotoson, T., Becquer, T., Blanchart, E., Trap, J., 2020. Multiple-nutrient limitation of upland rainfed rice in ferralsols: a greenhouse nutrient-omission trial. Journal of Plant Nutrition 43 (2), 270–284.

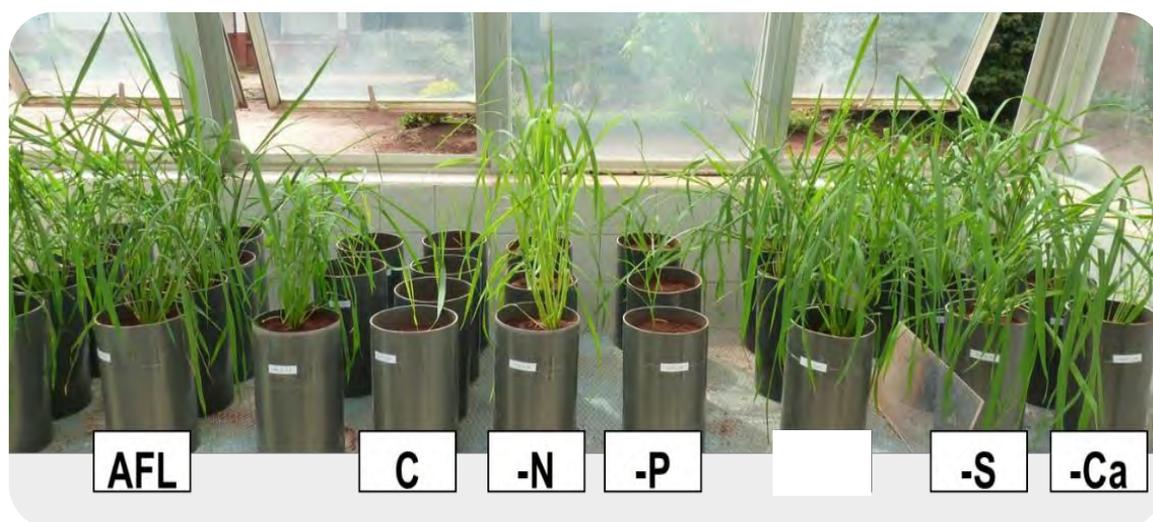


Photo 1: Essai sur l'identification des carences nutritives des sols des Hautes Terres de Madagascar à l'aide d'un essai soustractif, Serre du Laboratoire des Radio Isotopes 2018

1. Introduction

Achieving the demand for staple food crops is a major challenge in Sub-Saharan Africa (SSA) (van Ittersum *et al.*, 2016). This is particularly the case for rice, which consumption is increasing more rapidly in SSA than any other staple food crops (Saito *et al.* 2019). In Africa, rice is an important staple crop and takes a great economic, social, cultural and political place (Dabat *et al.* 2008). Due to world increasing population growth and low field rice yields, rice production is no longer able to meet the needs of consumers, reinforcing food insecurity in these poor countries. This context has resulted in the saturation of irrigated lowland for rice cultivation and in the rapid development of upland rainfed rice cropping systems (Breumier *et al.* 2018).

In Madagascar, rice genetic improvement to face high altitude and cold climate of the highlands made upland rice cropping possible (Raboin *et al.* 2013). This constitutes a key agronomic issue to face rice production in this country. However, annual upland rice yields are not high enough to reach rice self-sufficiency (Breumier *et al.* 2018) and remain well below those of more fertile lowland areas.

The low mineral fertility of the upland Ferralsols, combined with inappropriate nutrient management and expensive mineral fertilizers (Balamurugan and Balasubramanian 2017), strongly limits rice yields (Minten *et al.* 2007). These tropical soils are highly weathered and characterized by a high acidity (pH_{water} usually below 5), a high content of Al toxic forms, an organic matter content usually below 20 g.kg^{-1} , a poor cation exchange capacity and available P content (Deckers 1993). Most of nutrient balances in Ferralsols land use systems are negative (Sanchez *et al.* 1997). According to Cobo *et al.* (2010), negative balances occurred in SSA for > 75% of plots for nitrogen (N) and potassium (K), and for 56% for phosphorus (P). Then, NPK deficiencies are considered major constraints to rice production (Saito *et al.* 2019). However, it is important to note that a large number of fields are not or low responsive to NPK fertilizers (Kihara *et al.* 2016), i.e. NPK addition does not result in higher crop yield. Soils with relatively high pH, low Al concentration, and adequate Ca:Mg, are generally more responsive to fertilizer applications (Kihara *et al.* 2016).

Ferralsols had also low contents of micronutrients (i.e. Zn, B, Mn, Cu, etc.), often below critical limits indicated in the literature (Kihara *et al.* 2016). Some others deficiencies, e.g. sulphur (S) or silicon (Si), were also sometimes considered (Tsujimoto *et al.* 2014; Kihara *et al.* 2016). Our knowledge of how the deficiency of micronutrients affects rice growth in the Ferralsols of Madagascar is yet poor. Addressing secondary and micro-nutrients limitations (Ca, Mg, S, Si, etc.) together with Al toxicity could be a way to improve soil mineral fertility and plant growth.

It appears thus central to clearly identify the nutrient disorders in upland rice systems based on Ferralsols from which appropriate site-specific nutrient management strategies should be

developed. The assessment of soil nutrient status is a key starting point in the process of restoring and managing soil nutrient fertility (Janssen *et al.* 1990; Njoroge *et al.* 2017). In Madagascar and other regions of Africa, as far as we know, most efforts focused on P (Rabeharisoa *et al.* 2012; Rakotoson *et al.* 2014; Saito *et al.* 2019) and/or N (Rakotoson 2017; Zemek *et al.* 2018) while no multiple nutrient-omission trials for upland rainfed rice crop systems have been conducted, limiting our ability to design site-specific nutrient management strategies. Here, using a greenhouse nutrient-omission trial, we aimed at identifying and ranking the nutrients limiting two widespread upland rice cultivars growing on two Ferralsols from Central Madagascar. We used the rice cultivar Chhomrong Dan which is mainly used by farmers in the Eastern Itasy region, and the cultivar Nerica 4 which is mainly used in the Middle-West of Vakinankaratra region. To better understand the relative contribution of soil origin and rice cultivars in rice nutrient limitation, we completed the nutrient-omission trial by a reciprocal soil-cultivar transplant experiment. According to the literature, we expected that N and P were the main nutrients limiting rice crop production in Ferralsols (von Uexküll and Mutert. 1995; Rabeharisoa *et al.* 2012). Because the Ferralsols are usually acidic and depleted in base cations (Raboin *et al.* 2016), we also hypothesised that Ca and Mg act as limiting nutrients.

2. Materials and methods

2.1. Soil sampling

Two soil samples were collected from natural savannah. The first soil was sampled in the Middle-West of the Vakinankaratra region near the locality of Ivory (coded “IV”) (19°33’03’’S; 46°24’37’’E; 908 m asl), on Mesozoic sedimentary rocks; the second one was sampled in the Eastern part of Itasy region, near the locality of Imerintsiatosika (coded “IM”) (19°05’40’’S; 47°25’65’’E; 1480 m asl), on the Precambrian crystalline basement. In both site, the soils were red clay acidic Ferralsols. Both soil samples were under grass savannah (locally called ‘*bozaka*’ vegetation mainly composed of *Aristida sp.* grasses) during at least 30 and 100 years, respectively at IV and IM. Soil samples were collected in September 2017 at 0-20 cm depth using a metal shovel within a ~2 m² area. In the laboratory (Laboratoire des Radio-Isotopes, University of Antananarivo), the soil samples were dried at room temperature for 7 days. Each soil was mixed using the shovel and by hand to homogenize the sample. An aliquot was sieved at 5 mm for the experiment. Another aliquot was sieved at 2 mm and stored at room temperature in the dark for further analyses of soil properties.

2.2. Soil analyses

Total soil organic carbon, total soil nitrogen, and total sulphur were measured by dry combustion in a Flash 2000 CHNS Analyzer (Flash 2000 Series, CHNS/O 122 Analysers

Thermo Scientific, IRCOF, France). The Olsen method (Olsen *et al.* 1954) and resin-extractable P (P resin) using anion exchange resin membranes (BDH no. 55164, 6 cm × 2 cm) in

Table 1 : Main characteristics of the Malagasy soils used in the experiment.

Soil parameters	Units	Sites	
		Imerintsiatosika IM	Ivory IV
Elements			
Total C	g kg ⁻¹	29.2	15.2
Total N	g kg ⁻¹	2.07	1.53
Total P	g kg ⁻¹	1.43	0.38
Total S	g. kg ⁻¹	0.3	0.3 4
pH _{water}		4.70	4.83
pH _{KCl}		4.09	4.10
CEC	cmol ⁺ kg ⁻¹	1.73	1.49
Exch. Ca	cmol ⁺ kg ⁻¹	0.42	0.53
Exch. K	cmol ⁺ kg ⁻¹	0.06	0.08
Exch. Mg	cmol ⁺ kg ⁻¹	0.15	0.16
Exch. Al	cmol ⁺ kg ⁻¹	0.59	0.77
P Olsen	mg kg ⁻¹	3.76	3.86
P resin	mg kg ⁻¹	0.47	1.15
Pi_NaOH ^a	mg kg ⁻¹	53.60	27.23
P total_NaOH ^a	mg kg ⁻¹	196.90	96.10
Pa_NaOH ^a	mg kg ⁻¹	143.33	68.87
Particle-size distribution			
Clay + fine silt	%	71.3	45.6
Coarse silt	%	15.3	3.9
Fine sand	%	8.6	11.4
Coarse sand	%	4.6	38.7
Oxides			
Total Fe ₂ O ₃	%	31.43	12.2
Total Al ₂ O ₃	%	28.13	32.4
Total SiO ₂	%	10.0	39.0
Total TiO ₂	%	6.0	1.5
Total MgO	%	0.08	0.11
Total P ₂ O ₅	%	0.30	0.13
Total MnO	%	0.08	0.15
Total K ₂ O	%	0.04	0.13
Total CaO	%	0.02	0.07
Others	%	0.29	0.20
Mineral contents			
Kaolinite	mg kg ⁻¹	112.48	431.34
Gibbsite	mg kg ⁻¹	201.26	161.18
Fe ₂ O ₃ _cbd ^b	mg kg ⁻¹	29.10	45.63

^aNaOH-extractable forms of P. Pi means inorganic P while Po means organic P.

^bCobalthexamine-extractable Fe₂O₃

bicarbonate form were used to determinate plant-available P content. Total P was evaluated by digestion (4h at 600°C) with perchloric acid HClO₄ for extraction and using spectrophotometer by colorimetry method (molybdenum blue) for dosage. Total P, inorganic P and organic P were also assayed using NaOH extraction. The cation exchange capacity (CEC), exchangeable K, exchangeable Mg and exchangeable Ca were analysed using cobaltihexamine extraction and measured using atomic absorption spectrophotometer (iCE 3000 Series AA Spectrometer, Belgium). The exchangeable Al ions were extracted with a 1N KCl solution and assayed by titrimetry with NaOH. Soil pH in water and in KCl 1M were measured using a glass electrode pH meter (pH 211 Microprocessor pH Meter, Romania) according to the volume ratio 1:2.5 and the particle size was determined following the hydrometer method (Okalebo, 2002). Total oxide contents were determined using X-ray fluorescence performed with a PANalytical AxiosmAX Wavelength Dispersion Spectrometer, at Institute of Earth Science, University of Lausanne, Switzerland. Soil mineral contents (i.e. kaolinite, gibbsite and iron oxides) were estimated by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS), using the models developed by Ramarosan *et al.* (2018) for kaolinite, gibbsite and iron oxides. At the end of the experiments, changes in exchangeable Al and soil pH in water in each treatment were calculated using the same analytic methods.

2.3. Rice cultivars

The experiment was conducted with the two rice cultivars used locally by farmers, i.e. Chhomrong Dhan (CD) for the soil from Imerintsiatosika and Nerica 4 (N4) for the soil from Ivory. CD and N4 are upland rice cultivars growing at cold and high altitude (Raboin *et al.* 2013). Seeds were provided by the agronomic station of the local governmental agronomic institute of Madagascar “FOFIFA” based at Antsirabe.

2.4. The nutrient-omission experiment device and fertilization

The nutrient-omission trial was conducted in the greenhouse of the Laboratory of Radio-Isotopes (LRI), University of Antananarivo, Madagascar, during the cultural season of 2017-2018. The experimental design consisted in ten treatments : (i) a negative control (Ctl) without nutrients, (ii) a positive control also called “Adequate Fertilization Level” (AFL) with all nutrients added, (iii) AFL with N omitted (-N), (iv) AFL with P omitted (-P), (v) AFL with S omitted (-S), (vi) AFL with Ca omitted (-Ca), (vii) AFL with Mg omitted (-Mg), (viii) AFL with Si omitted (-Si), (ix) AFL with micronutrients (B, Mn, Cu, Co, Na, Mo) called AFLm, and (x) Ctl with micronutrients called Cm. Fertilizers were composed of urea for N, NaH₂PO₄ for P, KCl for K, K₂SO₄ for S, CaCl₂ for Ca, MgO for Mg, SiO₂ for Si and H₃BO₃, MnSO₄, Co, Cu, Na₂MoO₄ for micronutrients. The primary macronutrients (N, P, K) were applied at the following rates :300 mg-N kg⁻¹, 200 mg-P kg⁻¹, 200 mg-K kg⁻¹. The secondary macronutrients and micronutrients were applied at 65 mg-S kg⁻¹, 150 mg-Ca kg⁻¹, 50 mg-Mg kg⁻¹,

8 mg-Si kg⁻¹ and 32.5 mg kg⁻¹ for B, Mn, Cu, Co, Na and Mo. Nutrient applications rates were assumed to be non-limiting to achieve the attainable growth. The deficiency in K in the “-S” treatment was taken into account by correcting the amount of KCl added in the pot. All fertilizers were mixed thoroughly to the soil as solution and were applied at the beginning of the experiment, except N. N was applied in three splits: 10% at the beginning, 40% and 50% two and five weeks after sowing, respectively. Three replicates for each treatment were made leading to a total of 66 pots.

The experiment was set up in 30 cm height by 16 cm diameter PVC cylindrical pots in which 5 kg of 5-mm sieved dry soil were added. One rice seed was sown in each pot after soil fertilization. All pots were randomly placed in the greenhouse and watered two times a day to reach 100% of water-holding capacity, i.e. 37 g water per 100 g dry soil. The trial started in December 14th 2017 with seed sowing and lasted 57 days until plant harvest (temperature at 23°C and humidity at 65.4%). The climatic conditions within the greenhouse were monitored with a climatic station (WatchDog Series Weather Stations, software SpecWare 9 Pro Spectrum Technologies).

2.5. The cultivar-soil reciprocal transplant experiment design

In this experiment, we intended to test the interaction between the soil types (2 modalities) and rice cultivars (2 modalities) on plant growth and nutrition only for AFL and Ctl treatments. For that purpose, each cultivar was cropped in both soils. The same protocol (experimental apparatus, duration, etc.) as described above was performed.

2.6. Measurements during and at the end of the experiment

During the experiment, changes in the numbers of tillers and plant heights were recorded for each replicate with 1-week intervals from sowing until the end of the experiment. Plant physiological traits were predicted using indices based on wavelengths in the visible and infrared part of the electromagnetic spectrum (Silva-Perez *et al.* 2018). Chlorophyll content of leaves was measured using a Minolta Chlorophyll Meter SPAD-502 (Japan). We also used the PlantPen NDVI 300 and the PRI (PlantPen PRI 200) to assess the “Normalized Difference Vegetation Index” and “Photochemical Reflectance Index”, respectively. NDVI gives a quantitative estimation of vegetation growth and biomass (Tucker 1979). The healthy vegetation produces high NDVI values. PRI assesses photosynthetic radiation use efficiency (Gamon *et al.* 1992).

After 57 days of growth, aerial parts of plants were cut; roots were gently extracted from the soil and washed in water. The shoot and root dry biomasses were determined after oven-drying at 60°C during 48 hours. Plant C and N contents were determined by dry combustion in a Flash 2000 CHN Analyzer (France). Plant P content was measured by colorimetry (molybdenum blue) after dry-ashing (4 h at 600°C) and extraction with 6M HCl. Plant Ca and Mg contents

were determined using atomic absorption spectrophotometer (iCE 3000 Series AA Spectrometer, Belgium) with lantana reagent after digestion (Okalebo *et al.* 2002). Plant element amounts were calculated by multiplying plant element contents by shoot or root biomass. All analyses were performed either at the LRI (Madagascar) or at the UMR Eco&Sols in Montpellier (France).

2.7. Data analyses

All statistical analyses were performed with the R software (Team R.C. 2016). One-way ANOVA with fertilization as factor (ten modalities) were conducted for each soil-rice cultivar couple and plant variables. For the soil-cultivar transplant experiment, a two-way ANOVA model was used with the type of soil (IM or IV) and the rice cultivars (Chhomrong Dhan and Nerica 4) as main factors. The normality of the data was verified using the Shapiro test. Post hoc Tukey HSD tests were used to identify significant changes among the fertilization treatments at the 5% threshold with the package “agricolae”.

3. Results

3.1. Soil characteristics at the beginning and at the end of the experiment

We found similar properties between the two soils (Table 1). Both soils are characterized by a pH below 5. They exhibited very low Olsen P contents, ca. 3.8 mg.kg⁻¹, a low CEC and very low exchangeable cations. Exchangeable K was near to 0.05 cmol⁺.kg⁻¹ and exchangeable Ca was around 0.5 cmol⁺.kg⁻¹. Exchangeable Mg was close to 0.15 cmol⁺.kg⁻¹. Low total N contents (<0.25%) was also observed in both soils. Total oxides were dominated largely by Fe₂O₃, Al₂O₃ and SiO₂. The soil from Ivory (IV), developed on Mesozoic sedimentary rocks, contained higher sandy elements and higher SiO₂ content while the soil from Imerintsiatosika (IM) exhibited largely fine particles (clay + fine silt) and higher Al and Fe oxides in comparison to IV soil.

At the end of the nutrient omission experiments, the exchangeable Al contents in the IM soil changed in comparison to the initial values. Under Adequate Fertilization Level (AFL), AFL with micro-nutrients (AFL_m), S omission (-S), Si omission (-Si) and N omission (-N) treatments, this soil parameter decreased to ~0.1 units; the -Si and -N treatments had the lowest final exchangeable Al values. For the remaining treatments, exchangeable Al increased to 0.3 units in average, and the -P treatment had the highest value (1.15 meq/100g). In contrast, in the IV soil, the exchangeable Al contents decreased by 0.33 units in average after the experiment. The lowest values were obtained under -P (0.30 meq/100g) and -N (0.18 meq/100g) treatments. IM soil pH varied significantly according to the treatments and decreased with increased Al

Table 2 : Mean values (standard deviation) of soil exchangeable aluminum and soil pHwater of ferralsols collected from Imerintsiatosika and Ivory in Madagascar after growth of rice cultivar Chhomrong Dan and Nerica 4, respectively, according to nutrient omission trials

Treatments	Exchangeable Al (meq/100g)				pH (water)				
	Imerintsiatosika		Ivory		Imerintsiatosika		Ivory		
	Mean	Sd	Mean	Sd	Mean	Sd	Mean	Sd	
AFL	0.58	0.16	0.49	0.08	4.66	0.28	4.46	0.23	a
AFL _m	0.43	0.08	0.42	0.04	4.76	0.09	4.50	0.27	a
Ctlr	0.79	0.04	0.60	0.08	4.18	0.01	4.61	0.12	a
C _m	0.82	0.05	0.69	0.04	4.38	0.03	4.55	0.11	a
-N	0.38	0.02	0.18	0.03	4.98	0.10	4.81	0.06	a
-P	1.15	0.06	0.30	0.04	3.85	0.03	4.46	0.10	a
-S	0.52	0.04	0.38	0.05	4.61	0.26	4.47	0.12	a
-Ca	0.63	0.07	0.57	0.04	4.60	0.33	4.58	0.30	a
-Mg	0.85	0.06	0.60	0.06	4.31	0.12	4.33	0.12	a
-Si	0.40	0.06	0.37	0.07	4.60	0.12	4.38	0.08	a

Letters (a, b, c, d, and e) indicate significant differences between treatments according to one-way ANOVA and Tukey HSD tests (vertical reading).

(Table 2). The highest pH values were found under N omission (mean pH 4.98) and the lowest ones under the P omission (mean pH 3.85). Conversely, the pH of the IV soil exhibited less variation, i.e. between 4.33 and 4.81.

3.2.Plant biomass

We found significant differences between the treatments after 57 days of growth as revealed by the one-way ANOVA (Figure 4). For both soils, P omission induced the lowest rice biomass with a mean value of ca. 0.18 g. pot⁻¹, equivalent to the biomass found for the negative control (mean 0.09 g. pot⁻¹). For these two treatments, the plants were still in the seedling development stage at the end of the experiment. Plants exhibited very low height, did not produce tillers, and the leaves were too small to measure SPAD, NDVI and PRI values. The addition of micronutrients in the negative control treatment (Ctl_m) did not significantly change the final plant biomass, even if a slight increase was observed from 0.08 to 0.14 g. pot⁻¹ for IM and from 0.10 to 0.20 g. pot⁻¹ for IV without and with micronutrients, respectively (Figure 4). For the IM soil, we also observed a low plant biomass in the -Ca treatment (1.2 g. pot⁻¹), which was not significantly different from that of -P, Ctl_m and Ctl treatments (Figure 4A). Similarly, in the -N and -Mg treatments, final plant biomass was significantly higher than -P, but still low, with respectively 5.7 g and 7.4 g. pot⁻¹ for the IM soil. In contrast, when rice grew in the soil from Ivory, the second lowest biomass values after the P omission were found for the N omission treatment followed by Ca omission, with respectively 3.0 g and 6.5 g. pot⁻¹ (Figure 4B). The highest shoot biomass values were found in the -S, -Mg and AFL treatments in IV soil

(respectively 9.4, 9.0 and 8.6 g. pot⁻¹) and in the -S, -Si, AFLm treatments in IM soils (respectively 15.8, 15.3 and 15.1 g. pot⁻¹).

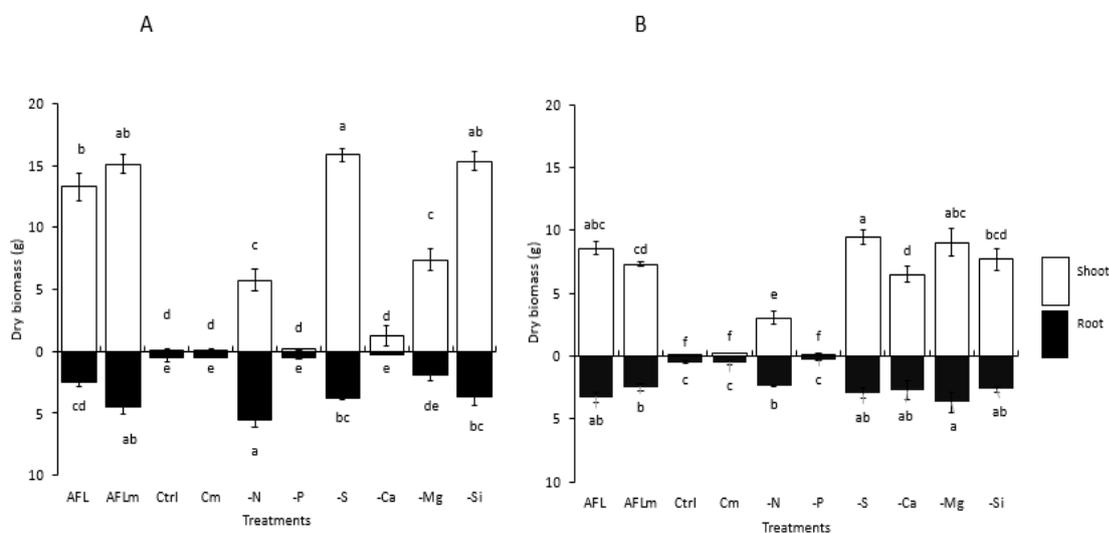


Figure 4: Final shoot (white bars) and root (black bars) dry biomass for (A) Chhomrong Dhan and (B) Nerica 4 rice cultivars grown in acidic ferrallitic soils from Imerintsiatosika and Ivory, respectively. Vertical bars represent standard deviations. Significant differences between the treatments at the 5% threshold are indicated with the different letters (a, b, c, d, and e) according to one-way ANOVA, followed by a post hoc Tukey HSD test.

Likewise, root biomass varied considerably among treatments in both soils (P -value < 0.0001) (Figure 4). The omission of P resulted in the largest reduction, i.e. diminution of ~2 g. pot⁻¹ for the IM soil (Figure 4A) and of ~3 g. pot⁻¹ for the IV soil (Figure 4B) in comparison to the AFL treatment. The omission of N in the IM soils increased by 118% the root biomass in comparison to the AFL treatment. -S and -Si treatments developed also higher root biomass than AFL but the differences is not significant (Figure 4A).

3.3. Plant nutrition

3.3.1. Rice nutrient contents

Shoot N contents was significantly higher when Ca and P were omitted but lower when N was omitted (Table 3 and Table 4). High shoot P contents were observed under all treatments when P was not omitted for both soils, with average values of 0.5 g. kg⁻¹ under P omission and 4.59 g. kg⁻¹ under treatments receiving P for the case of IV soil. Ca omission exhibited the lowest shoot Ca content values (only 1.01 g. kg⁻¹) whereas the highest values were found when Mg was omitted (3.29 g. kg⁻¹) for the IM soil (Table 3). The other treatments had almost similar effects on shoot Ca content with intermediates values. In contrast to the shoot, the root Ca content did not vary significantly among the treatments.

The following treatments Ctl, Ctl_m, -P and -Mg had strong negative effect on both shoot and root Mg content, ca 81% decrease comparing to AFL. For plants growing in the IV soil, the

Partie I. Carences nutritives des Ferralsols : Cas du riz pluvial à Madagascar

shoot Ca and Mg contents were lower when Ca and Mg were omitted while the other omission treatments exhibited similar high values on Ca, and Mg shoot contents (Table 4). The same trend was found for root.

Table 3: Final nutrient contents (mean) in the rice shoot and root according to the treatments for Chhomrong Dhan cultivar growing in Imerintsiatosika soil.

Parameters	Units	Treatments																			
		AFL	AFLm	Ctl	Ctlm	-N	-P	-S	-Ca	-Mg	-Si										
Shoot																					
C	%	42,48	a	42,38	a	40,70	a	38,59	a	39,63	a	42,48	a	43,50	a	43,09	a	41,32	a	43,92	a
N	%	3,58	ab	3,25	bc	2,55	cd	2,35	de	1,65	e	3,48	ab	3,28	bc	4,21	a	3,35	b	3,31	b
P	g.kg ⁻¹	3,64	a	4,03	a	0,78	b	0,83	b	3,70	a	0,85	b	3,21	a	3,19	a	3,31	a	2,73	a
K	g.kg ⁻¹	32,57	b	23,03	b	7,70	b	97,20	ab	27,31	b	91,29	ab	15,83	b	146,02	a	27,16	b	16,61	b
Ca	g.kg ⁻¹	2,07	abc	1,85	abc	1,54	bc	1,69	abc	3,04	ab	2,17	abc	1,52	bc	1,01	c	3,29	a	2,21	abc
Mg	g.kg ⁻¹	2,77	a	2,54	ab	0,27	d	0,33	d	2,26	abc	0,90	bcd	3,88	a	2,73	ab	0,60	cd	3,28	a
Root																					
C	%	36,42	b	37,45	b	46,71	a	42,06	ab	35,57	b	42,72	ab	37,12	b	41,08	ab	41,52	ab	42,89	ab
N	%	1,36	a	1,23	a	0,60	b	0,72	b	0,67	b	0,83	b	1,26	a	1,48	a	1,57	a	1,27	a
P	g.kg ⁻¹	0,87	a	0,74	ab	0,18	c	0,15	c	0,23	bc	0,21	bc	0,48	abc	0,61	abc	0,86	a	0,47	abc
K	g.kg ⁻¹	2,54	a	3,03	a	0,90	a	0,77	a	2,33	a	1,35	a	1,26	a	1,88	a	9,74	a	7,28	a
Ca	g.kg ⁻¹	0,92	ab	0,65	ab	0,75	ab	0,23	b	1,01	ab	0,95	ab	0,42	ab	0,67	ab	0,89	ab	0,73	ab
Mg	g.kg ⁻¹	0,61	a	0,56	ab	0,04	e	0,11	de	0,58	ab	0,23	cde	0,52	abc	0,43	abcd	0,27	bcde	0,51	abc

Different letters (a, b, c, d, and e) indicate significant differences between treatments (horizontal reading) at the 5% threshold according to one-way ANOVA followed by a post-hoc Tukey HSD test.

Table 4 : Final nutrient contents in the rice shoot and root according to the treatments for Nerica 4 cultivar growing in Ivory soil

Parameters	Units	Treatments																			
		AFL	AFLm	Ctl	Ctlm	-N	-P	-S	-Ca	-Mg	-Si										
Shoot																					
C	%	39,41	a	42,19	a	40,57	a	42,58	a	39,10	a	42,66	a	42,07	a	40,53	a	41,93	a	43,63	a
N	%	3,86	ab	4,28	a	2,52	c	3,15	bc	2,55	c	3,96	ab	3,82	ab	3,56	ab	3,82	ab	4,08	a
P	g.kg-1	4,82	ab	4,92	ab	0,71	c	0,89	c	5,42	a	0,65	c	4,49	ab	4,15	ab	3,81	b	4,53	ab
K	g.kg-1	25,82	ab	30,09	a	11,42	c	12,63	c	24,61	ab	10,71	c	18,45	bc	25,34	ab	27,23	a	32,98	a
Ca	g.kg-1	2,75	bc	2,42	bc	2,01	cd	2,20	bc	3,13	ab	3,76	a	2,22	bc	1,20	d	2,60	bc	2,26	bc
Mg	g.kg-1	2,24	a	2,24	a	1,00	c	1,21	bc	2,41	a	1,68	b	2,77	a	2,73	a	0,77	c	2,25	a
Root																					
C	%	39,59	ab	39,37	ab	43,37	a	42,84	a	31,73	b	43,51	a	41,56	ab	34,50	ab	38,42	ab	37,62	ab
N	%	1,43	a	1,25	ab	0,65	d	0,86	bcd	0,75	cd	1,11	abc	1,32	a	1,37	a	1,41	a	1,36	a
P	g.kg-1	1,27	a	1,42	a	0,18	b	0,20	b	0,72	ab	0,22	b	0,80	ab	1,09	a	1,07	a	0,96	a
K	g.kg-1	15,25	a	2,67	b	1,20	b	1,40	b	2,40	b	1,62	b	2,34	b	1,47	b	2,05	b	2,72	b
Ca	g.kg-1	1,06	b	0,79	b	0,54	b	0,70	b	0,51	b	1,92	a	1,01	b	0,42	b	0,86	b	0,66	b
Mg	g.kg-1	0,61	a	0,67	a	0,11	c	0,13	c	0,69	a	0,31	bc	0,53	ab	0,49	ab	0,23	bc	0,75	a

Different letters (a, b, c, d, and e) indicate significant differences between treatments (horizontal reading) at the 5% threshold according to one-way ANOVA followed by a post-hoc Tukey HSD test.

3.3.2. Rice nutrient amounts

The treatments without P (-P, Ctl, Ctl_m) exhibited the lowest shoot nutrient amounts (Figure 5, Figure 6) in agreement with plant biomass. Under Ca omission, the shoot N, P, Ca, Mg amounts were not different from those under P omission, followed by N and Mg omission for the plant growing in IM soil (Figure 5). Results from IV soil did not show the same trend. The -Ca treatment increased significantly plant nutrient amounts (except in Ca amounts) compared to -P treatment, even if the results were still meaningfully low in comparison to AFL (Figure 6). Also, N omission for the IV soil exhibited low nutrient amounts but still significantly higher than P omission. Remarkably, -S and -Si treatments did not affect plant nutrients amounts in both soils compared to AFL treatment. For the IV soil, this pattern was also found in -Mg treatment, except for plant Mg amounts. In roots, similar trends were observed (Figure 6).

3.4. Cultivar-soil crossing effects on rice nutrition

The two-way ANOVA showed that soil and cultivar effects on plant nutrient amounts vary according to the treatments (AFL or Ctl) and to the nutrients (N, P, Ca or Mg).

Table 5: Two-way ANOVA statistics for shoot weight and nutrients amounts (N, P, Ca, Mg) measured after 57 days of growth in soil origins (Imerintsiatosika/Ivory) and variety types (Chhomrong Dhan and Nerica 4) under adequate fertilization level (AFL) and without fertilization (Ctl) treatments.

AFL						
	Soil		Variety		Soil x Variety	
	F value	p value	F value	p value	F value	p value
Shoot weight	0.007	0.932	0.796	0.383	0.027	0.871
N amounts	0.413	0.53847	20.44	0.001**	0.187	0.677
P amounts	6.42	0.03*	17.07	0.003**	1.81	0.21
Ca amounts	0.09	0.76	0.83	0.39	0.28	0.61
Mg amounts	20.51	0.001**	98.27	<0.0001***	5.25	0.05

Ctl						
	Soil		Variety		Soil x Variety	
	F value	p value	F value	p value	F value	p value
Shoot weight	13.44	0.01**	1.78	0.21	1.00	0.35
N amounts	19.94	0.002**	4.3	0.07	2.81	0.13
P amounts	102.4	<0.0001***	10	0.01**	10	0.01**
Ca amounts	26.46	<0.001***	0.81	0.39	0.007	0.94
Mg amounts	49	0.0001***	30.25	0.0005***	12.25	0.008**

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$

Under the Adequate Fertilization Level (AFL), no significant interaction occurred between the soil type and rice cultivar on rice shoot nutrient amounts (AFL in Table 5). Shoot N amounts varied considerably among the rice cultivars, i.e. N4 accumulated more N than CD did (Figure

7), while P and Mg were mostly impacted by the soil type and cultivar but no interaction was found. Plants growing on the IV soil exhibited higher P amounts but lower Mg amounts than plants growing on the IM soil (Figure 7C and Figure 7G), while CD cultivar contained more P and Mg nutrients than N4. Under the negative control (Ctl), we found a significant interaction between the two factors on plant P and Mg amounts (Ctl in Table 5). The lowest plant P amounts values were observed for N4 cultivar growing on IM soil while those of Mg amounts were found for CD cultivar growing again on IM soil (Figure 7D and Figure 7H). Plant N and Ca amounts were affected both by soil origin and the highest values were found in plants growing in IV soil (Ctl in Table 5).

4. Discussion

The growth of Chhomrong Dhan and Nerica 4 rice cultivars on Imerintsiasosika and Ivory soils, respectively, varied strongly according to nutrient omissions. For both soils, the main nutrient limiting rice growth was P, with an average loss of ca. 97% of shoot dry mass under P omission in comparison to the “Adequate Fertilization Level” treatment. This strong P deficiency for rice crops on Ferralsols has already been observed by Fageria and Baligar (1997) in Brazil, Sahrawat *et al.* (2003) and Kone *et al.* (2014) in Ivory Coast.

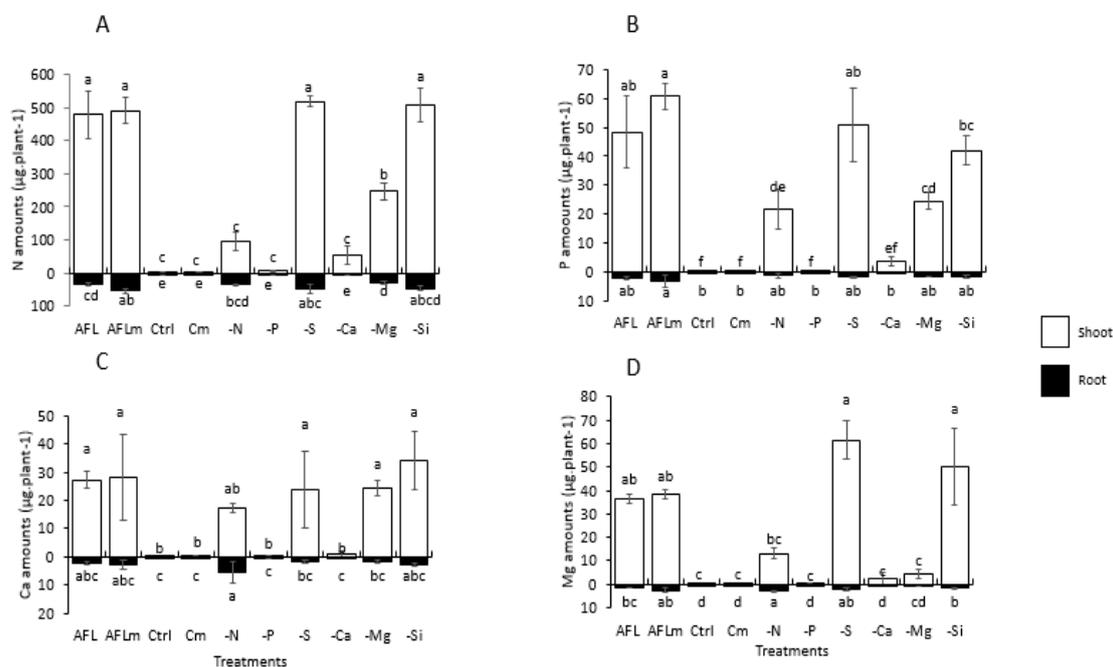


Figure 5: Final amounts of nitrogen (A), phosphorus (B), calcium (C), and magnesium (D) in Chhomrong Dhan rice cultivar tissues grown in an acidic ferrallitic soil from Imerintsiasosika, according to fertilization treatment. Significant differences between the treatments at the 5% threshold are indicated with different letters (a, b, c, d, and e), according to one-way ANOVA, followed by a post hoc Tukey HSD test.

This P limitation can be explained by the high soil Al and Fe oxides contents, in most weathered tropical soil conditions, combined with low pH that confer high P-adsorption ability of the Ferralsols; the oxides act as positives colloids and bind easily orthophosphate anions (Frossard *et al.* 1992; Parfitt 1980). We noticed that omitting P has acidifying effect and increased exchangeable Al on Imerintsiatosika soil. This trend can add a toxic effect to P deficiency. In addition, Al toxicity to plant is most significant on acidic soils (pH below 5.0) (Foy 1988). Although, we cannot exclude the Al toxicity effect to explain growth inhibition in other nutrient limitations (Ca and Mg) as soil pH at the end of the experiment is still below 5.

For rice growing on Imerintsiatosika soil, we also found a strong Ca limitation followed by N and Mg. In contrast, for rice growing in Ivory, only N limited plant growth while Ca and Mg soil contents appeared sufficient to achieve rice biomass equivalent to the AFL_m and AFL respectively. Low cation levels (Ca²⁺ and Mg²⁺) are related to the deep alteration of primary minerals by release of cations, silica, iron and aluminium, where the latter recombine to form neoform minerals (Ségalen 1966). N limitation is associated to N mineralization inhibition and poor organic N contents. Soil organic matter is a major indigenous source of available N upon mineralization which increases with increasing pH corresponding to an increase in soil microbial activity (Janssen *et al.* 1990). Both soils have moderate total C contents but their acidic pH (<5) constrains N availability and then plant growth.

Our results thus showed that secondary nutrients limited rice crop in different ways according to the soils and its associated cultivars. These differences in rice response to omission trials between the two soils may come from (i) differences in weathering intensity link to the parent materials and geomorphology, (ii) historical land use and (iii) differences in rice cultivar used in their respective soil (Filho *et al.* 2017; T. Rakotoson *et al.* 2017).

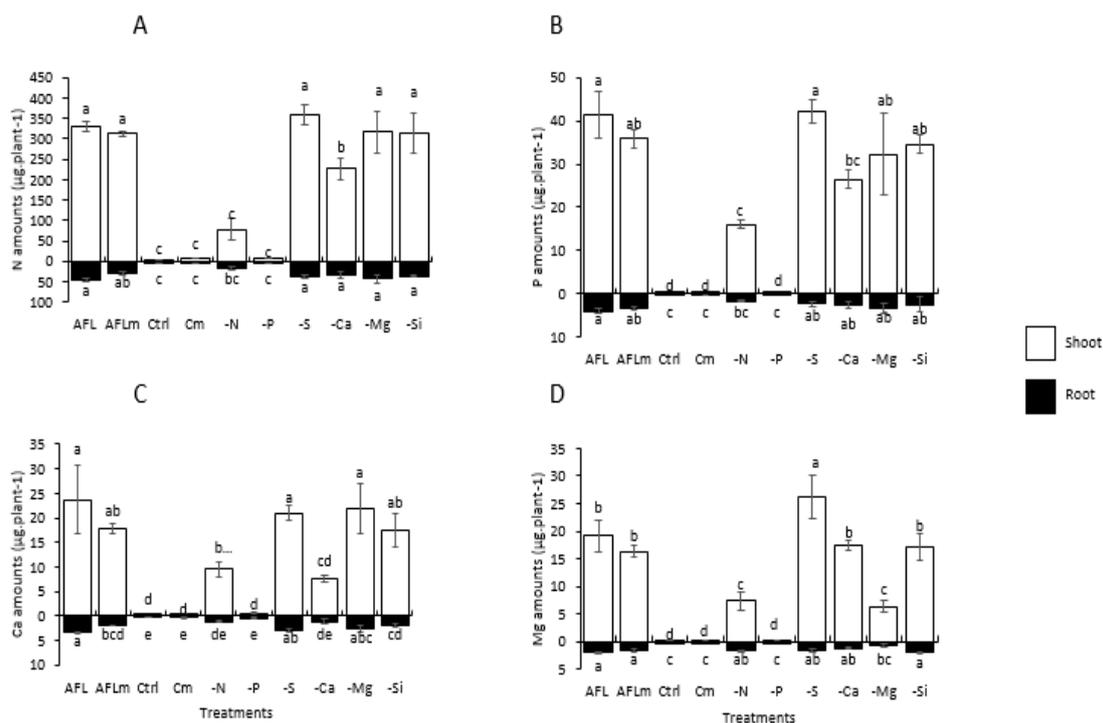


Figure 6: Final amounts according to treatments of nitrogen (A), phosphorus (B), calcium (C), and magnesium (D) in the shoot and root tissues of the NERICA 4 rice cultivar grown in an acidic ferrallitic soil from Ivory. Significant differences between the treatments at the 5% threshold are indicated with different letters (a, b, c, d, and e) according to one-way ANOVA, followed by a post hoc Tukey HSD test

Concerning the first hypothesis, the difference in SiO₂ contents between Imerintsiosika and Ivory soils indicated contrasting degrees of weathering and/or alteration processes (Ségalen 1966) between the two soils and confirmed difference in their parental materials. Indeed, the soil of Imerintsiosika was developed on the Precambrian crystalline basement while the soil from Ivory on Mesozoic sedimentary rocks (Ramaroson *et al.* 2017). Mineral contents prediction using NIRS suggested that Imerintsiosika is more gibbsitic and Ivory more kaolinitic. Imerintsiosika soil genesis seems quite clear that it is sited on Highland of Madagascar (1480 m asl) and alteration processes is a classic on-site alteration. However, without further investigation, those of Ivory (980 m asl) is probably less obvious to know if soil genesis is on old sedimentary deposits or on rock materials quite similar to those on Highland mixed with sedimentary deposits (abundance of sandy fraction ~ quartz). Also, total amounts of plant-available nutrients strongly differed according to the soil type, irrespective of the rice cultivar. This first hypothesis appears thus likely.

This is not the case concerning the second hypothesis since both soils were under natural savannah during several decades. It appears thus unlikely that their respective land use affected their Ca, N and Mg status.

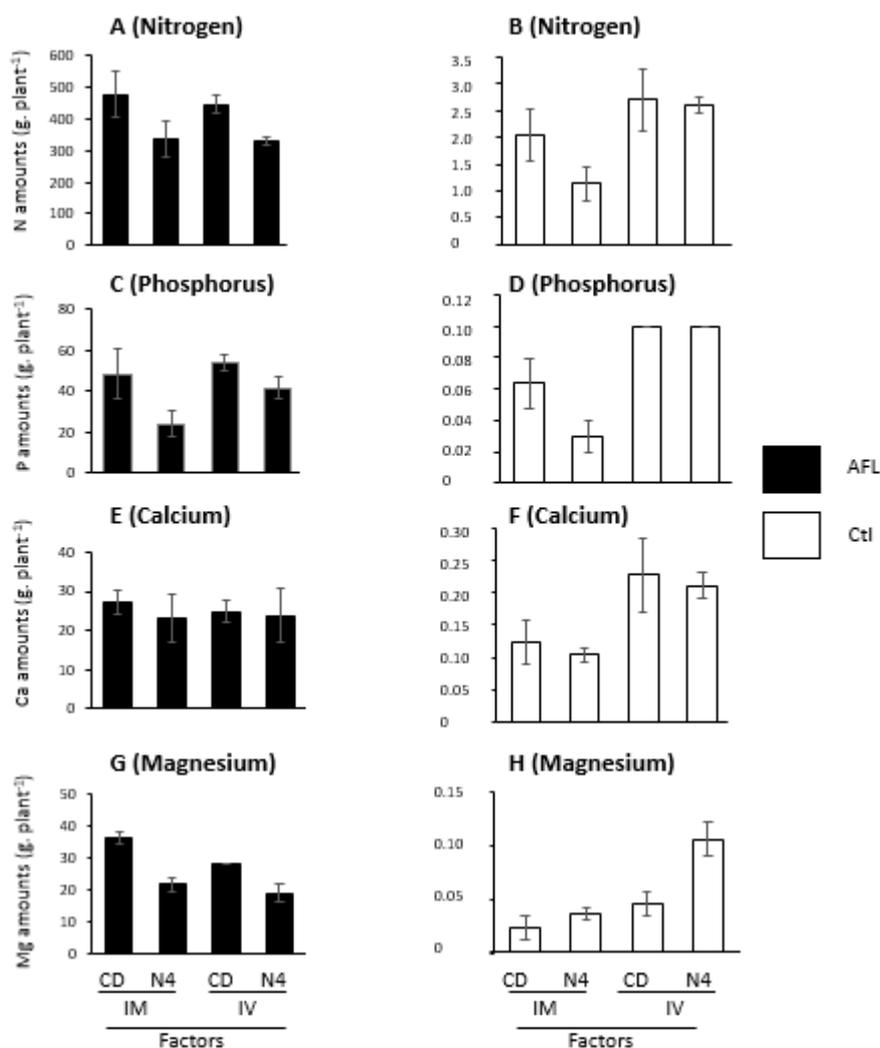


Figure 7: Nutrient (N, P, Mg, Ca) amounts in plant shoots according to rice cultivars (Chhomrong Dhan “CD” and NERICA 4 “N4”) and soil type (Imerintsiatosika “IM” and Ivory “IV”) under adequate fertilization level treatment (A, C, E, and G) and without fertilizer (B, D, F, H).

The third hypothesis is, in contrast, more probable. Previous observations showed different response of rice cultivars towards soil N (Namai *et al.* 2009; T. Rakotoson *et al.* 2017), P (Fageria *et al.* 1988; Chaubey, Senadhira and Gregorio 1994) and Mg (Zhang *et al.* 2011) availability. In our study, both cultivars exhibit different nutrient uptakes with respect to N, P and Mg uptake under AFL treatment, for a given soil. CD took up more N, P and Mg than N4 did. However, even CD has the ability to take up more N, P and Mg, soil supply was not sufficient to fulfil the plant nutrients requirement. We can thus validate this last hypothesis.

Omitting S and Si outperformed the nutrient omission treatments in almost all plant parameters indicating that soil S and Si contents are likely to be sufficient to achieve attainable rice yield whatever the soil type and the rice cultivars (Figure 4). The lack of S deficiency was not

observed possibly because of available quantity of S through weathering soil minerals, pollution and wet/oceanic deposition. Pollution S source is less probable in a case of Madagascar but Xiao and Liu (2002) showed that the contribution of oceanic deposition can be important during heavy tropical rainfall. In a case of Si, the weathered soils containing mostly 1:1 layered kaolinic group minerals, quartz, Al and Fe oxides, have a lower Si solubility than 2:1 layered and amorphous minerals (Drees *et al.* 1989 as quoted in Tsujimoto *et al.* 2014) and according to Savant, Synder and Datnoff (1997) and Ma (2004), Si is not considered as indispensable nutrients to plants under non-stressed conditions (without pests) but can be crucial to alleviate environmental stresses and pest attacks (fungal diseases, insect attacks, drought). Tsujimoto *et al.* (2014) have recently shown that Si contents in straw were below the critical level of 5% in a case of Madagascar's highland.

Concerning the micronutrients, we found higher plant biomass in the presence of micronutrients (AFLm) under the soil from Imerintsiatosika. Addition of micronutrients (Bo, Mn, Cu, Co, Na, Mo) improved rice growth (even difference is not statistically different of that from AFL) and thus, one (or more) of these micronutrients could be deficient. Kihara *et al.* (2016) also highlighted the role of micronutrients in crop productivity in many small scale farming systems, showing that poor non-responsive and low responsive soils to fertilizer application had the lowest micronutrients (Zn, Cu, Mn, Na) contents and high and intermediates responsive soils had strong response of secondary and micronutrients. In addition, P and Mo were the most limiting nutrients in the soil investigated by Fageria and Baligar (1997). Likewise, the savannah soils of West Africa exhibited Zn deficiency for rice cultivation (Koné *et al.* 2009). These findings suggest a prevalence of micronutrients deficiencies in the Ferralsol of Madagascar's highland.

5. Conclusion

Upland rice growth in Ferralsols from Madagascar was found to be constrained by multiple nutrient co-limitations. P, Ca, N, and Mg were the most important nutrients limiting the growth of rice. However, the effect of Ca and Mg depletion was dependent to the soil origin. Our two hypotheses formulated in the introduction were validated: (i) N and P are the main nutrients limiting rice crop production in the Malagasy Ferralsols, and (ii) Ca and Mg limit rice growth to a lesser extent compared to N and P. Additionally, we did not exclude the potential role of Al toxicity on rice growth under particular nutrient deficiencies and low pH. The differences between the two soils for the secondary limiting nutrients can be due to contrasting weathering intensities linked to the parent materials and geomorphology and differences in the rice cultivar used in the respective soils. Further research focusing on K, Mo, and other micronutrients such as Zn should be conducted to more fully characterize the upland rice nutrient limitations of

Ferralsols from Madagascar. In the current need to promote agroecological practices, the restoration of the soil fertility in Madagascar by the application of both mineral and organic fertilizers (Vanlauwe *et al.* 2014b), providing available P, Ca, N, and Mg in sufficient amounts and by the correction of pH acidity, are required to sustain the production of smallholder farms in the Madagascar Highlands.

Synthèse de la Partie I

L'étude expérimentale sur les essais soustractifs a été menée en conditions contrôlées, pendant 57 jours de croissance du riz, incluant dix traitements de fertilisation. Deux sols provenant des Hautes Terres de Madagascar ont été collectés, l'un provenant de l'Imerintsiatosika (IM) et l'autre de l'Ivory (IV), avec lesquels deux variétés de riz, Chhomrong Dhan (CD) et Nerica 4 (N4), utilisées respectivement sur les sites ont été testées.

Les résultats émanant de cette étude nous ont permis de voir que la mise en culture des Ferralsols des Hautes Terres est limitée fortement par la faible phytodisponibilité du P. Pour les deux sols, l'omission de P a induit la plus faible quantité de biomasse, avec une moyenne d'environ 180 mg pot⁻¹, non significative par rapport au sol sans apport (moyenne de 90 mg pot⁻¹) (Figure 4, Partie I). L'omission de P entraînait une diminution de la biomasse évaluée à 95 % par rapport à la fertilisation adéquate, dans laquelle tous les nutriments (N, P, K, Ca, Mg, S et Si) ont été rajoutés. La forte teneur en oxyhydroxydes de fer et d'aluminium, en conditions acides, capables de fixer fortement les ions orthophosphates, qui sont la forme disponible pour les plantes, et la teneur déjà faible en P total expliquent la forte déficience en P des Ferralsols (Antoniadis *et al.*, 2016 ; Gerard, 2016 ; Parfitt, 1980).

Pour les plants de riz cultivés sur les sols d'Imerintsiatosika, le Ca agit également parmi les plus importants facteurs limitant la productivité du riz, suivi de l'N et du Mg. Au contraire, pour les plants de riz cultivés sur les sols d'Ivory, seul l'N limite le développement du riz, alors que le Ca et le Mg contenus dans le sol se trouvent à une quantité élevée permettant de produire des biomasses semblable aux traitements de fertilisation adéquate. Les différences des réponses des plants de riz aux conditions de fertilisation soustractive résultent d'une intensité d'altération des sols et de comportement variétal différents (Figure 7). Concernant l'N, sa faible phytodisponibilité est associée à une faible teneur en matière organique des sols et/ ou à l'inhibition des activités minéralisatrices des microorganismes. La matière organique du sol constitue le réservoir primaire de l'N pour les plantes (Janssen *et al.*, 1990). Par contre, même si elle est présente en quantité modérée (Table 1), l'acidité du sol ralentit considérablement l'activité minéralisatrice des microorganismes entravant en conséquence la quantité en N disponible pour les plantes (Janssen *et al.*, 1990). Par ailleurs, les faibles teneurs en cations (Ca²⁺, Mg²⁺) sont en relation avec l'altération élevée des minéraux primaires suite à la libération des cations hors de la matrice (Huang, Li, et Sumner, 2011). Par ailleurs, il ne faut pas exclure la possibilité de la toxicité aluminique dans les Ferralsols puisque le pH du sol se trouve en dessous 5 dans certains traitements, valeur au-dessous de laquelle l'aluminium est solubilisé.

En revanche, le S et le Si ne se semblent pas déficients dans la productivité du riz pluvial (Figure 4) ; autrement dit, leurs omissions n'ont pas affecté négativement la production en biomasse des variétés de riz testées. Le S se trouve en quantité adéquate dans les Ferralsols probablement

due à la déposition océanique qui devient importante lors des fortes pluies tropicales (Xiao et Liu, 2002). Dans le cas du Si, dans des conditions expérimentales et de culture sans fortes contraintes abiotiques et biotiques, l'action prophylactique de la silice est masquée (Savant, Synder, et Datnoff, 1997 ; Ma, 2004). Il est cependant important de mentionner que la forme phytodisponible en cet élément dans les Ferralsols reste très faible ne permettant pas au riz d'accumuler le Si en quantité adéquate (Tsujimoto *et al.*, 2014 ; Sester *et al.*, 2019).

Au vu des multiples carences des Ferralsols, les assemblages complexes des matières fertilisantes permettent de combler les éléments les plus limitants. Néanmoins, la caractérisation des matières disponibles est nécessaire.

❧ PARTIE II

Caractéristiques des matières fertilisantes organiques et minérales disponibles sur les Hautes Terres de Madagascar



Photo 2: Etat des matières fertilisantes après séchage et broyage (à gauche) et disposition des microcosmes dans la salle d'incubation pour les mesures de la respirométrie (à droite), Laboratoire des Radio Isotopes 2018.

Présentation de la Partie II.

Le principal objectif de la partie II est de présenter les caractéristiques intrinsèques (chimiques et biochimiques) des matières fertilisantes organiques et minérales disponibles sur les Hautes Terres de Madagascar à l'aide d'analyses physico-chimiques standards et d'essais spécifiques.

La qualité des matières, qui est définie par leur composition chimique et biochimique, ainsi que leurs valeurs amendante et fertilisante, sont étudiées dans un premier temps. La composition chimique des matières renseigne sur leur teneur initiale en éléments tels que le C, N, P, K, Ca, ... ainsi que leur pH, et leur teneur en cendres. La composition biochimique s'appuie sur le fractionnement biochimique proposé par Van Soest (1963) qui définit une matière fertilisante en compartiments équivalent soluble, hémicellulose, cellulose et lignine. Le suivi de la minéralisation du C, qui apporte des éléments sur la valeur amendante, et de la minéralisation de N, qui décrit la valeur fertilisante, au cours de leur décomposition, renseignent également la qualité des matières. La détermination des cinétiques de minéralisation a duré 150 jours et a été effectuée au cours d'incubation en conditions contrôlées d'un mélange de sol et de matières fertilisantes, à température et humidité du sol constantes (Campbell *et al.*, 1991).

Aussi, l'étude précédente montre que la faible disponibilité du P des Ferralsols des Hautes Terres de Madagascar limite significativement le développement du riz pluvial. Dans cette présente partie, nous allons étudier la phytodisponibilité du P induite par les matières fertilisantes afin d'appréhender la capacité de ces matières à améliorer le statut phosphaté du sol et de modéliser la phytodisponibilité du P en fonction de leurs paramètres. La méthode adoptée dans cette étude pour l'évaluation de la quantité de P phytodisponible se base sur la quantification des ions P diffusibles.

En effet, il est admis par nombreux auteurs que les racines des plantes absorbent les ions orthophosphates (ions-P) H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} présents dans la solution du sol et ceux susceptibles de passer entre les deux interfaces solide-solution du sol sous l'effet de la diffusion (Fardeau, 1996, Morel et Plenchette, 1994). Le phénomène de diffusion survient lorsqu'un gradient de concentration se crée entre la phase solide et la solution du sol, c'est-à-dire que suite à l'absorption des ions-P par les racines ou à un apport de P dans le sol, des ions-P diffusibles peuvent se déplacer depuis la phase à forte concentration vers la phase à faible concentration. La quantité de P phytodisponible équivaut ainsi à la somme de ces deux sources de P, les ions-P dans la solution du sol et les ions-P diffusibles. Par contre, la quantité de P dissous dans la solution du sol ne représente que 1% du P prélevé par la plante pendant l'installation de la culture, ce qui signifie que près de 99% du P prélevé par les racines dérive de la phase solide du sol grâce au processus de diffusion (Morel, 2002). Les ions P diffusibles, susceptibles de passer entre la phase solide et liquide du sol, constitue donc la majeure source de P phytodisponible pour les plantes. Le couplage de deux méthodes expérimentales permet de

quantifier les ions P diffusibles et d'évaluer leur dynamique. Il s'agit de mettre d'abord en suspension le sol, s'ensuivent alors les expériences de sorption/désorption et les expériences de marquage isotopique des ions phosphates de la solution suivies d'une analyse de la dilution isotopique (Fardeau, 1993; 1996).

Ainsi, ce chapitre est organisé en deux parties.

La première vise à déterminer les caractéristiques initiales des matières fertilisantes et de présenter leurs effets sur le sol, en insistant particulièrement sur leur valeur amendante et leur valeur fertilisante azotée. Cette étude fera l'objet d'une publication internationale sous forme d'un 'data paper' dont le quel l'objectif consiste à présenter un 'data set' qui caractérise les matières fertilisantes organiques et minérales disponibles des Hautes Terres de Madagascar en termes de composition chimique et biochimique et de cinétique de minéralisation.

La deuxième a pour objectif d'étudier la variation de la quantité des ions orthophosphates disponibles après application de différentes matières fertilisantes, à l'aide de l'échange isotopique, et de modéliser la phytodisponibilité du P en fonction des paramètres des matières. L'intérêt de cette méthode a été confirmée par de nombreuses études (exemples, Morel *et al.*, 2000; Morel *et al.*, 2021) mais son application nécessite des laboratoires spécialisés en manipulation des éléments radio isotopes. Ce qui semble intéressant de prédire la phytodisponibilité du phosphore à partir des proxys (caractéristiques physico-chimiques du sol) qui interviennent à la dynamique des ions orthophosphates. Nous envisageons également de publier l'étude dans un journal international.

Chapitre II.1. Chemical and biochemical quality of organic and/or mineral fertilizer resources - A dataset from the Highlands of Madagascar

Cette étude fera l'objet d'un article qui sera soumis dans Open Data Journal for Agricultural Research (Wageningen University).

1. Introduction

In Madagascar, due to lowlands saturation with rice crops, upland cropping systems constitute a key agronomic issue facing food production and demographic growth (Raboin *et al.*, 2013). However, crop yields are not high enough to reach self-sufficiency and remain well below those of the more fertile lowland areas. In attempt to meet food security, external nutrient inputs of organic and/ or mineral resources (OMR) are the dominant and effective practices to overcome soil nutrient constraints and to sustain production (Fageria and Baligar, 2008; Vanlauwe *et al.*, 2014b).

Many OMR can be found in Madagascar, either produced by farmers (animal manure, plant ashes, etc.), either sold on the markets by associations or companies (vermicompost, etc.). These OMR can be manufactured from different sources (organic wastes, animal by-products, agro-industrial by-products, animal manures, phosphate rock, etc.). The valorisation of these organic and mineral resources is a promoting alternative way for crop fertilization to smallholder farmers, since availability and affordability of chemical fertilizers are toughly limited (Bekunda *et al.*, 2010). However, a basic understanding of the OMR characteristics is required to drive the soil functioning shift following the OMR application, especially nutrient cycling processes and plant nutrition.

OMR quality refers to their elemental and biochemical compositions which affect the rate of organic decomposition, nitrogen (N) and phosphorus (P) mineralization and immobilisation (Reardon, 1995; Sunderlin *et al.*, 2005) (Heal *et al.* 1997) and nutrient cycling. To date, the description of and characteristics of available OMR from Madagascar's Highland are too restricted and there is a lack of information about their chemical and biochemical quality. The present dataset includes the elementary composition (chemical and biochemical) and C and N mineralization kinetics of 19 OMR that can be easily found in Madagascar's Highlands. We provide a dataset which can be used to compare fertilizer resources collected from different years, manufactured from different residues and from different techniques, in terms of chemical and biochemical composition and in terms of decomposition patterns.

2. Methods

2.1. Soil sampling and analysis for laboratory incubations

The kinetic of C and N mineralization of OMR were conducted on the same experimental soil under controlled conditions. The soil was sampled from the upper layer (0-20cm) of one farmer field left under natural savannah dominated by *bozaka*, located in the Eastern part of Itasy region, near the locality of Imerintsiatosika (19°05'40''S; 47°25'65''E; 1480 m asl). Soil is classified in the FAO Classification as Ferralsols (FAO 2014). The soil samples were air-dried, passed through a 2-mm sieve, before analysis of selected properties and for the incubation study. Soil had acidic pH (<5), low Olsen P contents ca. 3.8 mg.kg⁻¹, low CEC (< 2 cmol⁺ kg⁻¹) and very low exchangeable cations (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺). Low total N contents was also observed (<0.25%). Soil organic carbon content was in average 29.2 g kg⁻¹. Its texture was dominated by fine fractions (see Table 1).

2.2. OMR sampling and preparation

A total of 19 organic and/or mineral resources was obtained from local farmers sited in Vakinankaratra and Itasy Region, from the Laboratory of Radio Isotopes, Antananarivo University, Madagascar, and from commercial producers. OMR were then grouped into types of products: 3 types of plant ashes, 5 plant and animal composts, 2 household fermentable composts, 3 types of manure, 1 animal dejection without residues, 2 animal droppings, 1 crushed horn, 1 dolomite rock, and 1 phosphate fertilizer (Table 6). This selection of OMR represents a large panel of products used by farmers and locally produced. Some products meet the NF U42-001 and NF U44-051 norms, referring respectively to fertilizers and organic amendments denominations. Fertilizers denomination requires product containing at least 3% of a major nutrient, while organic amendments denomination requires product in which organic matter content is at least 20% and the content of a major nutrient less than 3% on the raw product.

After collect, OMR were air-dried during 7 days, manually grinded, sieved at 0.2 mm and stored in a cool and dry place. All fertilizers were subjected to three types of experimental analyses, operated to characterize each OMR. The first analysis concerned their chemical and biochemical analytical compositions. The second was the analysis of C mineralization kinetics in controlled conditions. The last corresponded to the measurement of net N mineralization.

Partie II. Caractéristiques des matières fertilisantes organiques et minérales disponibles des Hautes Terres de Madagascar

Table 6 : Description and origin of 19 organic and/or mineral resources available in the Highlands of Madagascar (A French version is available on Annexe I).

Code	Class	Type	Norms	Description	Manufacturer
AshE	Fertilizers	Plant ashes	NF U42-001	Ash derived from combustion of <i>Eucalyptus</i> branches	Itasy farmer
AshH	Fertilizers	Plant ashes		Rice husk ash obtained after burning out the husk in air	Itasy farmer
AshS	Binary PK fertilizers (Class II)	Plant ashes		Rice straw ash obtained after straw open-field burning	Vakinankaratra farmer
ComL	Organic amendments	Plant and animal composts	NF U44-051	Compost of mixing of: rice straw. <i>Helianthus. Aristida sp.</i> and farmyard manure (ManI product)	Laboratory of Radio Isotopes
VCL	Organic amendments	Plant and animal composts	NF U44-051	Vermicompost of mixing of: rice straw. <i>Helianthus. Aristida sp.</i> and farmyard manure (ManI product), indigenous earthworms species: <i>Eudrilus eugeniae</i>	Laboratory of Radio Isotopes
VCT	Organic amendments	Plant and animal composts	NF U44-051	Vermicompost of mixing of: farmyard manure and various plant residues, imported earthworm species: <i>Eisenia foetida</i>	TATA association
VCV	Organic amendments	Plant and animal composts	NF U44-051	Vermicompost of mixing of: farmyard manure. soil. rice straw and legumes (mainly <i>Melia azedarac</i>), imported earthworms species: <i>Eisenia foetida</i> and <i>Eisenia andrei</i>	Vakinankaratra farmer
Tar	Organic amendments	Plant and animal composts		Bacterial leaven fixed on a rich organic plant support, certified organic by Ecocert, commercially known as Taroka Phosphaté	STOI Agri Company
ComM	Organic amendments	Household composts	fermentable NF U44-051	Fermentable composts from the dumpsite of Mahajanga municipal solid waste landfill under natural composting	Madacompost company
ComT	Organic amendments	Household composts	fermentable	Fermentable composts from the dumpsite of Andralanitra municipal solid waste landfill under natural composting	AKAMASOA Association
ManI	Organic amendments	Manures	NF U44-051	Fermentation of raw cattle dejections (excrements + urine) collected over plant residues mainly constituted of rice straw and prepared in outside rudimentary park	Itasy farmer
ManV1	Organic amendments	Manures	NF U44-051	Fermentation of raw cattle dejections (excrements + urine) collected over plant residues mainly constituted of rice straw. The product is prepared and stored in closed place and collected in a specific recipient	Vakinankaratra farmer

Partie II. Caractéristiques des matières fertilisantes organiques et minérales disponibles des Hautes Terres de Madagascar

ManV2	Organic amendments	Manures	NF U44-051	Fermentation of raw cattle dejections (excrements + urine) collected over plant residues mainly constituted of rice straw and prepared in outside rudimentary park	Vakinankaratra farmer
PP	Organic amendments	Animal dejections without residues	NF U44-051	Non-fermentable mixing of soil and cattle dejection. collected in outdoor park and stored in the open air	Vakinankaratra farmer
DroG	Entirely animal-based NP fertilizer (Class VI)	Bat guano droppings	NF U42-001	Dried droppings of bats. Product formed by accumulation and aging of those dropping birds. cave in the Southeast Region	Guanomad company
DroP	Entirely animal-based NP fertilizer (Class VI)	Dried poultry droppings	NF U42-001	Desiccated product obtained by the accumulation and drying of poultry excrement for the production of commercial broilers	Itasy farmer
ZH	Nitrogen organic fertilizer (classe V)	Crushed zebu horn	NF U42-001	Product obtained by crushing and grinding zebu horns of different diameters: flour. semolina. shavings	Madacompost company
Dol	Fertilizer providing Ca. Mg. Na and/ or S (Class III)	Dolomite	NF U42-001	Natural product essentially containing double carbonate of Ca and Mg. deposit in Ibity. Vakinankaratra Region	SEPCM Companies
Hyp	Phosphorus fertilizer	Rock phosphate + Volcanic black soil		Organo-mineral product obtained from mixing micronised apatitic rock and volcanic black soil, known commercially as Hyperfos	Prochimad Company

2.3. Chemical and biochemical analyses

Each sample of air-dried OMR was homogenized by hand during 10 mn and separated into aliquots for various chemical and biochemical analyses. The moisture content was determined by drying in an oven at 105°C. Ash content was measured by determining loss on ignition at 550 °C for 4 h. Other aliquots were dried at 40°C and the total C, N and S content was evaluated by dry combustion at Flash 2000 CHN Analyzer (Flash 2000 Series. CHNS / O 122 Thermo Scientific Analyzers, IRCOF, France). Total P was extracted by calcination in the oven at 550°C for 5 h and digested with hydrochloric acid (0.5 g samples) 2%, and assayed by colorimetry with molybdenum blue by spectrophotometer (Murphy and Riley 1962). A subsample of the same digest was used for the assay of total K, Ca and Mg by atomic absorption spectroscopy (iCE 3000 Series AA Spectrometer. Belgium). The pH of the products was measured using a glass electrode pH meter (pH 211 Microprocessor pH Meter. Romania) in the ratio 1:5 (OMR:water). Van Soest biochemical fractionation (1963), which fractionates organic matter of OMR in soluble compartments, hemicelluloses, celluloses and lignin equivalent, completed the analyzes.

2.4. Potential CO₂ mineralization experiment

Laboratory incubations were conducted using 150 ml hermetic glass jars for the determination of soil respiration following OMR amendment. A total of 57 microcosms were prepared corresponding to the study of 19 OMR with three replicates. Twenty grams of dry soil were weighed and placed in the microcosms. The soil was then wetted with distilled water to bring the moisture to 80% of its water holding capacity (WHC) and pre-incubated for 7 days at 27°C in darkness to restore the microbial activity (Achat *et al.* 2009). Afterwards, an equivalent of 0.004 g of OMR per g of dry weight soil was mixed with the soil, giving a quantity of 80 mg of OMR per microcosms. The humidity of soil-OMR mixtures was maintained at 80% WHC during the experiment. Each was then sealed hermetically.

The incubation period lasted 150 days and CO₂ microcosm air was measured 12 times after 1, 3, 7, 9, 14, 21, 34, 47, 56, 70, 95 and 150 days. CO₂ was determined using a Varian CP4900 microgas chromatograph (Varian Chromatography Group, Walnut Creek, CA USA). After each CO₂ measurement, jars were opened, aerated and closed before incubation. The rate of CO₂ emission was expressed as g of C per gram added total organic carbon (TOC). The cumulative C-CO₂ emitted over the 150-day incubation was then calculated.

2.5. Potential net N mineralization experiment

Plastic bottles of 50 ml were used and prepared to measure the kinetics of net N mineralization during 150 days. The same experimental procedure and conditions as CO₂ measurement were used, except for the pre-incubation step which was excluded. The dry soil weight was reduced to 10 g per bottles with the same ratio dry OMR weight: dry soil weight of 0.4%. Mineral N

content was carried out 5 times: 0, 15, 52, 95, 150 days after incubation. Three replications of each treatment (19 additions of OMR) for each sampling date (except extraction at T0) were used so that destructive sampling could be carried out for a total of 247 jars.

At each period, a total of 57 jars (19 treatments \times 3 repetitions) was sampled for N extraction. Soil mineral N was extracted with 40 ml of 1M KCl after shaking the soil suspension for one hour and centrifugating it for 5 min at 3000 tours. min^{-1} . The soil suspension was then filtrated using Whatman 40 filter paper. The concentrations of NH_4^+ and NO_3^- in the filtrate were analyzed by colorimetry on a continuous flow analyzer (SKALAR) using the Berthelot method for the determination of N- NH_4^+ and the Griess and Ilossay method (Gautheyrou *et al.*, 1974) for the determination of N- NO_3^- . after reduction of nitrates to nitrites by passage over a column of cadmium. Net N mineralization was expressed in $\mu\text{g N.kg}^{-1}.\text{day}^{-1}$.

Net N mineralization was calculated as the difference between the soil N concentration at each sampling period and the initial N concentrations. The following equations were used (Robertson *et al.* 1999):

$$\text{Potential net ammonification} = [(\text{N-NH}_4^+) \text{ f} - (\text{N-NH}_4^+) \text{ i}] / \text{Td}$$

$$\text{Potential net nitrification} = [(\text{N-NO}_3^-) \text{ f} - (\text{N-NO}_3^-) \text{ i}] / \text{Td}$$

Where i indicate the initial mineral N concentration. f the N concentration on a sampling period. and Td incubation time in days. A negative value indicates microbial net immobilization (Hart *et al.* 1994).

3. The dataset

3.1. Chemical and biochemical composition

The characteristics of the organic and/ mineral materials are given in Table 7. To visualize the global (bio)chemical OMR variability, a Principal Component Analysis (PCA) was carried out on chemical and biochemical composition (13 parameters).

The PCA exhibited a strong variability in chemical and biochemical composition among the 19 OMR (Figure 8). The first dimension (Dim1: 31.1% of relative inertia) opposed the crushed zebu horn (positive scores) to the other OMR. This OMR was characterized by high values in total organic carbon, total organic nitrogen and lignin-like compounds which corresponds to keratin. The negative scores of this first dimension were characterized by high pH_w values. The second dimension (Dim2: 25.3%) was mainly explained by total calcium and total phosphorus contents. It was associated to bat guano droppings. Four products including manure from Vakinankaratra (ManV2), park powder, husk ash and straw ash had negative scores and were characterized by high content of cellulose-like fraction. On the third axis, dolomite showed high content of total magnesium, eucalyptus ash and manure from Vakinankaratra (ManV1) contributed to the last component due to a high value of total potassium content.

Partie II. Caractéristiques des matières fertilisantes organiques et minérales disponibles des Hautes Terres de Madagascar

Table 7: Dry matter, contents of total carbon (Total C), total nitrogen (total N), total phosphorus (total P), total sulphur (total S), total potassium (total K), total calcium (total Ca), total magnesium (total Mg), C:N ratio, pH and C content of the biochemical fractions for the organic and/or mineral resources used in the study.

Variables	Units	AshE	AshH	AshS	ComL	VCL	VCT	VCV	Tar	ComM	ComT	ManI	ManV1	ManV2	PP	DroG	DroP	ZH	Dol	Hyp
Chemical composition																				
Dry matter	g.kg ⁻¹	980	980	980	950	950	460	950	760	840	940	360	500	650	930	810	440	890	990	880
Total C	g.kg ⁻¹	63	32	1	294	217	231	134	72	166	113	288	214	140	140	45	298	460	102	3
Total N	g.kg ⁻¹	0.48	1.92	0.26	19.60	12.40	19.99	11.73	4.10	13.57	5.98	21.60	18.68	7.41	10.32	12.58	21.10	154.98	0.02	0.37
Total P	g.kg ⁻¹	39.07	1.24	1.31	1.90	3.90	3.75	2.00	3.82	4.75	3.72	0.96	2.96	6.82	1.57	68.47	15.50	1.18	0.02	82.85
Total S	g.kg ⁻¹	0.99	0.91	0.56	2.00	2.00	3.04	1.94	0.10	1.14	2.04	3.00	2.45	1.14	1.51	45.93	6.63	31.10	0.00	0.21
Total K	g.kg ⁻¹	84.47	6.93	6.28	13.60	3.90	17.05	3.62	4.83	5.26	2.60	4.54	22.10	21.84	6.88	2.20	12.00	0.52	0.05	0.32
Total Ca	g.kg ⁻¹	84.36	1.61	1.10	17.70	27.70	7.58	4.84	28.34	44.03	8.95	1.50	7.57	8.92	3.56	61.68	37.30	3.42	191.25	79.19
Total Mg	g.kg ⁻¹	22.13	0.76	0.82	6.20	3.00	3.82	2.98	2.90	9.10	1.88	1.09	4.52	3.72	2.57	4.43	4.40	0.37	73.41	1.70
C:N ratio	unitless	132	16	5	15	18	12	11	17	12	19	13	11	19	14	4	14	3	5075	9
pH	unitless	11	8	10	8	8	8	7	8	8	8	8	9	9	9	6	6	6	9	8
C content of the biochemical fractions																				
Soluble fraction	g.kg ⁻¹	432	81	61	298	265	245	175	296	267	292	193	311	157	138	822	599	39	n.d.	183
Hemicellulose-like	g.kg ⁻¹	169	10	20	73	50	64	232	74	47	17	184	5	47	114	96	127	27	n.d.	449
Cellulose-like	g.kg ⁻¹	191	859	910	410	505	463	453	508	552	595	477	525	706	562	78	196	112	n.d.	348
Lignin-like	g.kg ⁻¹	208	50	9	219	180	229	140	122	134	96	146	159	90	186	4	78	822	n.d.	20
Ash	g.kg ⁻¹	902	915	951	626	485	515	667	846	723	800	703	597	395	659	784	316	77	981	959

n.d.: not determined.

AshE: Eucalyptus ash, **AshH:** rice ash husk, **AshS:** rice ash straw,

ComL: Plant and animal composts by LRI, **VCL:** Plant and animal vermicomposts by LRI, **VCT:** Vermicompost of mixing of: farmyard manure and various plant residues by TATA Association,

VCV: Plant and animal vermicomposts from Vakinankaratra farmer, **Tar:** Plant and animal composts by STOI Agri (Taroka), **ComT:** Household fermentable composts,

ComM and **ComT:** Fermentable composts from, respectively, the dumpsite of Mahajanga and Andranalanitra municipal solid waste landfill under natural composting.

ManI: Manures from Itasy farmer, **ManV1** and **ManV2:** Manures from Vakinankaratra farmers, **PP:** Animal dejections without residues (park powder),

DroG: Bat guano droppings, **DroP:** dried poultry droppings,

Dol: dolomite,

ZH: zebu horn.

Hyp: mixture phosphate rock and volcanic black soil.

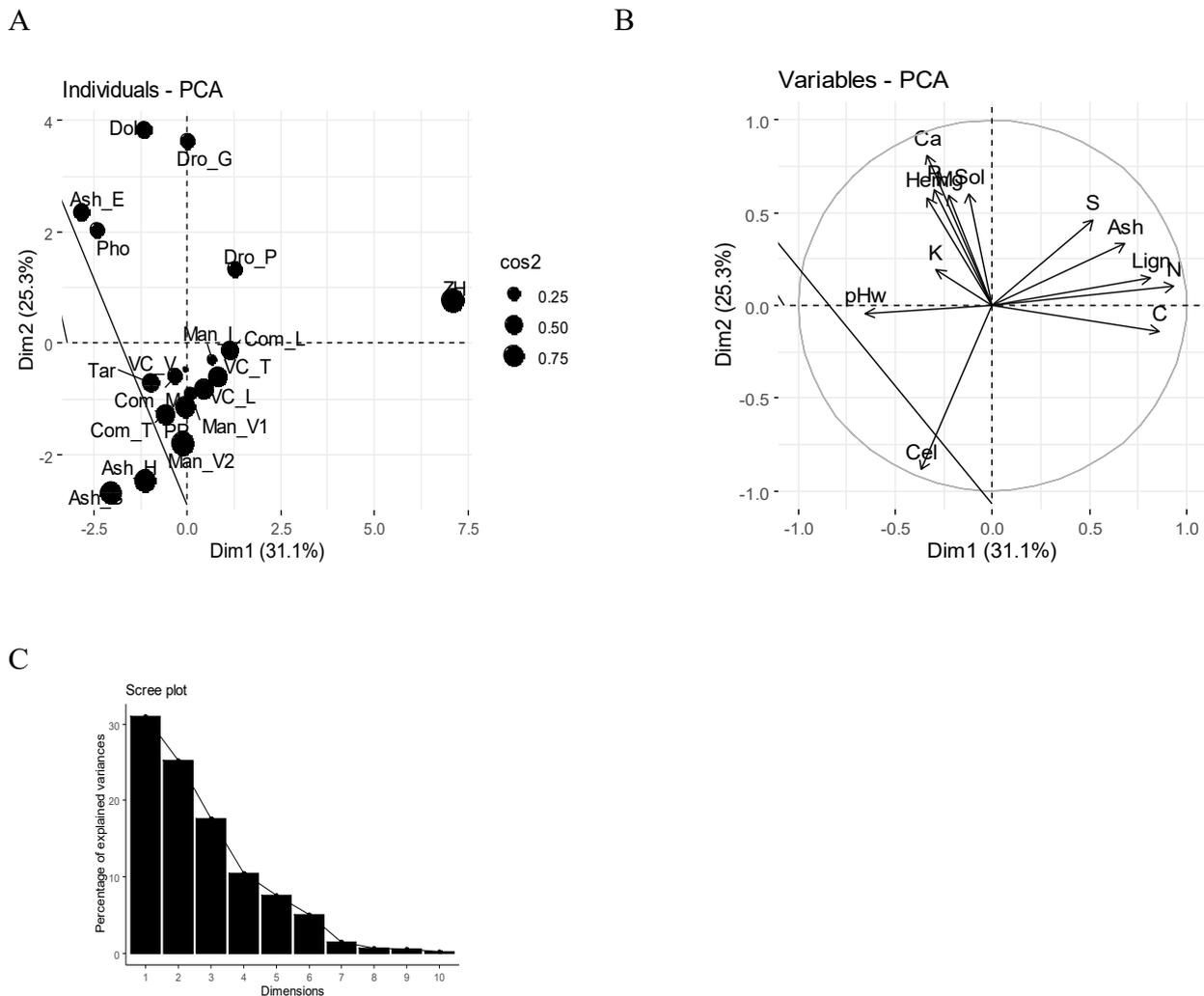


Figure 8 : Principal Component Analysis performed on (bio)chemical properties of organic and mineral fertilizers. (A) individual factorial plan (axes 1 and 2). (B) Correlation circle. (C) Eigenvalue diagram. The identification of organic and mineral fertilizers refers to codes given in Table 6. Ash: Ash content; C: Total organic carbon content; N: Total organic nitrogen content; P: Total phosphorus content; K: Total potassium content; Ca: Total calcium content; Mg: Total magnesium content; S: Total sulfur content; pHw: pH in water; Sol: Soluble-like content; Hem: Hemicelullose-like content; Cel: Celullose-like content; Lign: Lignin-like content

3.2. Potential CO₂ mineralization

The amount of cumulated C mineralization along the incubation period (150 days) ranged from 0.55 g C-CO₂.g⁻¹ C applied, corresponding to zebu horn, to 149.09 g C-CO₂.g⁻¹ C applied, corresponding to rice straw ash (Figure 9, Annexe 2). Three types of product (*Eucalyptus* ash, Hyperfos, straw ash) led to extremely higher C mineralization rates, between 32.14 and 149.09 g C-CO₂.g⁻¹ C applied at the end of incubation (Annexe 2), and values exceeded 1 g C-CO₂.g⁻¹ C applied since 1 day after incubation, suggesting priming effect. Inversely, for seven products,

recorded with the zebu horn, manure from Itasy farmer, vermicompost by TATA Association, the two manures from Vakinankaratra farmer (ManV1 and ManV2), compost and vermicompost produced by the Laboratory of Radio Isotopes, the cumulative C-CO₂ evolved over the 150-day experiment did not reach 1 g C-CO₂.g⁻¹ C applied (averaged 0.55 to 0.99 C-CO₂.g⁻¹ C applied). The remaining products exhibited C mineralization rates between 1.21 to 5.50 C-CO₂.g⁻¹ C applied and correspond to vermicompost from Vakinankaratra farmer, park powder, poultry droppings, the two household fermentable composts, Taroka compost, husk ash, and bat guano droppings. Details are presented in Annexe 2.

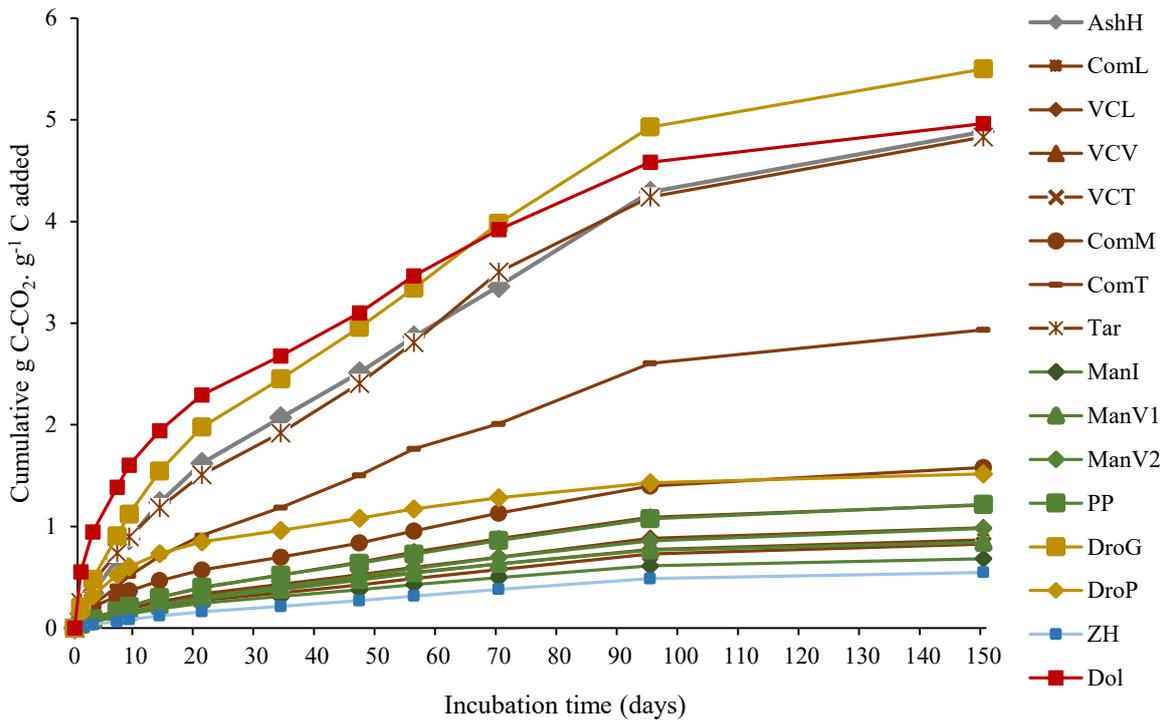


Figure 9 : Cumulative C mineralization rates of the 19 organic and mineral fertilizers measured during 150 days of incubation (g C-CO₂.g⁻¹ C applied). The identification of organic and mineral fertilizers refers to codes given in Table 6.

3.3. Potential net N mineralization

The potential net ammonification and potential net nitrification varied significantly among OMR treatments (Figure 10a, b). During the incubation, a net ammonification was observed during the first 15 days after the application of OMR, except for poultry droppings with a maximal net ammonification for dolomite ($1794.21 \mu\text{g N-NH}_4^+ \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$) and a net ammonium immobilization for poultry droppings ($87.78 \mu\text{g N-NH}_4^+ \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$). Different patterns in net N mineralization were found at the end of the incubation (150 days after incubation). We observed net N-NH_4^+ immobilization with ten products and net ammonification for the remaining treatments. However, differences in N-NH_4^+ amount between all fertilization were minimal, with values near to zero ranging from -5.57 (compost by Laboratory of Radio Isotopes) to $13.73 \mu\text{g N-NH}_4^+ \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ (vermicompost by Laboratory of Radio Isotopes).

At the beginning of the experiment (first 15 days), all OMR induced net nitrification (Figure 10b), from 110.36 to $594.25 \mu\text{g N-NO}_3^- \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$. Net N-NO_3^- immobilization for three OMR (Dolomite, bat guano droppings, compost by Laboratory of Radio Isotopes) were measured with -390.55 , -375.89 and $-75.26 \mu\text{g N-NO}_3^- \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ at the end of the incubation, respectively. The remaining OMR showed net nitrification with values ranging from 91.85 (vermicompost by Laboratory of Radio Isotopes) to 492.87 (zebu horn) $\mu\text{g N-NO}_3^- \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$.

Finally, the net N mineralization (the sum up of net ammonification and net nitrification) at the beginning of the incubation (Figure 10c), followed approximately the same pattern found for net ammonification while, at the end of the incubation, it was similar to net nitrification trend.

Partie II. Caractéristiques des matières fertilisantes organiques et minérales disponibles des Hautes Terres de Madagascar

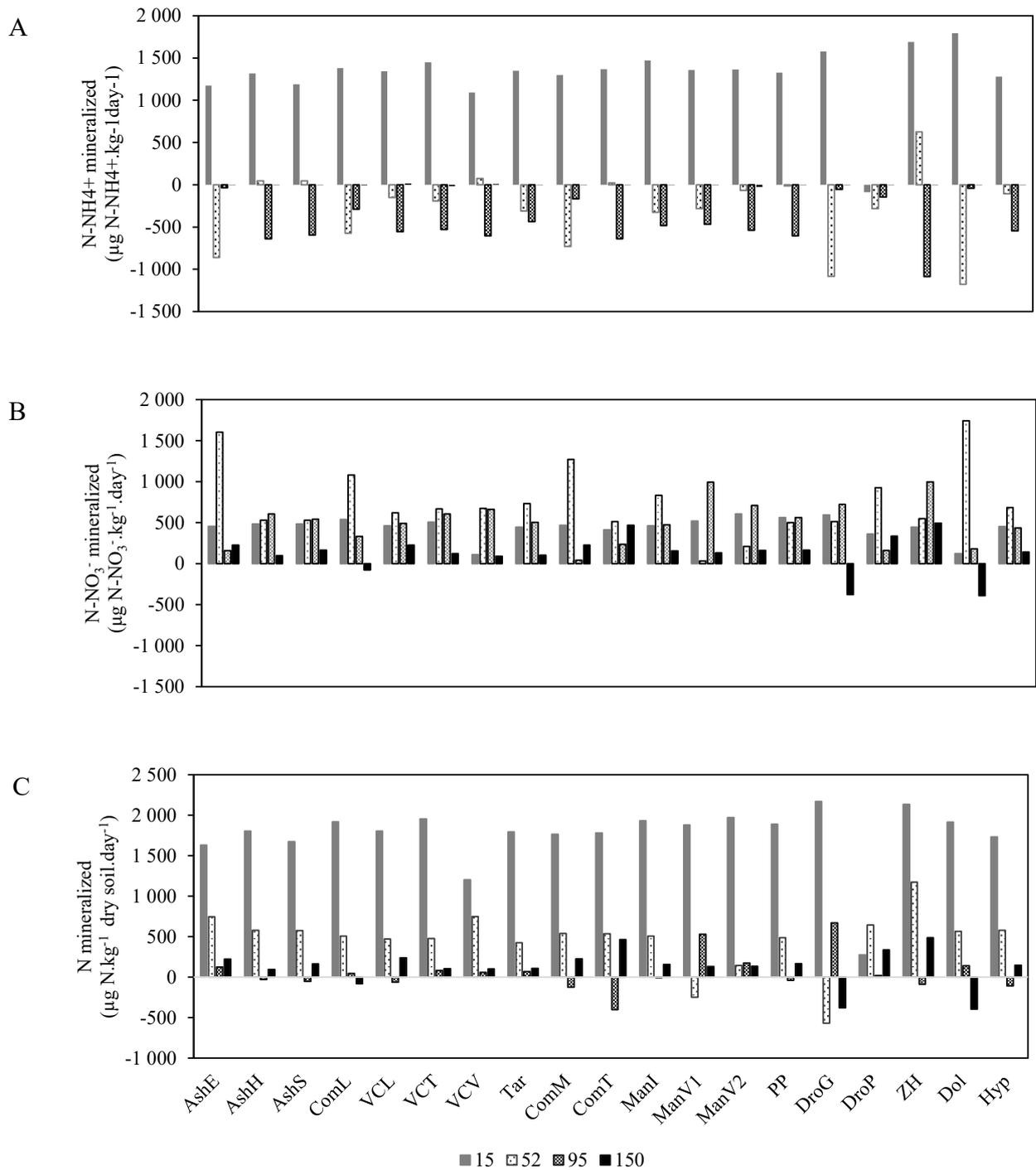


Figure 10 : Potential net (A) ammonification, (B) nitrification and (C) nitrogen mineralization rates of the 19 organic and mineral fertilizers measured at day 15, 52, 95 and 150 after incubation ($\mu\text{g N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{soil} \cdot \text{day}^{-1}$). Negative values refer to immobilization. The identification of organic and mineral fertilizers refers to codes given in Table 6.

4. Synthesis: N classification

Lashermes *et al.* (2010) has defined six classes of organic and/or mineral materials in relation with potential N mineralization in soil, from high potential N mineralization to risk of inducing N immobilization in soil after application. The N typology were based on chemical and biochemical characteristics of materials. Based on this classification, the 19 OMR in this study has been grouped in four classes among the six proposed by Lashermes *et al.* (2010) (Table 8): very high N mineralization (class 1), medium to low N mineralization (class 4), low N mineralization and/or risk of induced N immobilisation soil (class 5) and risk of induced N immobilisation soil (class 6).

Table 8: N mineralization repartition of organic and/or mineral materials according to the N mineralization typology defined by Lashermes *et al.* (2010).

	N mineralization typology	Organic and/or mineral materials
Class 1	Very high N mineralization	Zebu horn
Class 4	Medium to low N mineralization	Bat guano droppings
Class 5	Low N mineralization and/or Risk of induced N immobilisation soil	Eucalyptus ash, Poultry droppings, Dolomite, Hyperfos
Class 6	Risk of induced N immobilisation soil	Rice straw ash, rice husk ash, Compost and vermicompost by LRI, Vermicompost of by TATA Association, vermicomposts from Vakinankaratra, Taroka compost, Composts from Mahajanga, Compost from Andranalanitra, Manure from Itasy farmer, The two manures from Vakinankaratra farmers, powder park.

Discussion about this data paper is presented in Partie IV. Discussion générale et perspectives.

Chapitre II.2. Modifications of orthophosphate ions concentration in solution and its soil-solution transfer after applying Malagasy organic and/or mineral resources

Cette étude fera l'objet d'un article soumis dans la revue *Geoderma* (ou *Soil Science Society of America Journal*)

1. Introduction

Soils in the humid tropics are predominantly Ferralsols (FAO, 2014). In Madagascar, Ferralsols are mainly distributed from over the Highlands and the eastern part of the island (FAO, 2014). In such soils, once the aluminium toxicity is lifted, P deficiency is the major nutritional disorder for agricultural production (Deckers, 1993, Kihara *et al.*, 2016, Raminoarison *et al.*, 2020). High contents of aluminum and iron oxides and low pH favor rapid sorption of orthophosphate ions (P-ions = H_2PO_4^- and HPO_4^{2-}) on the soil solid phase in these deeply weathered, tropical soils (Haynes and Mokolobate, 2001) making the soil solution P-ions concentration (C_P) low, often lower than $10 \mu\text{g P L}^{-1}$ in many native Malagasy soils (Randriamanantsoa *et al.*, 2013). Plant roots take up P from the soil solution only as P-ions forms. The plant-availability of soil P is therefore strongly low even if the soil solid phase contains many P ions that can buffer C_P .

Applications of lime, to avoid alumina toxicity by ameliorating soil acidity, and P fertilizers are highly recommended to improve soil fertility (Fageria and Baligar, 2008; Haynes and Mokolobate, 2001). Unfortunately, this agronomic recommendation has not been effective among the smallholder farmers mainly because of the high costs of the mineral synthetic fertilizers produced outside Madagascar from rock phosphate deposits (Buresh *et al.*, 1997; Sanchez *et al.*, 1997). Using and recycling locally available resources of organic and/or mineral resources (OMR), is likely a more efficient way to restore and to improve the soil fertility of Ferralsols and other mineral soil types (Bekunda *et al.*, 2010; Haynes and Naidu, 1998). Even in low-production farm systems, there is a need for P-inputs that can at least cover the amount of P exported in products; that is, annual P exportation of rice farming systems in Madagascar is about 10 kg P ha^{-1} corresponding to a mean grain yield of 2 t ha^{-1} (Andriamananjara *et al.*, 2018).

Many OMR can be found in Madagascar, either produced by farmers (animal manure, plant ashes, etc.), either sold on the markets by local associations or companies (vermicompost, etc.), and manufactured from different sources (organic wastes, animal by-products, agro-industrial by-products, animal manures, phosphate rock, etc.). Among these various resources, animal manures, such as farmyard manure or composts, are the major available nutrient sources for smallholder farmers (Rabeharisoa *et al.*, 2012; Tsujimoto *et al.*, 2019). It concerns 16.3% of agricultural households in the central highlands of Madagascar (Tsujimoto *et al.*, 2019). On the other hand, some materials derived from deposits rock phosphate, obtained from accumulation

of droppings (e.g. bat guano) and from plant incineration (ashes) exist (Truong *et al.*, 1982; Van Straaten, 2002).

P contents and speciations in OMR are variable (Darch *et al.*, 2014; Toor *et al.*, 2006). Because of this wide quality range of OMR, their effectiveness has to be evaluated regarding plant P-availability since P is the most limiting factor in this region (Raminoarison *et al.*, 2020). Otherwise, it requires a basic understanding on organic and/or mineral resources' characteristics and qualities in order to expect soil fertility improvement after their application, especially the processes involved in P plant availability.

Several analysis methods based on chemical extraction procedures are used to chemically extract soil P in order to approximate plant-available P, i.e. the fraction of total P in cropped soils that participates to the plant nutrition. However, these conventional methods are limited in their capacity to predict plant P uptake (Fardeau *et al.*, 1988; Zehetner *et al.*, 2018) and crop response (Morel *et al.*, 1992; Morel *et al.*, 2000; Morel *et al.*, 2021). They are not based on the scientifically-sound understanding and quantification of the different processes that are involved in the root functioning during the process of plant P uptake. It is well documented that roots absorb P-ions in the soil solution. But, the quantity of dissolved P-ions when the crop is planted represents only about 1% of P annually taken up by crops, meaning that approximatively 99% of the P taken up by plants derived from soil constituents before uptake (Morel, 2002). As a consequence, the plant P-availability depends then on physico-chemical and biological mechanisms that contribute to control the transfer of P-ions between the solid and liquid phases of the soil. Among them the main are the time-dependent diffusion at the solid-to-solution interface, such as, mineralization of soil organic P forms, and dissolution of sparingly soluble P minerals (Messiga *et al.*, 2015; Morel *et al.*, 2000). Several studies using isotopic labelling of P-ions and applying dilution principle (Fardeau and Jappé, 1976; Frossard *et al.*, 1994; Morel and Fardeau, 1991; Morel and Plenchette, 1994) evidenced that the P-ions diffusion is the major process that controls the soil-solution transfer of P-ions in cropped soils. This finding is supported by the 1:1 relationships established in several pot experiments between the sum of diffusive soil P-ions and P-ions in solution (E -values) and the plant available soil P (L -values). Diffusive soil P-ions represents the amounts of P ions susceptible to equilibrate between the solid and liquid phases of soil under a gradient of P-ions concentration created by either root absorption or P application. The gradient concentration drives the transfer of diffusive P ions from highly concentrated area to the low concentrated one's. Consequently, a process-based assessment of the plant available soil P was proposed developing in soil suspensions studies P-ions sorption-desorption (Barber, 1984), isotopic dilution kinetics (Fardeau *et al.*, 1991) or combining both (Morel *et al.*, 2000). It consists to assess E -values ($E = Q_w + Pr$) by determining both the amount of P-ions in soil solution (Q_w) and the gross amount of diffusive soil P ions at the solid-to-solution interface (Pr).

Combining sorption-desorption and isotopic dilution kinetics allow us to assess and mathematically describe Pr as a time- and soil solution P ions concentration (C_P) dependent. A first step is a P-ions sorption-desorption experiments for 40 h which is immediately followed by isotopic dilution kinetics method (Fardeau *et al.*, 1991; Morel *et al.*, 2000; Morel *et al.*, 2014; Morel *et al.*, 2021). It is determined on soil suspensions at steady state by introducing labelled P-ions with radioactive P (^{32}P -ions) in the soil solution. Then, the isotopic dilution was measure after increasing periods of transfer. The Pr dynamic is mathematically described by coupling these two experimental approaches using the Freundlich kinetic equation (Barrow, 1979; Morel *et al.*, 2000):

$$Pr = v C_P^w t^p \quad (Pr < P \text{ mineral}).$$

The v parameter is the Pr value after 1 minute of P-ions transfer when C_P is 1 mg P L^{-1} . The w , and p parameters account for C_P and time effects on Pr , respectively.

The (v , w , p) parameters varied across soil type (Morel *et al.*, 2000; Morel *et al.*, 2014; Morel *et al.*, 2021), and with the agricultural practices in a given soil as soon as they affect physico-chemical properties (Morel *et al.*, 1994; Stroia *et al.*, 2010).

Little is known on the modifications of plant available P in Malagasy Ferralsols after applying local OMR. The main concern of this study is therefore (i) to quantify changes of soil P ions concentration and the associated kinetic linked to P-ions transfer between solid and solution phases after applying different OMR; and then (ii) to evidence the main OMR and soil properties that drive the plant P availability.

2. Materials and methods

Soil incubation studies were carried out in laboratory conditions by mixing soil with 16 OMR. After 7 months, both C_P and Pr were determined.

2.1. Soil sampling

A large mass of soil ($\sim 500 \text{ kg}$) was sampled from the upper layer (0-20 cm) of one farmer field left under natural savannah dominated by *bozaka* (vegetation, mainly composed of *Aristida sp.* grasses), located in the Eastern part of Itasy region, near the locality (village) of Imerintsiosika ($19^\circ 05' 40'' \text{S}$; $47^\circ 25' 65'' \text{E}$; 1480 m asl). The soil is classified in the WRG Soil taxonomy as Ferralsol (IUSS Working Group WRB 2015). Soil samples were air-dried, passed through a 2-mm sieve and stored at room temperature in the dark before analysis. Soil is acidic ($\text{pH} = 4.7$) with low Olsen P contents ($3,76 \text{ mg P kg}^{-1}$), low CEC ($1,73 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$) and very low exchangeable cations (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) (see Table 1, Partie I). Low total N contents were observed ($2,07 \text{ g kg}^{-1}$). Soil organic carbon content was $29,2 \text{ g kg}^{-1}$. Its texture was dominated by fine fractions (clay + silt = 86.6%).

2.2. OMR characteristics

The sixteen (16) OMR were obtained from local farmers (ten) and from commercial producers (six) (Table 6). Some products meet the NF U42-001 and NF U44-051 norms, referring respectively to fertilizers and organic amendments denominations. Fertilizers denomination requires product containing at least 3% of a major nutrient, while organic amendments denomination requires product in which organic matter content is at least 20% and the content of a major nutrient less than 3% on the raw product.

After collection, all OMR have been subjected to various physicochemical and biochemical analyzes. Prior to analysis, OMR was dried in an oven at 60°C for 48h, grinded and sieved at 0.2 mm. The total C, N and S content was evaluated by dry combustion with a Flash 2000 CHN Analyzer (Flash 2000 Series, CHNS / O 122 Thermo Scientific Analyzers, IRCOF, France). Total P was extracted by calcination in the oven at 550°C for 5 h and digested with hydrochloric acid (0.5 g samples) 2%, and assayed by colorimetry with molybdenum blue by spectrophotometer (Murphy and Riley 1962). A subsample of the same digest was used for the assay of total K, Ca and Mg by atomic absorption spectrometry (iCE 3000 Series AA Spectrometer, Belgium). The pH of the products was measured using a glass electrode pH meter (pH 211 Microprocessor pH Meter, Romania) in the ratio 1:2.5 (OMR:water). Van Soest biochemical fractionation (1963), which fractionates organic matter of OMR in soluble compartments, hemicelluloses, celluloses and lignin equivalent, completed the analyzes.

2.3. Setup of the experiment

2.3.1. *Experimental protocol*

One kg of air-dried soil was mixed thoroughly by hand with 25 g dry matter of OMR. There were 17 treatments: the 16 types of OMR and the control (only soil). The different (soil+OMR) mixtures were placed in an opened plastic bottle. The mixtures were then brought 80% of the water holding capacity (WHC). An incubation period at 25°C in dark incubation chamber for seven months was necessary to stabilize respiration. Soils were mixed by hands every 21 days in order to stimulate consumption of easily degradable C and the humidity of mixtures was maintained at 80% WHC during the incubation period. After 7 months, all samples were air-dried, gently manually grounded and sieved to 2 mm.

2.3.2. Soil solution analyses

- **Phosphate ions concentration in the soil solution**

(Soil+OMR samples and soil of the control treatment were watered with distilled water at a soil:solution ratio of 1:10 (w/ v) with 0.1 ml of biocide (toluene) to avoid any microbiological activity in the soil suspensions during analysis. The soil suspensions were then equilibrated for 16 h at 20 ± 1 °C, gently stirred on a roller before filtering at 0.2 μm with disposable filter. Then, aliquotes of the filtered solutions were analyzed for P-ions concentration using the malachite green colorimetric method (van Veldhoven and Mannaerts, 1987) with a spectrophotometer (Jenway 7300) at 610 nm wavelength with a cell of 1 cm length optical path. Four replicates of the P-ions concentration in the soil solution (C_P) was determined making a total of 68 experimental C_P values (17 treatments \times 4 replicates).

The quantification limit of the C_P value with this procedure, i.e. the smallest amount which is quantified with reasonable certainty, was 0.02 ml. L⁻¹. For lowest C_P , we use a cell of 10 cm length.

- **Elemental composition of soil solution**

The elemental composition of soil solution was determined on filtered solutions using the same procedure as the one of C_P determination. The concentration of dissolved potassium (DK) and sodium (DNa) were assayed by atomic flame emission while the ones of the dissolved calcium (DCa) and magnesium (DMg) by flame atomic absorption. Soluble sulfates (DS) were determined by photonic mode ionic chromatography and conductimetry. Dissolved organic C and N (DOC/DON) concentrations were analyzed using a TOC/TN (SHIMADZU, Japan). The solution composition analyses have been performed at the INRAE Laboratoire d'Analyses des Sols (<https://www6.hautsdefrance.inrae.fr/las>), Arras (Inra Las, 2007), except for DOC/DON analyses which have been done at Eco&Sols, Montpellier, France (<https://www.umr-ecosols.fr/>).

2.4. Mathematical description of the dynamic of diffusive P-ions at the solid-to-solution interface vs C_P and time

The dynamic of the gross amount Pr transferred at the solid-to-solution interface was determined as a function of both soil solution P concentration (C_P) and time (t) following methods used by Stroia *et al.* (2007) for grasslands soils, Nemery *et al.* (2005) for rivers sediments, Morel *et al.* (2014; 2021) for cropped soils. Two steps are used to determine Pr : (i) the sorption-desorption experiment for 40 h following subsequently by the isotopic labeling and (ii) dilution kinetics analysis at steady-state for 5 hours; this was achieved by introducing a known quantity of ³²P-labelled PO₄ ions into the soil suspension.

Practically, for each treatment, the sorption-desorption step consisted to add 4 to 7 different amounts of P as KH_2PO_4 ranging from 0 to 200 $\mu\text{g P. g}^{-1}$ of dry soil (105°C) to soil suspensions in order to obtain increasing C_P levels. Three replicates were simultaneously prepared for each P dose; one replicate corresponding to one time of isotopic dilution period. The final soil-to-solution ratio was 1: 10 (w/v), which included the volume of radioactive solution 0.1 ml. A volume of 0.1 ml of biocide (toluene) was added to inhibit microbial activities. The soil suspensions were then equilibrated for 40 h at $20\pm 1^\circ\text{C}$ gently stirred on a roller. At time zero, the isotopic labeling experiment of P ions in the solution was achieved by introducing the volume (0.1 ml) of ^{32}P -ions (R). The addition of ^{32}P -ions did not disrupt the steady state between the soil solid and liquid phases, since R is about 10^5 -fold smaller than the amount of unlabeled P-ions in solution (Q_w). After 3, 30 and 300 min following the tracer introduction, approximately 2.5 ml or 12.5 ml (depending on the spectrophotometer cell used) of the suspension were sampled with a plastic syringe and quickly filtered using a disposable membrane filter with 0.2 μm diameter mesh.

An appropriate fraction of the filtered was used to determine C_P . Another fraction (usually 0.5 ml) was mixed with 3 ml of a liquid scintillation cocktail (instagel+) to count the ^{32}P -ions radioactivity, r , remaining in solution by liquid scintillation counting (Packard TR 1100, PerkinElmer, Boston, MA). In parallel, the initial introduced radioactivity R was counted by carrying out the same procedure in distilled water only (0.1 ml of R in 10 ml of distilled water with 0.1 ml of biocide). A known fraction of 0.5 ml was mixed with the liquid scintillation cocktail before counting. Then, the isotopic dilution r/R ratio was calculated.

The amount (E) of P ions in which R is diluted includes both Q_w and the gross amount (Pr) of P ions transferred between solid and liquid phases of soil in suspension (Hamon *et al.*, 2002). By applying the isotopic dilution principle, all E fractions have the same isotopic composition (IC), Pr values were calculated with the following equation:

$$IC = \frac{R}{E} = \frac{r}{Q_w} = \frac{R-r}{Pr}$$

Where, R/E is the isotopic composition of E ,

r/Q_w is the isotopic composition of P-ions in solution Q_w ($Q_w = C_P * V/M$)

$(R-r)/Pr$ is the isotopic composition of P-ions which participates to the dilution

Pr is obtained by the equation:

$$Pr = E - Q_w$$

We obtained then 12 to 21 experimental values of C_P and Pr for a given treatment: 4 to 7 amounts of P doses \times 3 times of isotopic dilution. These values were fitted to the Freundlich kinetic function (Barrow, 2008; Chardon and Blaauw, 1998; Stroia *et al.*, 2007) as follows:

$$Pr = v C_P^w t^p \text{ with } Pr < P \text{ mineral}$$

Where Pr is in mg P kg^{-1} soil, C_P is in mg P L^{-1} solution, t is in min; and v , w and p are fitted parameters. The v -parameter, i.e., the Pr value when $t = 1$ min and $C_P = 1 \text{ mg P L}^{-1}$, accounts for immediate reaction of P-ions in solution with solid phase. The w - and p -parameters describe the nonlinear increase in Pr values with C_P and t , respectively.

2.5. Statistical analysis

OMR descriptions and characteristics are available on the dataset available on Chapter II.1. The amount of P from the resources added in the soil (see Table 7, Chapitre II.1) was converted in kg P ha^{-1} , considering a bulk density value of 1.15 and 25 cm of ploughed layer depth C_P data were analyzed in separate analyzes of variance (ANOVA) for each fertilization treatments. The Pr values were described as function of C_P (mg P. L^{-1}) and t (min) using Equation (1). The estimation of v , w and p parameters were calculated using non-linear regression least squares (nls) for each OMR addition treatment and control treatment (no P addition). To compute statistical pairwise comparison of the v , w , and p parameters between OMR, we calculated the following F ratio.

$$F \text{ ratio} = \frac{[rSS_{(1+2)} - (rSS_1 + rSS_2)]/3}{(rSS_1 + rSS_2)/(n-6)}$$

where $rSS_{(1+2)}$ is the residual sum of squares of all Pr data obtained for Treatments 1 and 2; rSS_1 and rSS_2 are the residual sums of squares of the Pr data obtained for Treatments 1 and 2, respectively. The probability level attached to the F -ratio was calculated from the F distribution with 3 and $n-6$ degrees of freedom.

The influence of OMR parameters and soil solution composition (X) on OMR C_P and v , w and p parameters (Y) was assessed using Partial Least Square (PLS) regression models. OMR parameters include ash content, C, N, P, K, Ca, Mg and S contents, pH_w , soluble, hemicellulose, cellulose and lignin-like fraction contents, and water soluble P. Soil solution composition of the 17 treatments includes pH_w , dissolved organic carbon and nitrogen concentration, the silicates, sodium, sulfates, calcium, potassium and magnesium soil solutions concentrations. PLS regression is an approach that generalizes and combines features from principal component analysis and multiple regression. It combines predicting variables (X) (i.e. input variables: OMR qualities and fertilized soils characteristics) in one or more independent components to explicitly describe the dependent variable (Y) (i.e. the target: C_P and v , w and p parameters). The relative importance of individual predictors in the model was estimated by the variable of importance of projection (VIP). We consider that a predictor is significant when ($\text{VIP} > 1$). On the hand, for small value of VIP (< 0.8), we can consider that the predictor is not relevant. We can remove the variable from the model. Model strength was assessed by the variance of the

dependent variable that is explained by the model (R^2Y), the variance of the set of predictors used for the model (R^2X) and the variance of the dependent variables that can be predicted by the model (Q^2). A component or a model is considered significant when Q^2 exceeds a critical value Q^2 limit=0.0975. A separate model was tested for each of the four dependent variables C_p and v , w and p parameters and twenty-three independent variables (OMR parameters and fertilized soil solutions characteristics).

All statistical tests were performed with the R software (Team R, 2015), except the PLS regression which was done with the Tanagra software (Rakotomalala, 2005).

3. Results

3.1. Orthophosphate ions concentration in soil solution across treatments

The C_P value were plotted for the different treatments against the amount of total P added by the OMR application (based on 25 g dry matter in 1000 g soil). Because P content varied highly across OMR, the amounts of total P applied varied largely, from 6 kg P ha⁻¹ (Dolomite) to 5,955 kg P ha⁻¹ (Hyperfos).

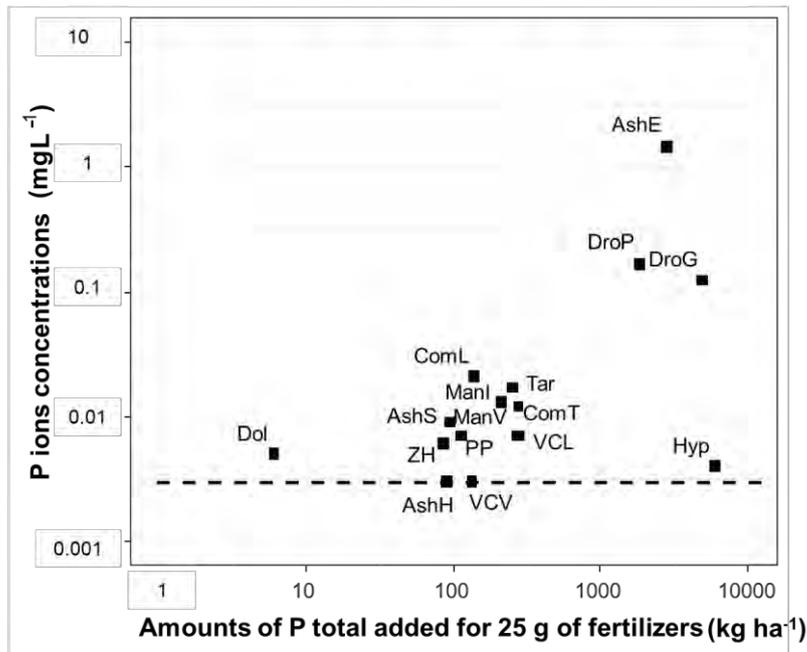


Figure 11: Variation of P ions concentrations in relation with amounts of P added from different sources of fertilizer. Representation in log-log scale. The dashed line represents the C_P of control. For more details on C_P values, see Table 9.

AshE: Eucalyptus ash, **AshH**: rice ash husk, **AshS**: rice ash straw, **ComL**: Plant and animal composts by LRI, **Tar**: Plant and animal composts by STOI Agri (Taroka phosphaté), **ComT**: Household fermentable composts, **VCL**: Plant and animal vermicomposts by LRI, **VCV**: Plant and animal vermicomposts from Vakinankaratra farmer, **ManI**: Manures from Itasy farmer, **ManV**: Manures from Vakinankaratra farmer, **PP**: Animal dejections without residues (park powder), **DroG**: Bat guano droppings, **DroP**: dried poultry droppings, **Hyp**: mixture of rock phosphate and volcanic black soil, **Dol**: dolomite, **ZH**: zebu horn.

The control had mean C_P values of $0.003 (\pm 0.002)$ mg P L⁻¹. The mean C_P of eucalyptus ash exhibited contrasting values in comparison to the other treatments, i.e. ~ 1.430 mg P L⁻¹ (± 0.079). Products from chicken and bat droppings presented mean C_P values of $0.155 (\pm 0.009)$ mg P.L⁻¹ and $0.130 (\pm 0.009)$ mg P L⁻¹, respectively. Although the Hyperfos fertilizer contained the highest total added P, almost all of the P remained insoluble giving a mean C_P value of $0.005 (\pm 0.001)$ mg P L⁻¹, not significantly different to that of control (Table 9). Furthermore, four materials have significantly the same mean C_P values to that of control (Table 9). i.e. zebu horn (0.006 ± 0.003 mg P L⁻¹), powder park (0.005 ± 0.002 mg P L⁻¹), vermicompost from Vakinankaratra (0.003 ± 0.001 mg P L⁻¹) and rice husk ash (0.003 ± 0.000 mg P L⁻¹).

Accordingly, products belonging to the same class (whether it is organic amendments or fertilizers) have no similar trend in C_P values.

3.2. Dynamics of Pr vs C_P and time

For a given soil treatment, 12 to 21 values of P ions concentration (C_P) and isotopic dilution (r/R) were obtained for each P treatment (4 to 7 doses of P input \times 3 isotopic dilution periods). We only presented in detail one data set obtained for the control, similar data sets are obtained for all other treatments (data not shown).

For all treatments, the C_P values obtained after applying a given P dose did not vary significantly across the three elapsed times of isotopic dilution for all P doses added (Figure 12A). The isotopic dilution (r/R) kinetics follow a simple power function of time whose parameters varied for each level of P dose. This results in a decreasing straight line of r/R vs time in a log-log representation axes (see Figure 2B for the control and annex for other treatments). These results were observed for all untreated and treated soils. By coupling the data set of C_P vs time (Figure 12A) and r/R vs time (Figure 12B), we get the typical curves of Pr vs C_P and time in Figure 12C.

After applying 0 to 200 mg P kg⁻¹ to the control soil, the C_P ranged from 0.003 ± 0.000 (t=3 min, P added = 0 mg P kg⁻¹ soil) to 0.148 ± 0.016 (t=300 min, P added = 200 mg P kg⁻¹ soil) mg P L⁻¹ (Figure 2A). The Pr values of the control ranged between 8.3 (t=3 min and dose=0 mg P kg⁻¹ soil) to 113.9 (t=300 minutes and dose = 200 mg P kg⁻¹ soil) mg P kg⁻¹ soil. For a given C_P value Pr values increase with the elapsed time of isotopic dilution. Besides, for a given time of isotopic dilution (t), Pr values increase with increasing C_P (Figure 12C). Thus, the Pr value of the control without added P was 8.3 mg P kg⁻¹ after 3 minutes, 22.7 mg P kg⁻¹ after 30 minutes and 50.5 mg P kg⁻¹ after 300 min. Considering 30 min of isotopic dilution, the Pr values varied between 22.7 mg P kg⁻¹ soil without applying P to 59.6 mg P kg⁻¹ soil after adding 200 mg P kg⁻¹ soil. We found that Pr values increase less than proportionally with both time (t) and C_P . All Figures were presented for the other treatments in Annexe 3.

For the (OMR+soil) mixtures, the range of C_P values vary largely according to the OMR (Table 9). In occurrence, at the three elapsed times of isotopic dilution (3, 30 and 300 minutes) and four levels of P dose between 20 to 200 mg P kg⁻¹ soil, C_P is sited between 0.050 to 0.578 mg P L⁻¹ with ManI. In contrary, the C_P range was smaller for AshS and is sited between 0.009 and 0.158 mg P L⁻¹.

The representations of Pr vs C_P and time on the same axis for both treatments emphasize the large difference in their dynamics. The range of C_P is of a different order of magnitude between the control (0.004 to 0.155 mg P.L⁻¹) and Hyp (0.010 to 0.287 mg P.L⁻¹) whereas the Pr values varied slightly and were between 8.3 to 25.6 mg P kg⁻¹ and 7.5 to 31.7 mg P kg⁻¹ respectively for the same time interval of isotopic dilution (3 min).

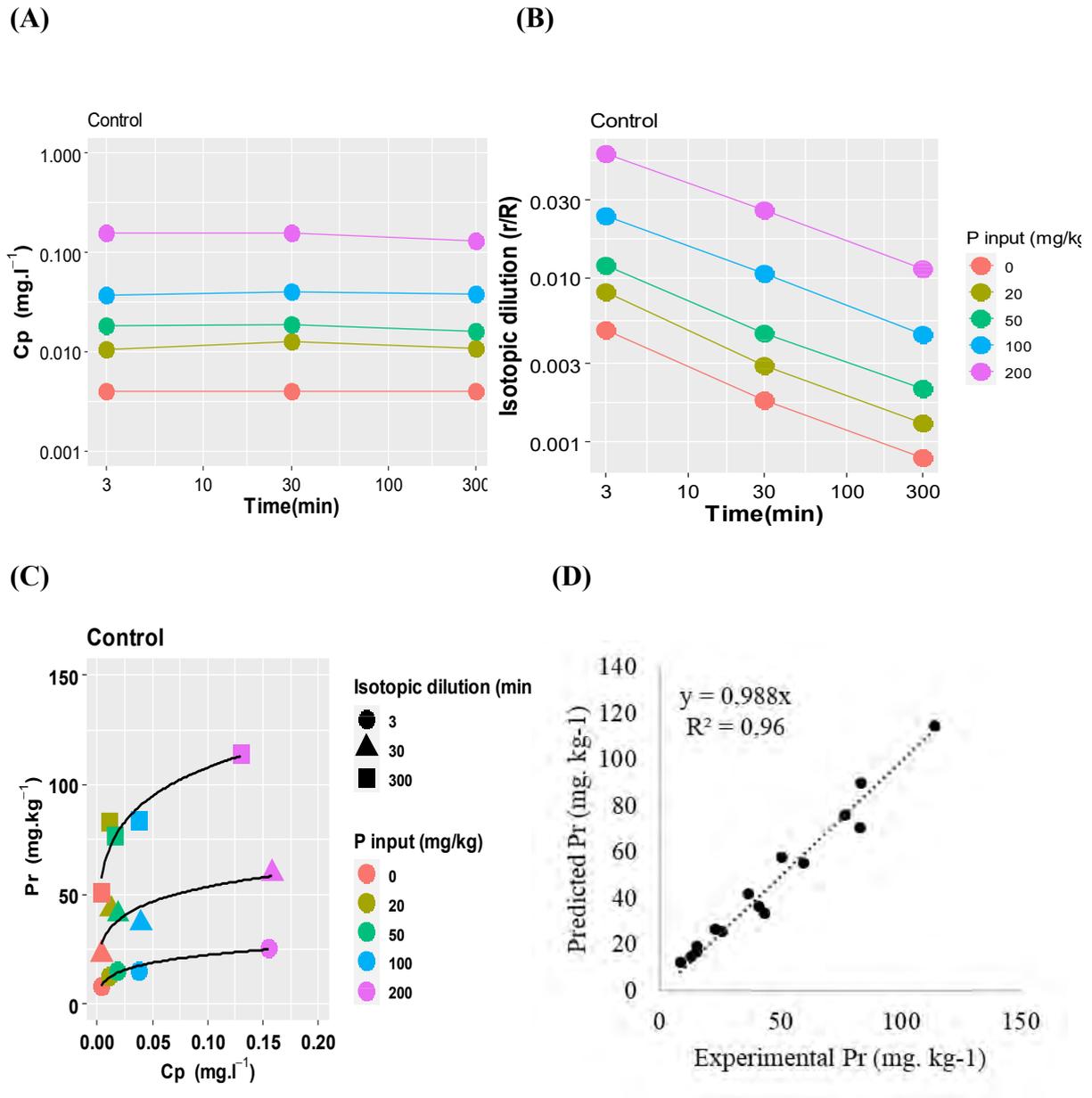


Figure 12: (A) Variation in P-ions concentration in soil solution (C_p) and (B) isotopic dilution ratio (r/R) during three times (3, 30 and 300 minutes) of isotopic dilution. Representation in log-log scale. (C) Amounts of diffusive P-ions in soil solution-solid interface as a function of P ions concentration in solution (C_p) and time (t). Symbols: experimental values. Lines: Pr values calculated with Freundlich kinetic function. (D) Relations between the predicted values of Pr by Freundlich kinetics ($Pr = v.C_p^w.t^p$) and the experimental values.

3.3. Setting in equation diffusive phosphate ions at the solid-to-solution interface of fertilized soils and comparison of parameters estimates

To describe Pr values as a function of time and C_p , across treatments, the v , w and p parameters of the Freundlich kinetic equation were estimated using non-linear regression procedure. The

estimated parameters and the associated statistics are in Table 9. Both experimental and calculated values of Pr are in Figure 12D for the control treatment. The v , w and p parameters estimates were respectively 25.7 (± 2.7), 0.22 (± 0.02) and 0.34 (± 0.02). We obtained a regression line ($y = 0.989x$, $R^2 = 0.96$, 15 observations) on the bisector line between experimental and calculated Pr values, showing the accuracy of Freundlich kinetic equation to fit experimental Pr values.

Table 9: Mean (and standard error) of P-ions concentration in soil solution (C_P) after organic an/or mineral resources addition and estimates (and asymptotic standard error) of the v , w , p parameters of kinetic Freundlich equation ($Pr = v C_P^w t^p$) for all organic and/or mineral resources treatments and the control soil.

Treatments	C_P <i>mg P L⁻¹</i>			Parameters					
				v		w		p	
VCV	0,003	(0.001)	hi	34,5	(4,6)	0,34	(0,03)	0,32	(0,02)
AshH	0,003	(0.000)	i	42,2	(3,0)	0,39	(0,01)	0,31	(0,01)
Ctrl	0,003	(0.002)	ghi	25,7	(2,5)	0,22	(0,02)	0,34	(0,02)
Hyp	0,005	(0.001)	fgh	29,8	(4,0)	0,25	(0,03)	0,31	(0,02)
Dol	0,005	(0.002)	fg	66,6	(7,0)	0,48	(0,02)	0,31	(0,02)
PP	0,005	(0.002)	fgh	34,8	(2,3)	0,41	(0,01)	0,31	(0,01)
ZH	0,005	(0.001)	fghi	33,9	(3,4)	0,33	(0,02)	0,35	(0,02)
VCL	0,007	(0.002)	ef	22,5	(2,1)	0,32	(0,02)	0,36	(0,02)
ComT	0,007	(0.001)	f	28,2	(2,5)	0,28	(0,02)	0,32	(0,02)
AshS	0,008	(0.002)	ef	32,6	(9,0)	0,42	(0,06)	0,37	(0,03)
ManV	0,012	(0.001)	de	23,8	(2,1)	0,30	(0,02)	0,31	(0,02)
Tar	0,012	(0.003)	de	20,7	(3,8)	0,20	(0,05)	0,34	(0,02)
ManI	0,020	(0.007)	cd	19,1	(2,0)	0,25	(0,02)	0,35	(0,02)
ComL	0,022	(0.006)	c	24,7	(3,7)	0,24	(0,03)	0,30	(0,03)
DroG	0,130	(0.007)	b	38,4	(2,8)	0,30	(0,03)	0,34	(0,01)
DroP	0,155	(0.009)	b	113,5	(9,0)	0,67	(0,04)	0,33	(0,01)
AshE	1,430	(0.079)	a	32,0	(1,4)	0,57	(0,06)	0,27	(0,01)
p value	<0.001								

p level of statistical significance of F ratio from ANOVA. C_P values with the same letters (a and b) indicates no significant differences between treatments. Fertilizer resources products with the same color belong to the same type.

The immediate reactions, v -parameter, which is the Pr value after 1 minute of isotopic dilution when C_P is 1 mg P L⁻¹, across the 17 treatments ranged between 19.1 (± 1.9) in ManI and 113.5 (± 8.9) in DroP. Compared to that of control, v -parameter can increase by 345% with DroP or decreased by 25% with ManI. The w -parameter was between 0.20 (± 0.05) and 0.67 (± 0.04) corresponding to Tar and DroP, respectively. We observed slight variation of the p -parameter compared to v and w ; values were between 0.27 (± 0.01) and 0.37 (± 0.03), belonging to AshE and AshH fertilizations.

The pairwise comparison of the (v , w , p) parameters for the different treatments is presented in Annexe 4. The calculation of the F -ratio indicated that v , w and p parameters differed significantly between some treatments, see for example the Figure 13A and 3B in which the (ComL vs ManI) did not differ significantly. By contrast, Figure 13C and 3D showed the pairwise comparison of (VCL vs DroP) for which there is a significant difference. The results

revealed significant difference of the (v, w, p) parameters between the control and the OMR treated soils, except the Hyp treatment (Annexe 4). No significant effect of P on the Freundlich equation parameterization between two treatments means that the two have the same behavior on P replenishment at a given C_P and time.

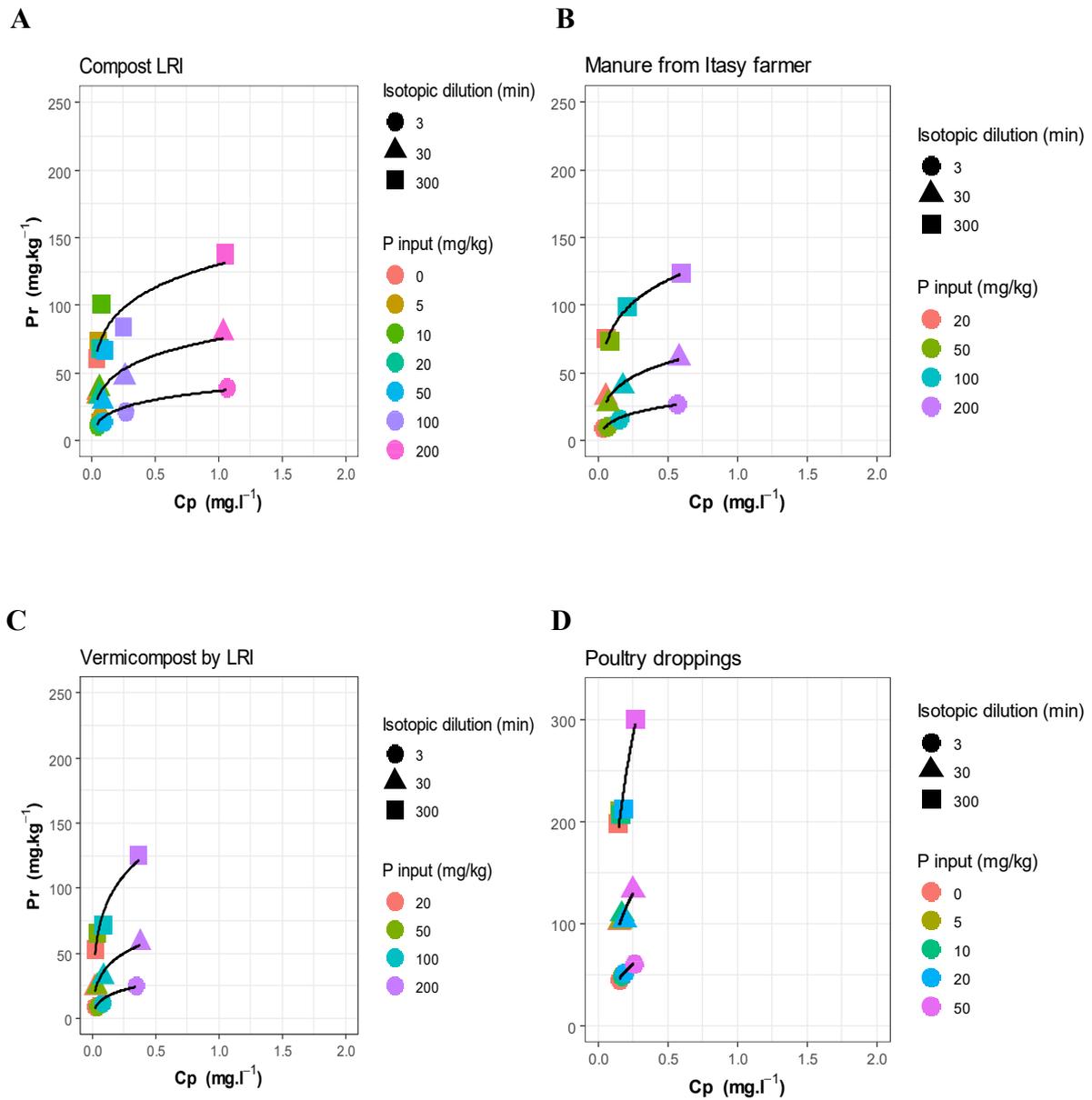


Figure 13: (A) and (B) comparison of ComL vs ManI where (v, w, p) parameters are not significantly different ($Prob=0.60$). (C) and (D) comparison between VCL vs DroP where (v, w, p) parameters are significantly different ($Prob<1\times 10^{-20}$).

3.4. Soil solution composition

Based on the soil solution composition, the pH values of the OMR-treated soil after 7 months of incubation varied between 4.7 and 9.4 (Table 10). Two products had similar pH values to that of the control, which remained 4.7. The pH for the other resources applications was higher. i.e. between 0.3 and 4.7 units more compared with the pH of the control. Eucalyptus ash and dolomite had the highest pH values, 9.4 and 8.2 respectively, while the remaining treatments had pH around 5 and 6 units.

The addition of eucalyptus ash led to greater total organic C, Na and K concentration (Table 10). The highest dissolved organic N concentration is obtained with the chicken manure treatment, the Si concentration with the Taroka product, the S and Ca concentrations with the bat guano and the Mg concentration with the dolomite.

Table 10: Soil solution composition of the untreated- and the OMR-treated soils.

	C_P	pH _{mix}	DON	DOC	Si	Na	S	Al	Ca	Fe	K	Mg
Units	mg.L ⁻¹											
AshH	0,003	4.7	9.1	18.7	2.78	1.25	0.7	0.01	1.7	< 0.02	15.2	1.03
VCV	0,003	4.7	7.1	15.5	1.33	1.72	0.7	<0.01	3.2	< 0.02	7.2	1.78
Ctrl	0,003	4.7	1.3	19.4	1.09	0.34	0.5	0.28	0.1	< 0.02	1.9	< 0.02
PP	0,005	5.1	8.5	21.8	1.33	2.73	1.4	<0.01	2.1	< 0.02	14.9	1.38
ZH	0,005	5.0	3.2	28.4	1.28	3.31	3.1	<0.01	1.6	< 0.02	3.8	0.41
Dol	0,005	9.3	2.2	30.0	0.11	0.29	5.1	0.04	9.7	< 0.02	7.2	8.55
Hyp	0,005	5.7	2.1	19.4	0.92	2.09	1.4	<0.01	1.2	< 0.02	1.6	0.20
ComT	0,007	5.6	3.6	17.6	1.94	3.58	3.1	<0.01	2.2	< 0.02	5.7	0.47
VCL	0,007	5.9	2.9	31.1	1.47	2.84	2.4	<0.01	1.1	< 0.02	4.8	0.28
AshS	0,008	6.0	1.1	22.2	2.70	0.69	1.3	1.05	0.1	0.60	7.2	< 0.02
ManV	0,012	6.4	4.3	40.2	1.77	4.85	4.6	0.06	0.8	< 0.02	19.6	0.07
Tar	0,012	6.0	6.4	19.4	3.25	6.84	4.2	<0.01	5.1	< 0.02	11.7	1.03
ManI	0,020	6.6	8.2	43.5	2.60	5.40	4.8	0.07	0.6	< 0.02	36.3	0.05
ComL	0,022	6.3	4.0	33.7	1.60	3.69	4.0	<0.01	1.4	< 0.02	13.7	0.33
DroG	0,130	5.3	4.3	16.6	0.69	2.63	215.0	<0.01	237.0	< 0.02	6.7	3.01
DroP	0,155	6.7	41.4	36.6	1.23	15.30	15.3	<0.01	36.9	< 0.02	60.7	6.82
AshE	1,430	9.4	5.9	79.9	0.51	39.80	20.2	0.27	2.6	0.30	102.0	0.25

Resources with the same color belong to the same type.

3.5. Comparison of the E values ($E=Q_w+Pr$) across treatments

Application of OMR contributes to the modification of both soil solution P concentration (C_P) and dynamic of diffusive P transfer in soil solid and solution interface (Pr). As aforementioned, we assessed plant-available soil P (E value) as the sum of the amount of P-ions in solution (Q_w) plus soil P-ions which diffuse with time between solid and liquid phase of soils (Pr). i.e. the amount of P-ions that is transferred under a gradient of concentration. To deeply analyze the effect of soil fertilization on the dynamic of P, calculation of the E value after 120 days period of P-ions diffusion (E_{120}) was calculated using the Freundlich kinetic equation considering the C_P value in Table 9 and 120 days for t (Figure 14). We considered C_P equal to soil solution

concentration of each OMR addition and 120 days correspond to the rice cropping cycle of widely varieties cultivated in the Highlands of Madagascar (MAEP and DGM, 2018).

As a result, treatments with poultry droppings, bat guano droppings, eucalyptus ash have a kinetics of E largely located above that of the control, while those with dolomite, vermicompost from Vakinankaratra, rice husk ash and powder park are positioned very below the control. E value of the control was 456 mg P.kg⁻¹ soil and increased by 3.5-fold with an addition of DroP fertilizer. In contrast, PP treatment lowered E value by 62% in comparison to the control.

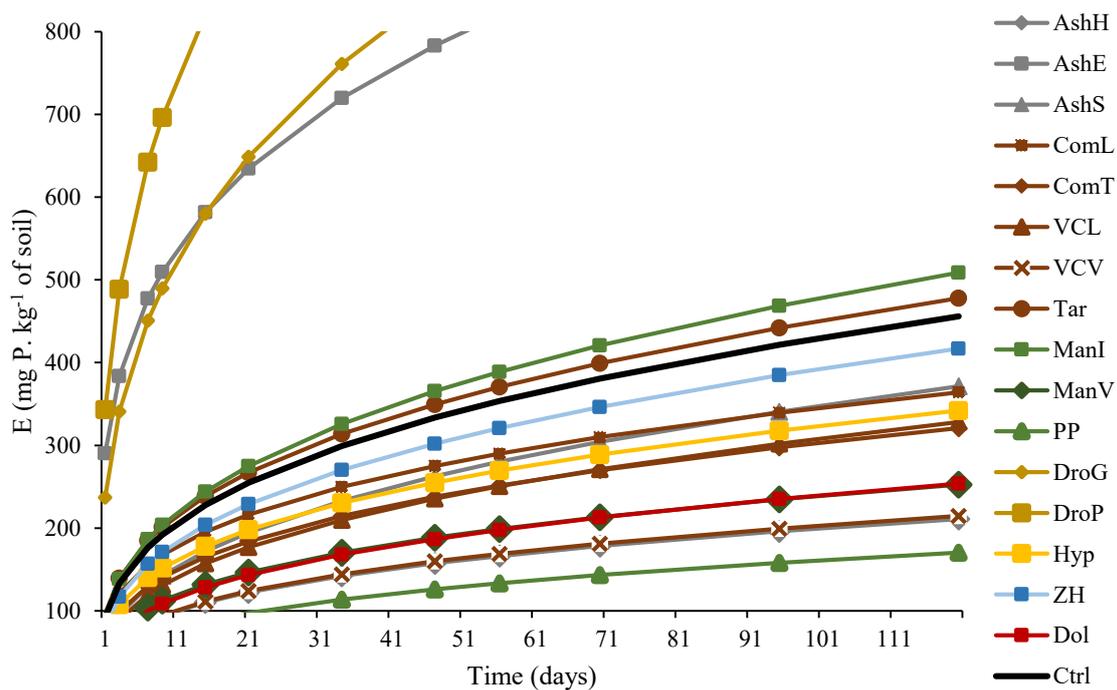


Figure 14: Kinetics of E-values ($Q_w + Pr$) of soil fertilized with the 16 organic and/or mineral products and the control over a period of 150 days.

AshE: Eucalyptus ash, **AshH**: rice ash husk, **AshS**: rice ash straw,

ComL: Plant and animal composts by LRI, **Tar**: Plant and animal composts by STOI Agri (Taroka), **ComT**: Household fermentable composts, **VCL**: Plant and animal vermicomposts by LRI, **VCV**: Plant and animal vermicomposts from Vakinankaratra farmer,

ManI: Manures from Itasy farmer, **ManV**: Manures from Vakinankaratra farmer, **PP**: Animal dejections without residues (park powder),

DroG: Bat guano droppings, **DroP**: dried poultry droppings,

Hyp: mixture phosphate rock and volcanic black soil,

Dol: dolomite,

ZH: zebu horn,

Ctrl: control

3.6. Determinants of C_P , v , w and p parameters variation

PLS regression models exhibited high fitness quality ($R^2Y > 0.50$) and significant prediction ($Q^2 > 0.097$) (Table 11) to explain C_P and w -parameter variability of each fertilization regime. The cross-validation selected only one component for both (stopping rule based on Q^2 value > 0.097). The OMR characteristics and behaviors explained 83% and 63% of the variability of the C_P and w -parameter, respectively. The most significant predictors to explain the P-ions solution concentration variability were K content of OMR, dissolved organic carbon concentration of fertilized soil (DOC), soil solution sodium (DNa) and potassium (DK) contents of fertilized soil. The C_P values seemed to be positively explained by retained variables. Besides, pH_w of the product, dissolved organic nitrogen of fertilized soil (DON), soil solution sodium (DNa), potassium (DK) and magnesium (DMg) concentrations of OMR-treated soils were the most significant variables explaining w -parameter. The w -parameter increased with increasing the retained variables. By contrast, we did not find significant independent variables to explain the variation of v and p -parameters (Table 11). Both target variables showed $Q^2 < 0$.

Table 11: Statistics of Partial Least Squares (PLS) regressions including OMR characteristics and fertilized soil solution composition as independent variables and the C_P , v , w and p parameters as dependent variables. The most relevant and significant independent variables for explaining the dependent variable presented a Variable Importance of Projection (VIP) > 1 .

PLS regression parameters	Dependent variables			
	C_P	v	w	p
Number of saved components	1	0	1	0
Proportion of variance explained (%)	83		63	
Q^2	0.133	< 0	0.104	< 0
Retained variables				
	K 1.15 (+)		< 1	
	Mg < 1		< 1	
	pH_w < 1		1.08 (+)	
	pH_{mix} < 1		< 1	
	DOC 1.03 (+)		< 1	
	DON < 1		1.15 (+)	
	DSi < 1		< 1	
	DNa 1.17 (+)		1.02 (+)	
	DK 1.06 (+)		1.21 (+)	
	DMg < 1		1.06 (+)	

Q^2 = cross validated R^2 ; (+): trend of standardized regression parameters. K: potassium content of OMR. Mg: magnesium content of OMR. pH_w : pH in water of OMR. pH_{mix} : pH in water of OMR and soil mixture. DOC: dissolved organic carbon concentration of OMR-treated soils. DON: dissolved organic nitrogen concentration of OMR-treated soils. DSi: soil solution silicates concentration. DNa: soil solution sodium concentration. DK: soil solution potassium concentration. DMg: soil solution magnesium concentration.

4. Discussion

4.1. Variation in C_P after OMR addition

Initial concentration of P-ions in soil solution C_P govern root P uptake, the possibly root interception is thus crucial to start the diffusion process in solid-solution soil interface (Barber, 1995). The root absorption occurs only above a threshold concentration in the soil solution *in situ*, and estimated to be 0.005 mg P L⁻¹ for maize (Barber, 1995).

In our study, C_P value of native soil (control) was 0.003 (\pm 0.002) mg P L⁻¹. This value seemed representative of levels encountered in Ferralsols (Randriamanantsoa *et al.*, 2013) and was in accordance with previous studies in Ferralsols from Madagascar and from Columbia (Bülher *et al.*, 2003; Masson *et al.*, 2001; Rabeharisoa, 2004; Rahantalalao, 2019). Rabeharisoa (2004) found C_P values around 0.005 mg P L⁻¹ for Ferralsol samples in Madagascar Highlands. Lower C_P values in highly weathered tropical soils are related either to their very low total P content and/or to their high contents in iron and aluminum oxides such as goethite and gibbsite which are known to be strong sorbents for P-ions (Hiemstra *et al.*, 2010; Parfitt, 1978). Soil samples in our study came from natural savannah, undisturbed for more than 30 years (100 years according to the owner). Our results indicate also that natural savannah, even in longer period, did not increase soil available-P status in agricultural Ferralsols. As a consequence, improving soil P nutrition requires systematically P fertilization. Though, after fertilization at a rate of 25 kg of OMR kg⁻¹ soil, C_P values were still low (<0.01 mg P L⁻¹. Randriamanantsoa *et al.*, 2013) with ten treatments defined in our study. These latter include the two vermicomposts from Vakinankaratra farmer and LRI, rice ash husk, Hyperfos, powder park, dolomite, zebu horn, compost from Andralanitra, and rice ash straw. Some fertilization regimes have C_P values not significantly different to that of the control. For the remaining treatments, C_P values range approximatively from 0.012 to 1.430 mg P L⁻¹. Hence, at this rate application, P acquisition for plant growth would depend only on P from grain in many fertilization regimes and require combination with P fertilizers to start the root interception of P-ions.

4.2. Effects of OMR addition on the dynamic of diffusive orthophosphate ions (Pr)

4.2.1. Applicability of Freundlich kinetic in Malagasy fertilized soils

Predicting plant available P depends greatly on assessing the actual amount of diffusive orthophosphate ions (Pr) driven by diffusion process (Morel, 2002). Diffusion occurs to equilibrate P-ions in soil solution as far as there is a gradient of P-ions concentration between the solid and solution soil phases after root absorption or P application. Two main variables strongly influence the dynamics of the diffusive soil P-ions. For a given operational condition, Pr greatly varies with P ions concentration in soil solution (C_P) and time. Combination of sorption-desorption experiments for 40 h followed by isotopic dilution kinetics method at

steady-state makes possible the identification of the interactive effects of both C_P and time in Pr .

In our study, dynamics of diffusive orthophosphate ions were analyzed after organic and /or mineral fertilization (OMR) in Ferralsol from Madagascar. As a result, for a given fertilization treatment, the Pr values increase both with C_P and time (Figure 12C, Figure 13). The C_P values, obtained after applying a given P dose, did not vary during the isotopic dilution (3–300 min), showing that the suspension (1 g:10 mL) is in steady state (Figure 12A). On the other hand, at each P dose input and thus at each C_P concentration, the isotopic dilution kinetic follows a power function of time. These results are in accordance with several studies in Malagasy soils (Andriamananjara, 2011; Rabeharisoa, 2004; Rahantalalao, 2019) confirming the validity of the method in our operational conditions.

The kinetic Freundlich functions have then been proposed to predict the dynamic of Pr . Modelling dynamic of diffusive soil P-ions in soil solid and solution interface allow the parametrization of v , w and p . The results demonstrate the strength of the Freundlich equation to suit very closely the experimental Pr values (Figure 12D), and confirm the ability of this function to accurately integrate both time and C_P effects for the calculation of Pr in Malagasy fertilized soils. Otherwise, the interest of Freundlich kinetic is its ability to extrapolate the value of Pr considering different ranges of C_P and time, at different timescales up to one year (Fardeau, 1993).

4.2.2. Comparison of the changes in E value

In our case, the dynamic of plant P availability E , which is the sum of the amount of P-ions in solution (Q_w) and the amount of diffusive P-ions (Pr), was calculated considering C_P equal to soil solution concentration of each OMR addition over a 120-days period of diffusion.

The results (Figure 14) showed that poultry droppings, bat guano droppings and *Eucalyptus* ash have the ability to supply P, when it is analyzed at the same rate of OMR addition (25 g kg⁻¹ of soil). Since 1-day period of diffusion, the amounts of plant available P (E value) are sited over 200 mg P kg⁻¹ of soil with poultry droppings, bat guano droppings and *Eucalyptus* ash treatments, while the remaining treatments showed values below 100 mg P kg⁻¹.

This general effect is the result of first, a significant modification of C_P at a rate of 25 g OMR kg⁻¹ of soil, and second, a significant modification (prob <10) of the 3 parameters (v , w , p) between treatments. As an illustration, the estimate of the rapid reaction v , that is the gross amount of ionic P that diffuses in 1 min when the C_P value is 1 mg P.L⁻¹, was 25.7 for the control and 113.5 for the poultry droppings, showing an increase in soil reactivity of 342%. The estimate of w -parameters, a slow reaction of P-ions with soil constituents, which accounts the effect of C_P on Pr , was 0.215 for the control and 0.671 for the poultry droppings. When C_P is equal to their soil solution concentration (0.003 mg P.L⁻¹ for the control and 0.155 mg P.L⁻¹ for

the poultry droppings), the effect of C_P on Pr is therefore, 0.29 ($= 0.003^{0.215}$) for the control and 0.28 ($= 0.155^{0.671}$) for the poultry droppings. The estimate of the p -parameter, a slow reaction of P ions with soil constituents, which accounts the effect of time on Pr , was 0.338 for the control and 0.327 for the poultry droppings. Therefore, each increase of time by a factor of 10, the increase in Pr is 2.18 ($=10^{0.334}$) and 2.12 ($=10^{0.323}$) for the control and *Eucalyptus* ash respectively, a diminution of -2% of soil reactivity. The effect of v is then more pronounced. It is noticeably that soil reactivity on diffusive P-ions is apparently different if we consider another duration of diffusion and another value of C_P for a comparison of two sets of parameters.

Accordingly, the kinetics of E located above the control indicate a greater soil reactivity for diffusive P-ions and then a number of potential sites to adsorb diffusive P-ions. In contrast, treatments leading to lower E kinetic to that of control mean a decrease in the number of reaction sites of diffusive P-ions with the solid phase, and thereby a lower plant P availability. Though, the amount of Pr had limit value and is lesser than P mineral. With respect to our C_P and duration time extrapolation, this latter situation is observed with dolomite, vermicompost from Vakinankaratra, and powder park fertilizations (Figure 14). Indeed, variation of diffusible P-ions in soil solution transfer is controlled by the soil physicochemical properties (Morel, 2001; Morel *et al.*, 2011). If the latter remains invariant, the parameterization (v , w , p) remains unchanged, whereas if the properties change, the P dynamic parameters also change. As observed, the dynamics of diffusible P-ions, which depend on the three parameters, were significantly modified by N fertilizer supply but not by P, due to a significant fall in soil pH_w following N fertilization (Stroia *et al.*, 2011). Hence, in comparison to the control, all fertilization regimes in this present study had led to a significant modification of soil physicochemical properties, except to that of the Hyperfos treatment, where the parameterization of the supply function, $Pr=f(C_P, t)$, did not differ significantly to that of the control (prob >0.01 , Annexe 4).

The effect of the Hyperfos product on P-ions in solution and diffusive P-ions amounts deserve attention. Despite a considerable P input equivalent to $\sim 6.000 \text{ kg P ha}^{-1}$ with Hyperfos treatment (Figure 11), neither the C_P value nor the parameters (v , w , and p) differ significantly from those of control. As a consequence, the combined effect on these two properties (C_P value and v , w and p parameters) results in slightly lower E values over a 120-day period of diffusion. The result is opposite from what would be expected given the higher P input, compared of an exportation of 10 kg P ha^{-1} per year. In fact, apatite P and carbonates such calcite (CaCO_3) and dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) constitute the sedimentary phosphate rock elements. Therefore, phosphate rock had a slightly liming effect on soil (Bekunda *et al.*, 2010). However, dissolution of phosphate rock and its subsequent P availability to the plant is closely related to soil pH. Several findings pointed out that low pH facilitates phosphate rock dissolution releasing P into the soil. Also, contribution of phosphate rock in plant P nutrition is more effective in acid soils

with $\text{pH} < 5$ than in alkaline soil (Morel and Fardeau, 1990; Zapata and Roy, 2004). As such, apatite P solubility increase linearly with soil acidity. In our study, soil pH had increased by 0.8 units after Hyperfos addition and then appeared too high to favor apatite P solubility, meaning that the application rate was greater than the effective rate. Furthermore, the absence of roots that can release protons (H^+), citric, and malic acids acidifying the soil environment may explain the insolubility of the phosphate rock (Hoffland *et al.*, 1989, Staunton and Leprince, 1996).

4.3. Determinants of C_P , v , w and p parameters variation

The determinants of C_P , v , w and p parameters variation were analyzed through OMR parameters and soil fertilized characteristics. The PLS regression models had predicted significantly the P-ions concentration in soil solution and the w parameter, the coefficient of Freundlich kinetic which accounts for the non-linear increase of Pr with C_P . Unfortunately, important variables to explain the variability of OMR v and p parameters were not identified with PLS regression model.

Based on literature (Mokolobate and Haynes, 2002; Nobile *et al.*, 2018, 2020; Rahantalalao, 2018), soil reactivity to bind diffusive P-ions, i.e. soil P-ions adsorption capacity, changes after application of OMR related to changes in soil organic carbon, in soil pH_w , and in soil P content. It is expected that (i) OMR addition decreases the soil P-ions adsorption capacity by enhancing soil P content, and then decreasing adsorptive sites for diffusive P-ions, (ii) in soils containing minerals with variable charges, such Fe or Al oxide, OMR increase the soil pH and then can decrease P-ions sorption due to a decrease in electrical potential on sorption surfaces (Antelo *et al.*, 2005; Barrow, 2017), (iii) OMR addition increase the organic carbon content and then can decrease P-ions sorption due to a competition between negatively charged organic molecules and P-ions for the same sorption sites (Regelink *et al.*, 2015). However, Dubus and Becquer (2001) reported that the role of organic matter on P-ions exchanges is highly variable and caution is warranted in drawing firm conclusions regarding the effect of soil pH changes on P availability (Sumner and Farina, 1986).

4.3.1. C_P , P-ions concentration in soil solution

The PLS regression underlined that the OMR parameters and fertilized characteristics were large enough to have consequences on C_P , explaining 83% of its variation. Dissolved organic carbon concentration of fertilized soil (DOC) was one of the best predictor and this latter influence positively C_P values. The result of the study is consistent with those of Shen *et al.* (2014) and Nobile *et al.* (2018). Shen *et al.* (2014) reported a linear increase in P Olsen to soil total P ratio with soluble organic C after applying poultry manure fertilizer. It can be related to a rapid decrease in P-ions adsorption with organic C due to a competition between P-ions and negatively organic compounds dissolved, and consequently increase the repulsion of P-ions (Barrow, 2017). Soil affinity can also be stronger for some organic P (Po) molecules, such as

inositol hexaphosphate (IP6), the main Po molecule present in soils, than for P-ions, thereby increasing P-ions in soil solution (Berg and Joern, 2006). Surprisingly, total P added from OMR was not retained among the important variables throughout the PLS regression model and inclusion of this variable did not improve the coefficient of the determination. The higher insolubility of the Hyperfos (Hyp) and the sparingly solubility of bat guano droppings (DroG) (Figure 11) may disturb the relation. Removing Hyp and DroG from the data had included total P added from OMR among the important variable to explain variability of P-ions concentration in soil solution (data not shown). Nevertheless, our results show that without the influence of P fertilization rate, dissolved organic carbon had a direct positive effect on the P-ions concentration in soil solution.

According to PLS regression, C_P variation along the treatments is positively related to K content of OMR, soil solution Na^+ and K^+ contents of fertilized soil. The importance of soil solution K^+ and Na^+ concentrations seemed unclear unless their influence on reducing soil pH_w acidity and thus reduce the availability of high energy sorption sites (Eduah *et al.*, 2019).

4.3.2. w -parameter, coefficient which accounts for the non-linear increase in P_r with C_P

Increase in P-ions concentration in soil solution implies increase in diffusive P-ions amounts. But the increase is non-linear, due to progressive saturation of the exchange surfaces and to electrostatic repulsion of induced P-ions. The more w parameter decreases, the more curvilinear is the curve (Morel, 2007). Hence, any increase in w parameter implies much higher soil affinity for P-ions and then increasing diffusive P-ions adsorbed in the solid phase.

In our study, the PLS-R model showed that w parameter seemed increased both with pH_w of OMR, dissolved organic nitrogen concentration, soil solution sodium, potassium and magnesium concentrations. Soil pH_w induced by OMR addition, had also positive effect but is less informative than pH_w of OMR itself to explain the variability of w parameter.

First, our result suggests that higher pH_w of OMR, and indirectly higher soil pH_w induced by OMR, favored adsorption of diffusive P-ions in solid phase. This was not consistent with previous findings suggesting a decreasing in the number of potential P sorption sites with increasing soil pH_w (Barrow, 2017; Nobile *et al.*, 2018; Rahantalalao, 2019). The increase in P-ions adsorption with increasing pH_w of OMR (and indirectly the soil pH_w) may be due to higher base cation concentration in fertilized soil where some OMR can provide larger quantities of positive charge to soil surface and free divalent base cations, such as Mg, that adsorb diffusible P-ions as Mg phosphates (Eduah *et al.*, 2019). This mechanism was observed by Rupa *et al.* (2001) where exchangeable Ca and Mg concentration in soil precipitated Ca and Mg phosphates and then increase in sites which are able to react with P-ions. Similarly, in our study, soil

solution Mg concentration had also a positive significant effect on w parameter, and consequently enhanced soil P-ions adsorption.

The PLS-R model also highlighted the central role of dissolved organic nitrogen on w parameter. The explanation of this result is that, as a part of dissolved organic matter (DOM), DON can interact with P in soils and influence P exchange at the soil solid solution interface (Guppy *et al.*, 2005). The direct effects of DON on P availability are thought to involve four processes: (i) competition between DON components (e.g. carboxyl groups) and P-ions (e.g. HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-) for mineral adsorption sites; (ii) complexation of surface metals (M) and release of these metals into solution, thereby removing adsorption sites (formation of M-DON); (iii) increased repulsion of phosphate anions by sorption of DON to positive sorption sites (colloid surface – DON); and (iv) formation of cation bridges leading to an increase in P adsorption sites (DON – Fe – PO_4 and DON – Al – PO_4). It is likely probable that, in our study, DON released from fertilizations results in increase in the number of potential P adsorption sites, and thereby the w parameter. It is noteworthy that P adsorbed in relation with the w parameter had the same behavior of that diffusive P-ions (Pr) i.e. a P-ions that can supply the soil solution after change in gradient of concentration.

The importance of soil solution K^+ and Na^+ concentrations seemed unclear unless their influence on soil pH_w to increase soil affinity P adsorption with divalent cations in neutral soil (Eduah *et al.*, 2019).

5. Conclusion

The aim of this study was to evaluate the extend effect of organic and/or mineral resources in plant P availability through the quantification of P-ions in soil solution (C_p) and of diffusive P-ions in soil solution-solid interface (Pr). P-ions in soil solution concentration in the native Ferralsol was very low, and addition of some OMR did not enhance C_p above 0.01 mg P L^{-1} . Freundlich kinetic equation was used to assess the Pr which represents more than 99% of available P. The results confirm the ability of Freundlich kinetic equation to accurately account for both time and C_p effects on dynamics of the transfer of P-ions at the soil-solution. This study highlights the changes in soil physiochemical properties following OMR application and then the parametrization of the supply function, $Pr = v C_p^w t^p$ ($Pr < P$ mineral). However, Hyperfos fertilizer did not have significant influence on the dynamic of Pr compared to that of the native soil. The higher application rate ($25 \text{ g of OMR kg}^{-1}$ of soil) leading to an increase in soil pH_w had lowered the solubility of the phosphate rock contained in the Hyperfos. This study aims also to predict the plant P availability by resources addition from their biochemical parameters and the fertilized soil characteristics. The PLS regression models had predicted significantly the C_p and the w parameter; however, important variables to explain the variability of OMR v and p parameters were not identified. K content of OMR, DOC, soil solution Na^+ and K^+

contents of fertilized soil were the important drivers to explain variation of C_p through OMR application. On the other hand, pH_w of the product, DON, soil solution Na^+ , K^+ , and Mg^{2+} were the most significant variables explaining w -parameter. Accordingly, soil pH, with respect to pH_w of the product and the soil solution cations concentration, and organic matter, relative with DOC and DON, govern the P-ions in soil solution concentration and the transfer of P-ions in soil solid-solution interface. However, difficulty encountered in PLS regression models in predicting v and p parameters intend to maintain the experimental determination of plant P availability. Changes in statistic methods such as random forests or generalized linear models would improve the prediction.

Synthèse de la Partie II

☞ Caractéristiques initiales des matières

Visiblement, une large gamme de MF existe sur les Hautes Terres de Madagascar pour remédier les carences en nutriments des Ferralsols, allant des matières organiques non transformées aux matières minérales issues des gisements de minéraux, des composts d'origine et de mode de fabrication différents et des sous-produits d'animaux jusque-là peu connus.

La caractérisation des matières a permis de mesurer la diversité des caractéristiques intrinsèques et de situations présentes dans notre gamme de produits. Les qualités intrinsèques des matières ont été appréciées en déterminant leurs teneurs totales en éléments et leurs caractéristiques biochimiques (fractionnement Van Soest). Le suivi de la minéralisation du C et l'N a été effectué sur des mélanges de 0,4% de matières par gramme de sol en incubation.

Les résultats émanant de cette partie ont montré :

- La particularité de la poudre de corne de zébu. Cette matière contient des teneurs remarquablement élevées en N et en C (Figure 8). Cette particularité provient de la structure chimique de la corne qui est essentiellement constituée de kératine, une protéine récalcitrante (Ichida *et al.*, 2001), indiquant également sa forte teneur en fraction équivalente-lignine. Par conséquent, la minéralisation de l'azote de la corne se fait de manière lente mais diffusive, c'est-à-dire que la corne permet de fournir aux plantes de l'N minéral tout au son développement (Figure 10). De l'autre côté, la dégradation du carbone organique présent dans la corne s'effectue à une vitesse relativement lente par rapport aux autres produits (Figure 9) ; seulement 50% du C introduit a été minéralisé au cours de la période d'incubation (150 jours). La corne de zébu est potentiellement un produit à la fois à valeur amendante et fertilisante azotée.
- La richesse en P et Ca totaux du guano de chauve-souris, le caractère chaulant de la dolomie qui diffère significativement des autres matières par sa forte teneur en Mg total.
- La richesse en K total des cendres d'*Eucalyptus* et du fumier de bovins (ManV1). Il est important de noter que la cendre d'*Eucalyptus* contient également des quantités non négligeables en Ca, Mg et P totaux.
- La richesse en fraction cellulosique des fumiers de bovins (ManV2), poudrette de parc, cendre de balle et de paille de riz.

Par rapport à la minéralisation en C et en N des produits :

- Les matières à faible teneur en C et classés en tant que engrais telles que la cendre de paille de riz et d'*Eucalyptus*, la dolomie, l'Hyperfos se minéralisent très rapidement par rapport aux autres matières et montrent une minéralisation extrêmement supérieure à 1 g C-CO₂ g⁻¹ de C apporté après 150 jours d'incubation. Par contre, les produits à base

de fèces d'animaux (fèces de bovins, fèces de volailles), compostés ou non, présentent des cinétiques de minéralisation plus faibles.

- Au début de l'incubation, l'azote minéral est largement sous forme ammoniacale tandis qu'à la fin de l'incubation, les nitrates prédominent.
- La vitesse de la minéralisation est plus importante dans les deux premières semaines d'incubation que durant les 55 derniers jours pour tous les produits.
- La corne de zébu et le guano (fiente de chauves-souris) présentent une minéralisation précoce la plus élevée tandis que la fiente de volailles une minéralisation précoce la plus faible.
- Vers la fin de l'incubation, alors que les apports de la corne de zébu, du compost issu de la décharge d'Andralanitra et de la fiente de volailles occasionnent une minéralisation nette de l'N les plus élevées, la dolomie et la fiente de chauve-souris induisent une immobilisation nette de l'N.

🔗 Phytodisponibilité en P induite par les matières

Il est accepté par de nombreuses études que le P phytodisponible est la somme des ions-P dissous et diffusibles dans le sol. La quantification des ions-P diffusibles est effectuée sur des suspensions du mélange (sol + matières) (1g : 10 ml) et est obtenue en couplant l'expérience de sorption/ désorption suivi par la méthode de traçage et de dilution isotopique. L'expérience de sorption/désorption consiste à apporter des doses croissantes de P. La méthode de traçage et de dilution isotopique consiste à introduire une quantité R connue d'ions- ^{32}P marqués et d'appliquer le principe de la dilution isotopique pour quantifier les ions-P transférés à l'interface sol solide-solution après 3, 30 et 300 minutes de transfert.

Dans cette étude, nous avons essayé de :

- Déterminer le paramétrage de l'équation cinétique de Freundlich décrivant la dynamique des ions-P diffusibles pour chaque traitement de sol fertilisé avec une gamme diversifiée de matières fertilisantes disponibles sur les Hautes Terres de Madagascar
- De réaliser la comparaison par paire des différents paramétrages correspondant aux différents traitements
- D'analyser et de quantifier l'écart de comportements entre les sols fertilisés. Pour ce faire, l'équation cinétique de Freundlich a été utilisée pour simuler les quantités d'ions-P bruts diffusibles en considérant la valeur C_P du mélange : 25 g de matières kg^{-1} sol et l'écoulement de temps de 120 jours.
- De prédire la phytodisponibilité du P à partir des caractéristiques initiales des matières et la composition de la solution du sol.

La valeur initiale de C_P équivaut à $0.003 \text{ mg P L}^{-1}$ pour le traitement contrôle (sol sans apport). Après apport de 25 g de matières fertilisantes kg^{-1} de sol, les valeurs initiales de C_P varient largement entre les traitements, entre 0.003 à $1.430 \text{ mg P L}^{-1}$. La concentration en ions-P dissous restent en dessous de 0.01 mg P L^{-1} pour beaucoup de traitements, comme la poudrette de par cet l'Hyperfos. Par contre, la cendre d'Eucalyptus permet de rehausser C_P jusqu'à $1.430 \text{ mg P L}^{-1}$.

La concentration des ions-P dissous reste constante pendant la durée du suivi de dilution isotopique. Pour une valeur donnée de C_P , correspondant à une dose de P, la valeur de Pr augmente avec la durée mais de façon moins que proportionnelle. Pour une période donnée de suivi du transfert, la valeur de Pr augmente avec C_P également de façon moins que proportionnelle. Quels que soient les traitements, après l'introduction de radioactivité R , le rapport r/R , indicateur de la dilution isotopique, diminue avec le temps et est décrit par la fonction puissance du temps proposée par Fardeau (1981,1993, 1996). Ces résultats sont en concordance avec plusieurs études faites tant à Madagascar qu'en France.

La description mathématique des valeurs expérimentales de Pr de tous les traitements à partir de l'équation de Freundlich est présentée dans le Table 9 et souligne le caractère hautement explicatif des variabilités expérimentales par la fonction cinétique de Freundlich. La valeur du paramètre v , qui est la quantité de Pr à C_P égale à 1 mg P L^{-1} après une durée de transfert t de 1 min , varie de 19.2 à $115.2 \text{ mg P kg}^{-1} \text{ sol}$. Le paramètre w , rend compte de l'effet moins que proportionnel de l'augmentation de la valeur de Pr avec l'augmentation de C_P , est compris entre 0.20 à 0.68 . Le paramètre p , qui rend compte de l'effet moins que proportionnel de l'augmentation de la valeur de Pr avec l'écoulement du temps, se situe entre 0.27 à 0.37 . L'analyse statistique deux à deux des différences de paramétrage entre les traitements a montré que les traitements fait varier significativement les paramètres de l'équation de Freundlich par rapport au contrôle, et que les traitements diffèrent significativement entre eux (Annexe 4). La modification significative des paramètres (v , w , p) par rapport au contrôle signale un changement au niveau des propriétés physico-chimiques du sol susceptible de réagir avec les ions-P diffusibles. Cependant, l'effet de l'Hyperfos sur les paramètres (v , w , p) n'est pas significatif par rapport au contrôle ; autrement dit, la capacité du sol à réapprovisionner des ions-P diffusibles, pour des valeurs de C_P et de temps données, est similaire entre le sol fertilisé avec de l'Hyperfos (à 25 g kg^{-1} de sol) et le contrôle (sol sans apport).

La paramétrisation de la cinétique de Freundlich pour chaque traitement peut être utilisée pour analyser les différences de réapprovisionnement de la solution en ions phosphates diffusibles. Dans notre cas, pour tenter de comprendre les conséquences de la double modification sur C_P et sur la dynamique sol-solution des ions P diffusibles, i.e. sur les paramètres (v , w , p), due à l'apport des produits, la cinétique $E (= Qw + Pr)$ sur une période de 120 jours pour chaque traitement a été calculée. Dans ce cas, les dynamiques de E pour les 16 traitements de sol

fertilisé et le contrôle (sol sans apport) ont été extrapolées en prenant C_P égale à chaque valeur initiale de C_P du sol après apport (Table 9) et t égal à 120 jours qui correspond à la durée moyenne du cycle cultural du riz pluvial des Hautes Terres. Des valeurs de Pr supérieures au contrôle signalent que l'intensité de la dynamique de Pr est plus forte. Au contraire, des valeurs de Pr inférieures au contrôle signalent que l'intensité de la dynamique de Pr est plus faible. Les valeurs modélisées de Pr sont présentées dans la (Figure 14) pour l'ensemble des traitements.

Par rapport au traitement contrôle, cinq traitements présentent des dynamiques supérieures. Les valeurs de Pr vs (C_P , t) des cendre d'*Eucalyptus*, du guano et de la fiente de volailles sont les plus remarquables. A l'inverse, dix traitements ont des dynamiques inférieures comparées au sol sans apport. Dans notre cas, les traitements qui ont des dynamiques supérieures ont la capacité de réapprovisionner plus le sol en ions-P. Néanmoins, la valeur de Pr possède une valeur limite et ne dépasse pas la valeur de P minéral du sol. Il est également important à noter que les courbes Pr vs (C_P , t) change si on prend un autre couple donné de C_P et de t .

Pour prédire la phytodisponibilité du P, les déterminants qui expliquent les variations de la concentration en ions-P dissous, les paramètres v , w et p ont été analysés par la régression PLS. Les variables explicatives sont les caractéristiques initiales des matières fertilisantes et la composition en élément de la solution du sol. Les modèles de la régression PLS ont expliqué significativement les variations de C_P et w . Par contre, les paramètres v et p n'ont pas pu être liés aux caractéristiques des matières et à la composition en élément de la solution du sol.

Selon les études existantes, les effets des fertilisantes sur la phytodisponibilité du P et l'adsorption des ions-P sur les particules solides du sol sont dépendants du pH induit par l'application des matières, de la teneur en matières organiques et de la teneur en P total.

La matière organique, représentée dans nos résultats par la concentration en C organique dissous du sol, influe positivement sur les valeurs de C_P , ce qui est conforme aux études existantes. L'augmentation des ions-P dissous en présence de la matière organique dans le sol résulte de la compétition sur les sites d'échanges entre les ions-P et les composés organiques chargés négativement, et par conséquent, augmente la répulsion des ions-P du sol (Barrow, 2017). Le pH_{eau} du sol, qui pourrait être représentée par les concentrations en K^+ et Na^+ dissous dans le sol, affecte aussi positivement C_P . L'augmentation du pH_{eau} diminue d'une façon immédiate l'adsorption des ions-P due à l'augmentation des charges négatives sur les surfaces du sol (Barrow, 2017) et à la diminution de l'affinité des argiles minéralogiques et des oxyhydroxydes de Fe et d'Al à adsorber les ions-P (Gérard, 2016).

Le paramètre w augmente avec le pH_{eau} et de la concentration en Mg^{2+} dissous. Plus le pH augmente, plus paramètre w augmente, et donc, plus l'adsorption des ions est favorisée. Ces résultats s'expliquent par l'augmentation du nombre en cations bivalents sur la surface du sol qui pourraient se précipiter avec les ions-P, augmentant ainsi l'adsorption des ions-P.

↳ Transition

Une fois les matières sont caractérisées, la partie III propose une typologie des matières fertilisantes par approche *a posteriori* et les paramètres des matières obtenus à partir de la partie II vont servir à expliquer l'appartenance des groupes de matières formés.

❧ PARTIE III

Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes de pour accroître la fertilité des sols



Photo 3: Préparation des assemblages des matières fertilisantes et du sol pour l'essai en serre (en haut à gauche), disposition des pots d'assemblages en conditions contrôlées sous serre (en bas à gauche), disposition des assemblages sur terrain en conditions réelles (à droite).

Chapitre III.1. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols – Conditions en serre

1. Introduction

Dans les pays en voie de développement tels que Madagascar, les sols subissent de fortes pressions anthropiques associées à la forte croissance démographique. Produire davantage pour combler les besoins croissants en alimentation peut aussi accroître les menaces sur la fertilité des sols (Reardon, 1995; Sunderlin *et al.*, 2005). Le riz étant la base de l'alimentation de la population, la production rizicole, assurée habituellement par la riziculture irriguée, ne satisfait plus la demande nationale.

Face à cette situation, l'expansion des surfaces aménageables sur les zones de « *tanety* » des Hautes Terres Malagasy a pris une ampleur durant ces deux dernières décennies (Raboin *et al.*, 2013). Cette conversion du changement d'usage pourrait constituer un levier pour atteindre la sécurité alimentaire du pays (Breumier *et al.*, 2018). La production de riz pluvial y reste néanmoins très faible, moins de 2 t ha⁻¹ (Minten *et al.*, 2007), par rapport à celle du riz irrigué.

La faible fertilité des sols de « *tanety* », l'accessibilité limitée des producteurs aux intrants chimiques ainsi que le mode de production et de gestion des terres expliquent ce faible rendement (Minten *et al.*, 2007). Les Ferralsols sont caractérisés par une acidité élevée, une teneur en aluminium toxique également importante, une teneur en matière organique relativement faible (<2 %) ainsi qu'une capacité d'échange cationique très faible (Roederer, 1971; Raharinosy, 1979; Rabeharisoa, 2004). Une récente étude a démontré que les éléments les plus limitants pour la riziculture sont le phosphore (P), l'azote (N), le calcium (Ca) et le magnésium (Mg) (Raminoarison *et al.*, 2020). Dans ce contexte, il apparaît crucial de développer des modes de production qui permettent de lutter contre l'appauvrissement de la fertilité des Ferralsols tout en respectant la durabilité du système. Le sol est une ressource non renouvelable et assure de nombreuses fonctions, sa protection et sa conservation sont donc cruciales (Pimentel *et al.*, 1987).

L'assemblage des matières fertilisantes (MF) organiques et/ou minérales apparaît comme une alternative pour améliorer la fertilité des agrosystèmes à bas intrants et à carences multiples (Bekunda *et al.*, 2010, Vanlauwe *et al.*, 2014a). Au sein d'une combinaison de matières, les effets bénéfiques, par effet de composition ou effet d'interaction, pourraient couvrir et lever les multiples carences des sols tout en favorisant la croissance et la nutrition des plantes et en stimulant les activités fauniques et microbiennes du sol. L'effet de composition est défini par un effet additif de chaque matière dans un assemblage. Elle correspond à la prédiction selon laquelle l'effet d'un assemblage est équivalent à la somme des effets des matières qui composent cet assemblage. L'effet d'interaction correspond à une performance globale non

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

additive d'un assemblage. Il résulte de mécanismes soient antagonistes (effet négatif des matières entres-elles) ou synergiques (effet positif des matières entres-elles). La conception d'une combinaison de matières performantes nécessite donc une typologie appropriée afin de bénéficier des interactions de complémentarité et/ou positives entre les MF.

Des travaux sur la typologie des MF disponibles à Madagascar ont déjà été réalisés à l'exemple de la thèse de Rabetokontany (2013). Ces travaux se sont intéressés aux qualités des matières pour en dresser une typologie. En effet, il existe deux méthodes pour élaborer une typologie des matières (Figure 15): (i) l'approche *a priori* et (ii) l'approche *a posteriori*.

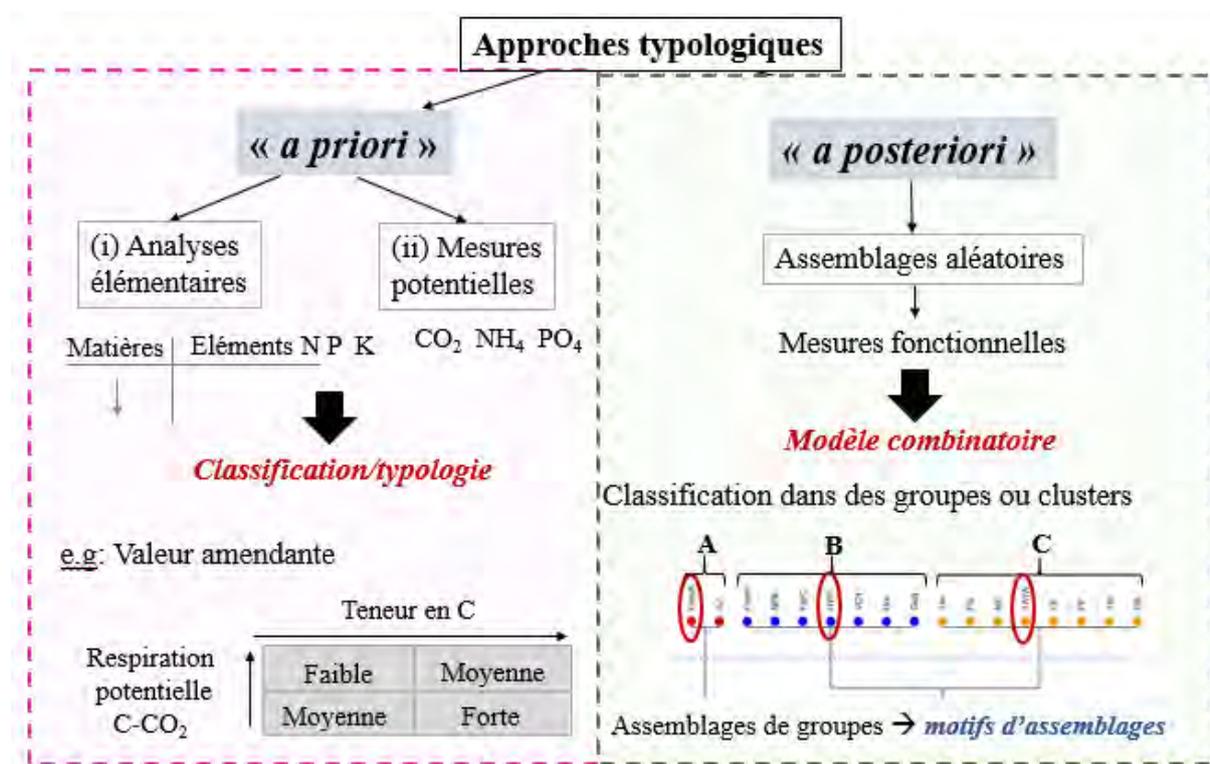


Figure 15: Schéma conceptuel des deux approches de typologie des matières. N : teneur en azote. P : teneur en phosphore. K : teneur en potassium. CO₂ : dioxyde de carbone respiré. NH₄ : quantité en ammonium. PO₄ : quantité en ions phosphates. C : carbone. A, B, et C : groupes fonctionnels. Motifs d'assemblages : assemblages de groupes fonctionnels.

La première méthode *a priori* est une typologie basée sur les caractéristiques élémentaires et potentielles des matières fertilisantes (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 les cinétiques de minéralisation de matières lorsqu'elles sont mélangées au sol. Une formulation de la combinaison des apports peut être ainsi proposée en supposant que les matières qualitativement différentes auraient des effets complémentaires sur la fertilité du sol et la croissance des plantes. C'est pour cette raison que la typologie est qualifiée d'« *a priori* », car les effets des mélanges sur les fonctions du sol et de

la plante sont supposés et prédits à partir des caractéristiques intrinsèques des matières. La deuxième méthode *a posteriori* est basée sur les réponses (réponses sur les paramètres de fertilité du sol et/ou de développement de la plante) de différents assemblages de matières à travers l'utilisation d'un modèle combinatoire récemment publié (Jaillard *et al.*, 2018a, 2018b), qui optimise l'explication des réponses observées en répartissant les MF dans des groupes homogènes ou clusters. L'approche *a posteriori* a été adoptée pour cette étude.

L'objectif de cette étude est d'identifier les assemblages de matières qui maximisent les paramètres de la fertilité des sols, la croissance et la nutrition des plantes. D'une part, ces assemblages doivent améliorer la nutrition minérale de la plante et permettre une production élevée et d'autre part, ils doivent assurer la pérennité de la fertilité du sol et améliorer sa qualité.

Les objectifs spécifiques sont :

- (i) de définir des classes de matières expliquant la performance des paramètres de fertilité des sols, de croissance et de nutrition des plantes,
- (ii) de mettre en relation les effets de complémentarité des matières classées dans différents groupes et,
- (iii) de mettre en évidence les aspects appliqués des résultats obtenus.

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

Hypothèse 1 : Les matières peuvent être classées dans différents groupes selon leurs effets sur le sol et la plante et les assemblages des groupes expliquent de manière satisfaisante les paramètres de fertilité des sols, de croissance et de nutrition des plantes mesurés.

Hypothèse 2 : Les classifications dans des groupes sont liées à des effets de composition et /ou d'interaction, selon les paramètres.

Hypothèse 3 : L'élaboration d'une typologie par approche *a posteriori* peut constituer un support théorique pour favoriser une innovation agronomique.

2. Matériels et méthodes

2.1. Échantillonnage et analyse des sols

Un échantillon de sol a été collecté sur la couche superficielle (0-20 cm) d'une parcelle agricole provenant de la Région Itasy, près de la localité d'Imerintsiatosika (19° 05' 40''S; 47° 25' 65'' E; 1480 m d'altitude). Le site de prélèvement était sous savane naturelle (appelée localement 'bozaka', une végétation composée principalement d'*Aristida sp.* Ce site n'a pas fait l'objet d'une gestion agricole depuis au moins 30 ans. Le sol est classé selon la taxonomie des sols du WRG en tant que Ferralsols (FAO, 2014). Après la collecte, les échantillons de sol collecté ont été séchés à l'air, tamisés à 2 mm pour les analyses et à 5mm pour l'expérience. Le sol avait un pH acide (<5), une faible teneur en P Olsen de 3,8 mg. kg⁻¹, une faible CEC (<2 cmol⁺ kg⁻¹) et

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

de très faibles teneurs en cations échangeables (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}). Une faible teneur en N total a également été observée ($<2,5 \text{ g kg}^{-1}$). La concentration de carbone organique dans le sol est relativement modérée avec $29,2 \text{ g kg}^{-1}$. Sa texture était dominée par des fractions fines (70% d'argile + limons fins) (Tableau 12).

Tableau 12: Caractéristiques du sol utilisé dans l'essai

Paramètres	Unités	Valeurs
Eléments		
C total	g kg^{-1}	29,2
N total	g kg^{-1}	2,07
P total	g kg^{-1}	1,43
pHeau		4,7
CEC	$\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$	1,73
Ca_ex	$\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$	0,42
K_ex	$\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$	0,06
Mg_ex	$\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$	0,15
Al_ex	$\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$	0,59
P Olsen	mg P. kg^{-1}	3,76
KCl-extractable NH_4^+	mg N. kg^{-1}	7,03
KCl-extractable NO_3^-	mg N. kg^{-1}	4,00
Granulométrie		
Argile	%	28,9
Limons fins	%	42,4
Limons grossiers	%	15,3
Sables fins	%	8,6
Sables grossiers	%	4,6

2.2. Collecte des matières fertilisantes organiques et minérales et doses d'apport

Dix-sept produits organiques et/ou minéraux ont été testés dans cette étude. Ils ont été obtenus auprès des agriculteurs de la Région Vakinankaratra et de la Région Itasy, et des commerçants locaux. Pour faciliter la dénomination des différents produits, les matières ont été regroupées par type de produits : 2 cendres végétales, 3 composts de matières végétales et animales, 2 composts fermentescibles alimentaires et/ou issus des produits ménagers, 2 fumiers, 1 déjections animales sans résidus, 2 fientes d'animaux, 1 corne broyée, 1 farine de crustacés, 1 dolomie, 1 engrais phosphaté et 1 engrais tertiaire. La liste des matières est détaillée en Annexe 1 et représente une grande catégorie de produits habituellement utilisés par les agriculteurs. Certains produits répondent aux normes NF U42-001 et NF U44-051, se référant respectivement aux dénominations et spéciations des engrais et des amendements organiques : les engrais requièrent un produit contenant au moins un des éléments majeurs $\geq 3\%$ ou $\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O} \geq 7\%$, tandis que les amendements organiques exigent un produit dans lequel la teneur en matière organique est au moins égale à 20% et la teneur en macronutriments majeurs inférieure à 3% (Annexe 6).

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

La dose d'apport varie selon l'appréciation des agriculteurs à utiliser les matières sélectionnées. D'après une enquête menée auprès des agriculteurs de la région, neuf matières fertilisantes s'appliquent en tant qu'amendement organique, et huit en tant qu'engrais minéraux. Ainsi, nous avons opté pour les doses suivantes : 6 t MS ha⁻¹ et 500 kg MS ha⁻¹ pour les amendements organiques et les engrais minéraux, respectivement. Cette dose d'apport a été la même que soit les assemblages. Le N:P:K, quant à lui, était appliqué à 150 kg ha⁻¹. Ces informations sont détaillées dans le Tableau 13.

Tableau 13: Classification des matières fertilisantes à partir des enquêtes paysannes et leurs doses d'apport

	Amendements organiques		Engrais	
Doses d'apport	6 t MS ha⁻¹		500 kg MS ha⁻¹ Sauf NPK : 150 kg MS ha⁻¹	
Classification	Fumier provenant d'Itasy	FumI	Dolomie	Dol
	Fumier provenant de Vakinankaratra	FumV	NPK	NPK
	Compost par Madacompost	ComM	Phosphate naturel	Hyp
	Corne de zébu	CZ	Fiente de volailles	FieV
	Lombricompost par l'association TATA	VCT	Fiente de chauve-souris	FieC
	Lombricompost provenant de Vakinankaratra	VCV	Farine de crabe	FarC
	Taroka	Tar	Cendre de balle de riz	CB
	Compost d'Andralanitra	ComT	Cendre d'Eucalyptus	CE
	Poudrette de parc	PP		

2.3. Variété de riz utilisée

La variété de riz Chhomrong Dhan a été utilisée dans cette étude. Il s'agit d'une variété d'origine népalaise introduite à Madagascar dans les années 1990 (Raboin *et al.*, 2013). La variété de riz pluvial Chhomrong Dhan est destinée aux altitudes supérieures à 1 300m, se caractérise par une tolérance au froid et à la pyriculariose, une productivité élevée et se comporte bien sur les sols peu fertiles. Une enquête en 2010, dans deux communes des Hautes Terres, indiquait que 80% des surfaces cultivées en riziculture pluviale sont occupées par la variété Chhomrong Dhan (Raboin *et al.*, 2014).

2.4. Description de l'expérience

L'essai d'assemblage a été effectué en milieu contrôlé sous serre dans l'enceinte du Laboratoire des Radio Isotopes, durant la saison culturale 2017-2018.

L'approche *a posteriori* par analyse combinatoire a été choisie pour dresser une typologie des matières. L'analyse combinatoire, qui sera décrit dans le paragraphe suivant (§2. 6. 1), consiste à sélectionner plusieurs assemblages de matières pour pouvoir les séparer dans des groupes homogènes selon leurs réponses sur un paramètre donné. Dans cet essai, le nombre de matières

à apporter dans les assemblages est fixé à trois afin d'assurer que la carence multiple du sol soit comblée tout en proposant des assemblages quantitativement gérables par les agriculteurs. Les assemblages ont été sélectionnés de manière à représenter à la même fréquence chaque matière fertilisante. Dans le but de faciliter le suivi et les analyses post récolte, 132 assemblages ont été retenus sur un total de 680 (19%). L'effet des matières seules (17 matières) a été aussi testé. La composition des assemblages est listée dans l'Annexe 5. Le design expérimental a été mis en place de manière à être en adéquation avec les entrées requises par le modèle combinatoire.

L'expérience a été conduite dans des pots en PVC de 30 cm de hauteur et de 16 cm de diamètre dans lesquels ont été ajoutés 5 kg de sol séché à l'air. Ce sol est ensuite mélangé avec les assemblages. Chaque pot correspondait ainsi à un assemblage. Puis, trois graines de riz ont été semées dans chaque pot. Le sol a été ensuite humidifié afin de ramener et garder l'humidité à 70% de la capacité de rétention en eau. L'expérience s'est arrêtée à 60 jours puisque certains plants appartenant aux traitements témoins et présentant de faible performance étaient sur le point de mourir, et les pots semblent exigues pour contenir les plants jusqu'au rendement.

2.5. Variables mesurées

Au cours de l'expérimentation, la hauteur des plantes, le nombre de talles et de feuilles ont été suivis hebdomadairement jusqu'à la récolte.

A la fin de l'expérience, une appréciation des traits physiologiques de la plante a été effectuée en utilisant des appareils spécifiques pour déterminer les indices SPAD (Single Photon Avalanche Diode), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et PRI (Photochemical Reflectance Index) des plants. La teneur en chlorophylle des feuilles a été estimée avec l'appareil Minolta Chlorophyll Meter SPAD-502 (Japan). La valeur SPAD donne 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). PlantPen NDVI 300 donne des estimations quantitatives de la croissance végétale et de la biomasse (Tucker, 1979). Une végétation saine produit des valeurs élevée en NDVI. PlantPen PRI 200 informe 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, 2010).

Après 60 jours de croissance, les parties aérienne et racinaire des plantes ont été coupées et séparées, lavées puis séchées à l'étuve à 60°C pendant 48 h afin d'évaluer leur poids sec. Les teneurs en carbone et azote des parties aérienne et racinaire ont été déterminées en utilisant un microanalyseur CHNS/O ((Flash 2000 Series, CHNS/O 122 Analysers Thermo Scientific, IRCOF, France). La teneur en phosphore a été mesurée par colorimétrie (bleu de molybdène) après incinération à 600°C (pendant 4h) et extraction avec de l'HCl à 6M. Les teneurs en potassium, calcium et magnésium ont été dosées par la méthode spectrophotométrie à

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

absorption atomique (iCE 3000 Series AA Spectrometer, Belgium) après extraction par cobalt de strontium de lanthane (concentré à 25%). La quantité totale d'élément absorbé par la plante a été ensuite calculée en multipliant le teneur en élément des plantes avec la masse sèche de la biomasse aérienne ou racinaire.

En ce qui concerne le sol, les échantillons ont été séchés à l'air libre afin de mesurer le pH_{eau} , les teneurs en carbone et en azote. Le pH_{eau} a été dosé à l'aide d'un pH-mètre équipé d'une électrode pH (pH 211 Microprocessor pH Meter, Romania) selon un rapport en volume de 1:2,5. L'estimation des teneurs en carbone et en azote des sols a suivi le même protocole que pour ceux des plantes. La Figure 16 suivante résume l'ensemble des variables mesurées au cours de l'étude.

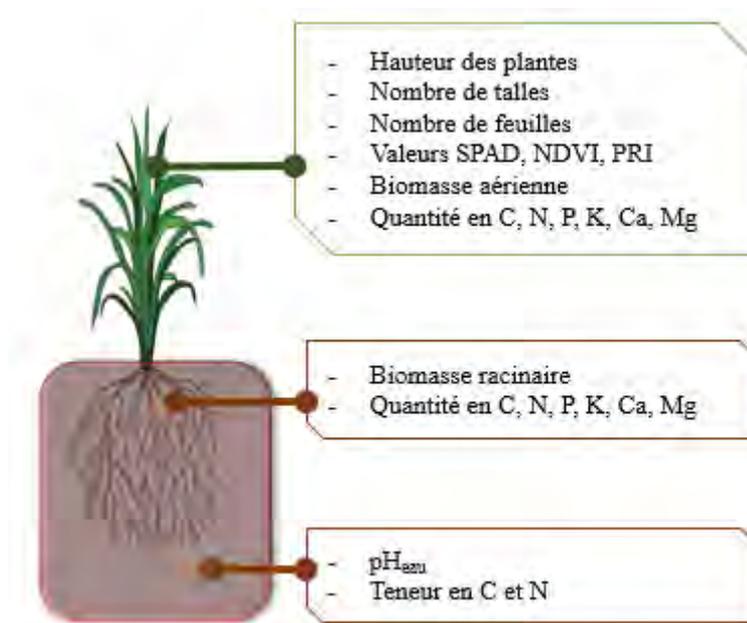


Figure 16: Schéma récapitulatif des variables mesurées au cours de l'expérimentation. SPAD: Single Photon Avalanche Diode. NDVI: Normalized Difference Vegetation Index. PRI: Photochemical Reflectance Index. C: Carbone. N: Azote. P: Phosphore. K: Potassium. Ca: Calcium. Mg: Magnésium.

2.6. Analyses statistiques

2.6.1. Analyse combinatoire

Dans le modèle, la prédiction de la performance des assemblages peut être déterminée en s'appuyant sur la seule connaissance de leurs composants. La performance des assemblages la réponse observée est désignée comme étant la production de biomasse, le recyclage des nutriments ou les paramètres sur les propriétés du sol. Le modèle combinatoire est basé sur une procédure qui regroupe les individus ou composants en groupes en fonction de leurs effets sur une performance des assemblages observée et pour laquelle l'ajustement aux données observées est maximisé. Ce modèle se déroule en deux temps : une étape de calibration suivie d'une étape de validation pour une performance mesurée. Dans les deux cas, une approche itérative est

utilisée. Dans l'ensemble, la procédure construit un arbre hiérarchique de classification des individus/ composants en groupes qui explique au mieux la performance observée. La Figure 17 récapitule les étapes de constitution d'une typologie des composants par approche *a posteriori*. Pour illustrer la démarche, nous choisissons quatre MF : le fumier, le compost, les cendres et la dolomie ;

- **Étape de calibration**

Chaque assemblage A est une combinaison des individus ou entités qui appartiennent à différents composants $i = \{1, \dots, s\}$. Dans un premier temps, le modèle regroupe les i composants en σ nombre de clusters ou de groupes homogènes ; donc, chaque assemblage est considéré comme une combinaison de groupes dont chaque combinaison de groupes est désignée sous le terme de motif d'assemblage. 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'.

Pour σ nombre de groupes, une combinaison de $2^\sigma - 1$ motifs d'assemblages M_k , parmi lesquels m auront été testés au cours de l'expérience ($k = 1, \dots, m$) peut être obtenue.

Dans un second temps, les assemblages A_k testés peuvent ainsi être regroupés par motif d'assemblage, c'est-à-dire que le modèle rassemble tous les assemblages qui appartiennent au même motif d'assemblage M_k . A partir du regroupement des motifs d'assemblage, on peut définir par $A_{i,k}$ (avec $i = 1, \dots, s$ et $k = 1, \dots, m$) l'ensemble des motifs d'assemblage qui contient au moins un individu des composants i . 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).

Nous pouvons définir $F_{observée}(A)$ la performance mesurée de l'assemblage, telle la production de biomasse, le stockage en nutriments, ou l'activité microbienne. 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 paramètres de croissance, nutrition ou fertilité du sol. Par conséquent, la valeur modélisée $F_{modélisée}(A)$ associée à un motif d'assemblage M_k est la moyenne des performances d'un groupe des assemblages qui partage le même motif d'assemblage. 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 et constitue tous un même motif d'assemblage (a).

$$F_{\text{modélisée}}(A \in A_k) = \bar{F}(A_{i,k})$$

$$i \in A$$

Les valeurs modélisées sont ensuite confrontées aux valeurs observées et le modèle utilise le coefficient de détermination ou d'ajustement R^2 comme critère de classification.

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

Le processus itératif est répété en déplaçant les composants d'un groupe à un autre de manière à optimiser le coefficient de détermination. *Par exemple, les cendres sont classées dans le groupe 'b' au lieu du groupe 'a'*. L'objectif est d'obtenir un R^2 optimal pour que la variance des performances des assemblages appartenant au même motif d'assemblage soit faible. Une fois le meilleur regroupement des composants réalisé, c'est-à-dire la répartition des composants dans des groupes qui explique mieux la performance des assemblages est déterminée, le processus itératif continue avec un nombre de groupe supérieur ($\sigma = 3$), et ainsi de suite jusqu'à $\sigma = s$, où le nombre de groupes est égale au nombre de composants. R^2 varie de 0 à 1 et augmente avec le nombre de groupes formés pour atteindre la valeur de 1 lorsque le nombre de groupes équivaut au nombre de composants ($\sigma = s$). Un arbre de classification hiérarchique est construit à chaque étape de regroupement des composants.

- **Étape de validation**

Pour tester le pouvoir prédictif ou l'efficacité de prédiction du modèle, la même approche itérative est utilisée par cross-validation. Plus précisément, une observation est retirée 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 calculée. 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 coefficient d'efficacité E calculé selon la formule suivante.

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

L'efficacité E varie de $]-\infty ; 1]$. R^2 et E évaluent la qualité du modèle de classification des composants en σ groupes homogènes : plus ces critères sont élevés, plus les pouvoirs explicatif et prédictif du modèle sont bons.

A l'aide d'un critère de prédiction AIC (Adjustment Information Criterial), le processus itératif sélectionnant σ 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 une

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

sous-estimation du pouvoir prédictif du modèle. Le meilleur σ -modèle est considéré comme celui avec l'AIC la plus basse. L'AIC va permettre d'avoir un modèle robuste à la fois 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 groupes obtenus sur ces deux aspects (ajustement et prédiction). Un coefficient $E/R^2 > 50\%$ est jugé être un bon indicateur de robustesse.

En somme, le modèle offre un arbre de classification des composants indiquant le nombre de groupe optimal et affiche par ordre décroissant la performance des motifs d'assemblages testés issus de la classification optimale. Les assemblages performants seront donc identifiés par motif d'assemblages, c'est-à-dire à partir des assemblages de groupes de matières.

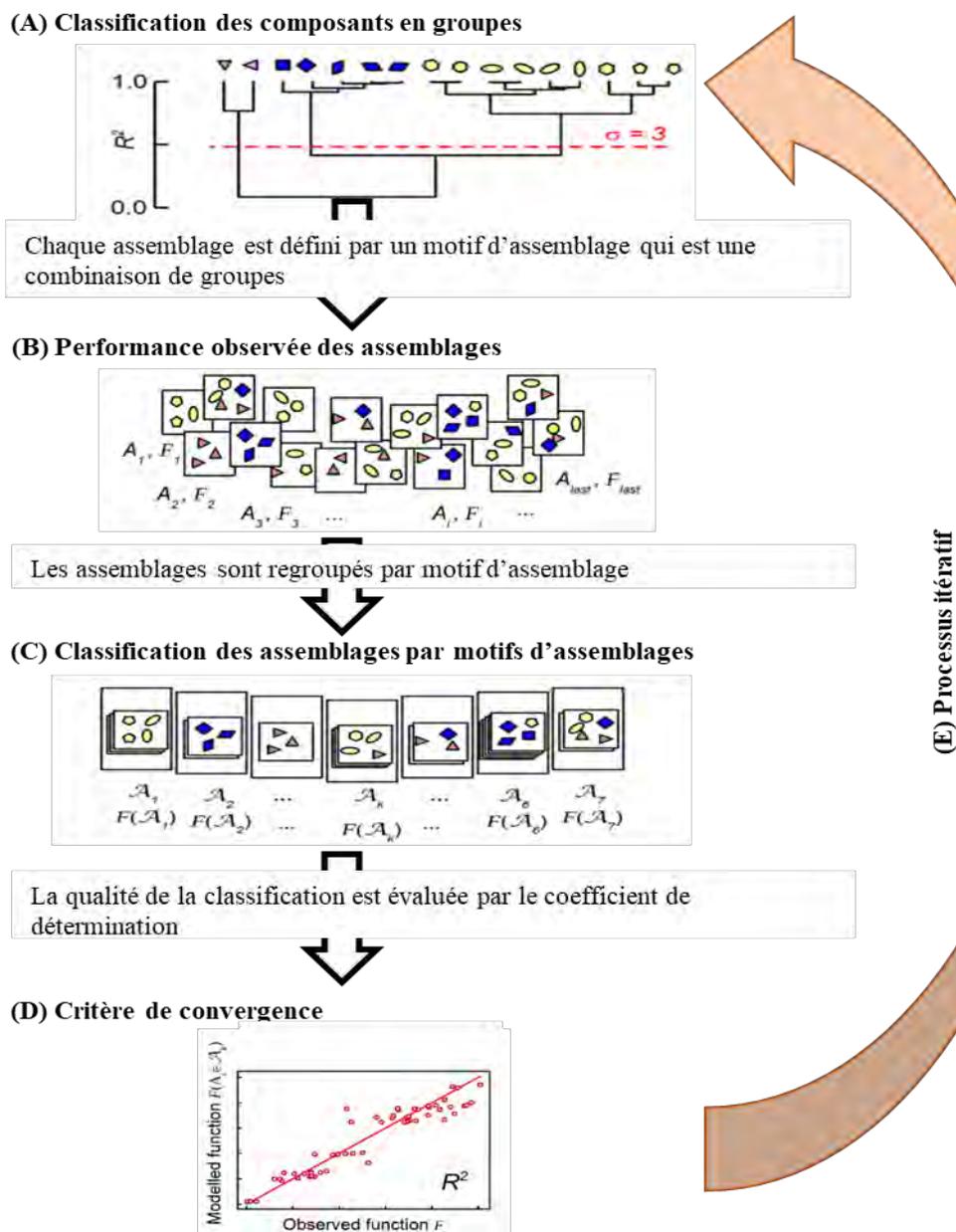


Figure 17: Etapes de constitution d'une typologie des composants par approche a posteriori (d'après Jaillard et al. 2018b)

Le modèle combinatoire a été utilisé pour chaque variable, séparément. Nous obtenons ainsi des classifications des MF dans des groupes homogènes pour toutes les variables (e.g. biomasse aérienne, SPAD, pH,...). Puisque certaines variables sont des proxys d'un même paramètre (par exemple la croissance), un unique modèle a été construit pour l'ensemble de variable.

2.6.2. Indices multicritères

Une autre forme de résultat a été l'élaboration des indices multicritères de performance des assemblages. Ces indices permettent d'avoir un modèle avec des informations multicritères c'est-à-dire de rassembler plusieurs variables dans un seul modèle et faire une analyse séquentielle. Un indice sera attribué à chaque critère de croissance des plantes, de nutrition des plantes et de propriété du sol.

- L'indice multicritère 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.
- L'indice multicritère sur la nutrition des plantes (IM2) a été calculé à partir des nutriments absorbés par la plante et concerne les cinq nutriments suivants : l'azote, le phosphore, le magnésium, le potassium et le calcium.
- Pour les indices sur la fertilité du sol, un indice multicritère (IM3) a été calculé à partir du pH, des teneurs en carbone total et en azote total du sol et le rapport C/N.
- Au final, un indice multicritère total (IMT) qui rassemble tous les critères de performance des assemblages a été élaboré afin de dresser un modèle combinatoire final concluant le groupement des assemblages testés. Ceci permet d'avoir une conclusion sur des groupes ayant des multifonctionnalités (croissance et nutrition des plantes, propriétés du sol).

2.6.3. Transformations homothétiques

Des transformations homothétiques ont été utilisées pour situer la pratique paysanne par rapport aux motifs d'assemblages ressorti par le modèle combinatoire. La pratique paysanne associe le fumier avec de la cendre de balle de riz. Pour ce, les moyennes de chaque motif d'assemblage ont été calculées puis transformées selon la formule proposée par Velasquez *et al.*, (2007). Ces transformations permettent de réduire les valeurs moyennes entre 0,1 et 1 afin de faciliter la représentation des résultats dans un graphe plus réduit.

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

Où, Y est la valeur après transformation de la variable, x la variable à transformer ; a la valeur maximale de la variable et b la valeur minimale de la variable.

3. Résultats

3.1. Typologie des matières à partir des assemblages

3.1.1. Croissance et activité photosynthétique des plantes

- *Croissance des plantes*

Les modèles pour chacune des variables, qui renseignent sur la croissance des plantes, sont détaillés dans le Tableau 23 en Annexe 7. Les modèles de la biomasse aérienne et du nombre de feuilles formées sont expliqués ici puisque ces deux variables sont jugées les plus représentatives de la performance sur la croissance. Le Tableau 14 illustre le modèle de classification des deux variables.

Tableau 14: Typologie par modèle combinatoire des matières fertilisantes organiques et/ ou minérale sur la biomasse aérienne et le nombre de feuilles

	Biomasse aérienne	Nombre de feuilles
a*	{CZ}	{CZ}
b	{FumV , FumI}	{CB, Dol, Hyp, ComM, VCT, ComT}
c	{FarC, Hyp, ComM, NPK, VCT}	{CE, FarC, Fie, FumV , FumI, FieC, NPK, PP, Tar, VCV}
d	{CB, CE, Dol, FieV, FieV, PP, Tar, ComT, VCV}	
3 motifs d'assemblage à forte performance	abd (3)	ac (4)
	abc (1)	abc (10)
	ad (6)	c (17)
3 motifs d'assemblage à faible performance	c (4)	bc (88)
	ac (2)	ab (2)
	d (20)	b (6)

* : désigne les groupes fonctionnels

() : fréquence d'utilisation des motifs d'assemblages

L'identification des matières fertilisantes sont données dans le Tableau 13.

Comme décrit dans la démarche statistique, le nombre optimal de groupes résulte d'un compromis entre la précision (R^2), l'efficacité (E) et la capacité de prédiction du modèle. La modélisation de la biomasse aérienne a classé les MF en quatre groupes. Ce classement optimise les critères de qualité du modèle dont les coefficients de détermination (R^2) et d'efficacité (E) sont de 0,84 et de 0,69 respectivement, ce qui donne un coefficient de robustesse (E/R^2) de 82%. Le modèle a pu prédire 130 pots parmi les 147 car certains motifs ne sont représentés que par un seul pot. Le modèle obtenu avec la variable 'nombre des feuilles' est défini par un $R^2 = 0,65$, un $E = 0,39$ et un coefficient $E/R^2 = 61\%$. La classification des MF s'arrête à trois groupes, qui correspondait à une capacité de prédiction de 127/144 pots.

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

Pour les deux variables biomasse aérienne et de nombre de feuilles, la corne de zébu {CZ} constitue un premier groupe et permet de produire plus, lorsqu'elle est associée avec d'autres matières appartenant à d'autres groupes (abd, abc, ad / ac, abc). Les MF restantes sont ensuite divisées en trois groupes, pour la variable 'biomasse aérienne' et en deux groupes pour la variable 'nombre de feuilles' (Tableau 14). Les deux derniers groupes (c et d pour la 'biomasse aérienne', ou b et c pour le 'nombre de feuilles'), seuls ou associés avec d'autres groupes, possèdent une performance relativement faible.

• **Activité photosynthétique**

Les variables NDVI, PRI et SPAD ont été utilisées pour quantifier les effets des assemblages sur l'activité photosynthétique. La variable SPAD est retenue pour représenter les résultats obtenus. Le modèle issu de l'analyse combinatoire a donné des résultats robustes et précis avec un coefficient de détermination R^2 de 0,87, un coefficient d'efficacité E de 0,82 et un coefficient de robustesse E/R^2 très proche de 100% (94%). Le modèle a pu prédire 127/144 pots en groupant les MF en trois groupes (Tableau 15).

Tableau 15: Typologie par modèle combinatoire des matières fertilisantes organiques et/ ou minérale sur la valeur SPAD

	SPAD
a*	{CZ}
b	{FieC, ComM, ComT, VCV}
c	{CB, CE, Dol, FarC, FieV, FumV, FumI, Hyp, NPK, PP, Tar, VCT}
2 motifs d'assemblage à forte performance	abc (5) ac (14)
2 motifs d'assemblage à faible performance	bc (65) c (43)

* : désigne les groupes fonctionnels

() : fréquence d'utilisation des motifs d'assemblages

L'identification des matières fertilisantes sont données dans le Tableau 13.

Une nouvelle fois, le premier groupe 'a' est constitué d'une seule matière, qui est la corne de zébu {CZ}. Aussi, les meilleurs assemblages des groupes sont obtenus avec les motifs en présence de {CZ}.

3.1.2. Nutrition des plantes

La performance des assemblages sur la nutrition des plantes est évaluée par les quantités totales en nutriments (N, P, K Ca et Mg) présentes dans les biomasses aérienne et racinaire. La répartition des MF dans des groupes est représentée dans la Figure 18. Les Tableau 25 et Tableau 26 en Annexe 7 présentent les classifications plus détaillées pour chaque variable. En général, 144 pots ont été testés dont 127 ont servi pour prédire chacune des variables ci-dessus

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

dans les deux compartiments de la plante. Les coefficients de détermination R^2 se situent entre 0,68 et 0,90, les coefficients d'efficacité entre 0,41 et 0,72 et les coefficients E/ R^2 entre 60% et 86% pour la modélisation des nutriments dans la partie aérienne. Ces critères sont respectivement entre 0,24 et 0,92, 0,09 et 0,75, 38 et 82% pour le modèle obtenu avec les nutriments dans la partie racinaire.

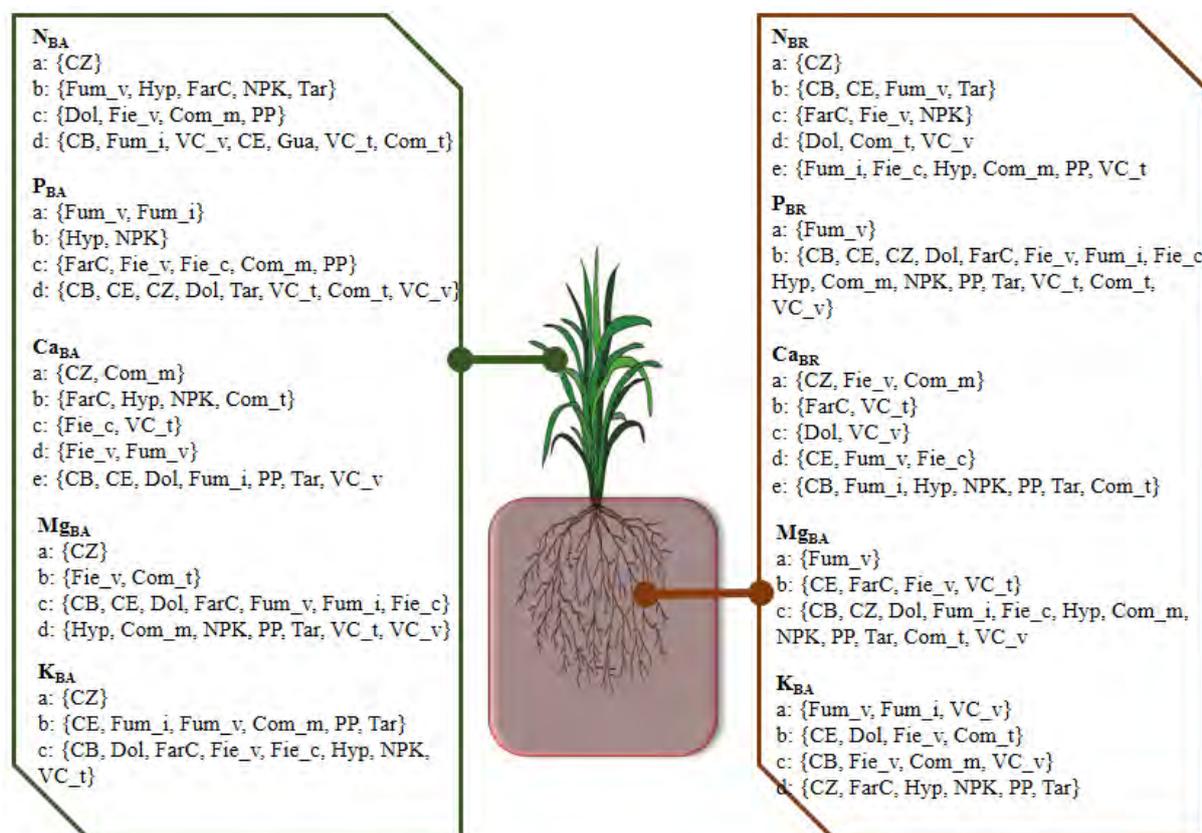


Figure 18 : Typologie par modèle combinatoire des matières fertilisantes organiques et/ ou minérale sur les quantités en nutriments (N, P, K, Ca et Mg) dans les parties aérienne et racinaire des plantes. L'identification des matières fertilisantes sont données dans le Tableau 13. BA : biomasse aérienne. BR : Biomasse racinaire

La classification des matières s'arrête en moyenne à 4 groupes pour les nutriments de la biomasse aérienne. La corne de zébu {CZ} constitue à elle seule le premier groupe 'a' pour les trois variables N_{BA} , Mg_{BA} et K_{BA} , et est associée avec le compost {ComM} pour la variable Ca_{BA} . En revanche, pour la variable P_{BA} , les fumiers {FumV, FumI} forment ensemble le premier groupe 'a', qui constitue le groupe avec la meilleure performance. Autrement, les meilleurs motifs d'assemblages s'obtiennent en associant les matières du groupe 'a' avec les autres des différents groupes. Si la corne de zébu, ou parfois le compost {ComM}, 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'.

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

Globalement, les cendres végétales {CE, CB} et souvent la dolomie {Dol} sont classés dans le dernier groupe (c ou d ou e), qui se caractérise par des composants à faible performance.

Concernant les nutriments présents dans la biomasse racinaire, l'analyse combinatoire classe les MF entre 2 à 5 groupes. Chaque modèle a proposé les groupes illustrés dans la Figure 18. Le fumier {FumV} apparaît dans le groupe 'a' pour les variables M_{gBR} et P_{BR} , et est associé avec le fumier {FumI} et le lombricompost {VCV} pour la variable K_{BR} . Une nouvelle fois, la corne de zébu est classée dans le groupe 'a' pour la variable N_{BR} et est associée avec la fiente de volailles {FieV} et le compost {ComM} pour la variable Ca_{BR} . Généralement, les motifs d'assemblages en présence des matières du groupe 'a' (exemple, (abc) pour la variable N_{BR} , (ac) pour les variable M_{gBR} et K_{BR}) améliore la nutrition de la partie racinaire des plantes (cf. Tableau 26 en Annexe 7).

3.1.3. Caractéristiques des sols

L'efficacité (ou performance) des assemblages a été également testé sur leur capacité à améliorer les propriétés physico-chimique des sols. Les appréciations se sont portées sur le pH_{eau} et les teneurs totales en carbone et en azote des sols. Un modèle sur le rapport C/N a été élaboré en complément de ces variables.

En moyenne 144 pots ont été utilisés pour élaborer les modèles et 127 pots pour leurs prédictions. La classification des MF selon les variables considérées explique 73% à 87% de la variance totale et son efficacité varie de 47% à 78% (E/R^2 est de 65% à 92%). Le modèle a formé 3 groupes pour la variable N_{sol} et 4 groupes pour les trois autres variables pH_{eau} , C_{sol} , et C/N. Les effets des assemblages sur les teneurs totales en C et N, et le rapport C/N des sols ont donné les mêmes résultats dont les composants suivants : {FumV, FumI, PP, Tar} figurent dans le groupe 'a', les {CZ, FieV, ComM} et parfois le {FarC} sont classés dans le groupe 'b'. Quant au pH_{eau} , le modèle a classé le {CZ} dans le groupe 'a', {CB, FieC, Hyp, VCV} dans le groupe 'b', {CE, Dol, FarC, PP} dans le groupe 'c' et les huit matières restantes dans le groupe 'd'. Des résultats plus détaillés des modèles sont présentés dans le Tableau 16.

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

Tableau 16: Performance des motifs d'assemblage observés sur les teneurs totales en carbone et en azote, sur le rapport C/N et sur le pH_{eau} des sols.

	C_{Sol}	N_{Sol}	C/N	pH_{eau}
a	FumV , FumI, PP, Tar	FumV , FumI, PP, Tar	FumV , FumI, PP, Tar	CZ
b	CZ, FarC, FieV, ComM	CZ, FieV, ComM	CZ, ComM	CB, FieC, Hyp, VCV
c	CB, FieC, ComM, VCT	CB, CE, Dol, FarC, FieC, Hyp, NPK, VCT, ComT, VCV	CE, Dol, FieC, VCT, ComT, VCV	CE, Dol, FarC, PP
d	Dol, FieC, Hyp, NPK, VCT		CB, FarC, FieV, Hyp, NPK	Fie, FumV , FumI, ComM, NPK, Tar, VCT, ComT
Motifs d'assemblages à forte performance	ad (11)*	abc (17)	ad (16)	acd (4)
	ab (7)	ac (34)	acd (22)	abc (5)
	abd (13)	ab (3)	abc (5)	ab (2)
Motifs d'assemblages à faible performance	cd (19)	bc (37)	c (6)	d (2)
	d (3)	c (36)	cd (38)	cd (37)
	b (2)		bc (3)	bcd (33)

* : désigne les groupes fonctionnels

() : fréquence d'utilisation des motifs d'assemblages

L'identification des matières fertilisantes sont données dans le Tableau 13.

Pour les variables C/N et pH_{eau}, les motifs d'assemblages affichant des valeurs plus faibles sont considérés comme les assemblages à forte performance. Le fait d'assembler les fumiers, la poudrette de parc ou le Taroka avec d'autres matières du groupe 'b', 'c' ou 'd' améliore le stockage en carbone et la fertilité azotée du sol.

3.2. Indices multicritères

3.2.1. Indice multicritère de croissance

L'indice multicritère de croissance ou IM1 a été obtenu en faisant une analyse séquentielle entre les variables de croissance qui sont la biomasse aérienne, le nombre de tiges et de talles et le nombre de feuilles. Le modèle obtenu à partir de l'IM1 est illustré dans la Figure 19.

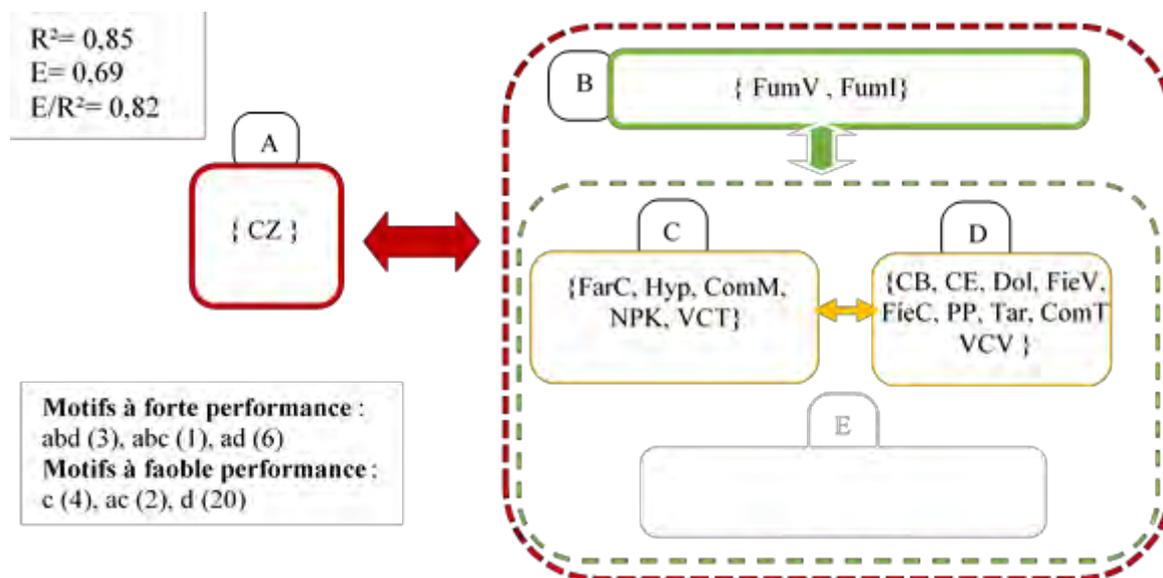


Figure 19: Typologie par approche combinatoire des matières fertilisantes organiques et/ou minérales sur l'indice multicritère de croissance des plantes. L'identification des matières fertilisantes sont données dans le Tableau 13.

La robustesse et l'efficacité du modèle sont validés avec un coefficient R^2 de 0,85 et un coefficient E de 0,70 ($E/R^2 = 82\%$). Le modèle a généré quatre groupes. Le groupe 'a', constitué par la {CZ} seule, apparaît principalement dans les motifs avec la performance la plus élevée (abd, abc ou ad). Cependant, la croissance des plantes est défavorisée avec les motifs d'assemblage (d), (c) ou (ac).

3.2.2. Indice multicritère de la nutrition des plantes ou IM2

Les quantités totales en N, P, K, Ca et Mg dans les plantes ont servi pour la construction de l'indice multicritère IM2 sur la nutrition des plantes. La Figure 20 résume la classification des MF selon le modèle combinatoire après analyse séquentielle.

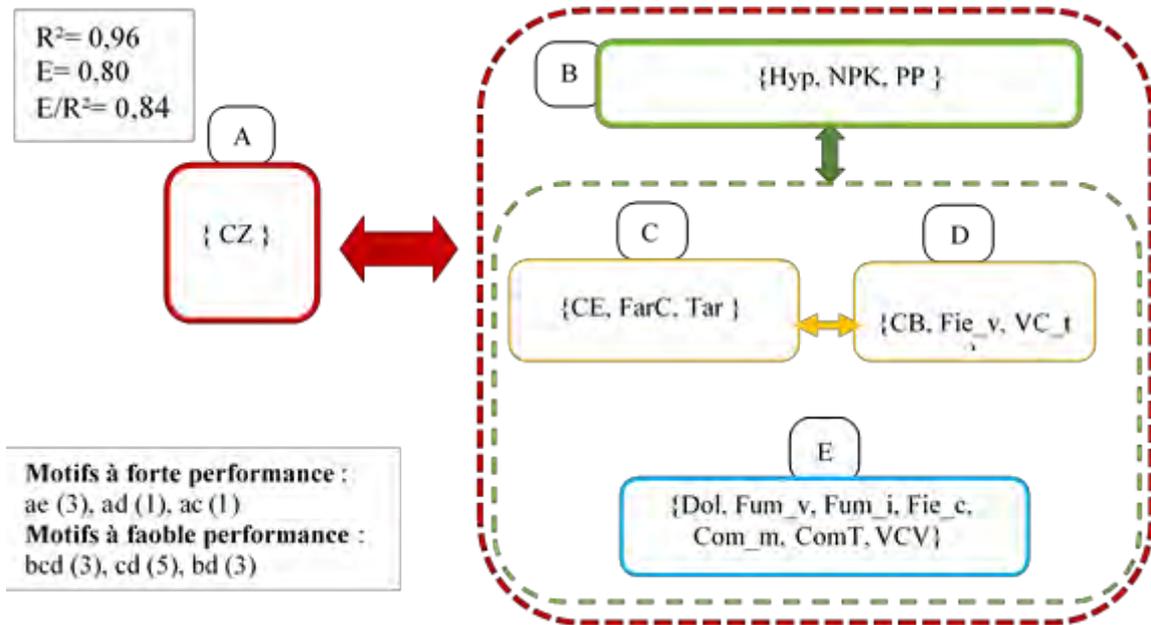


Figure 20: Typologie par approche combinatoire des matières fertilisantes organiques et/ou minérales sur l'indice multicritère de nutrition des plantes. L'identification des matières fertilisantes sont données dans le Tableau 13.

Les critères de validité du modèle restent bien élevés avec un coefficient R^2 de 0,96, un coefficient E de 0,81 et un coefficient E/R^2 de 84%. Au final, les matières se répartissent dans cinq groupes. L'assemblage de la corne de zébu, appartenant au groupe 'a', avec une matière du groupe 'e', 'd' ou 'c' favorise la nutrition des plantes. Ces motifs (ae), (ad) et (ac) produisent les meilleurs motifs d'assemblages. En revanche, les matières constituées par les motifs (bcd), (cd) ou (bd) génèrent les assemblages les plus faibles.

3.2.3. Indice multicritère sur les propriétés du sol ou IM3

L'indice multicritère IM3 sur les propriétés du sol est obtenu à partir des valeurs du pH_{eau} , des teneurs totales en C et en N des sols ainsi que le rapport C/N après analyse séquentielle. La Figure 21 illustre le regroupement des MF par analyse combinatoire.

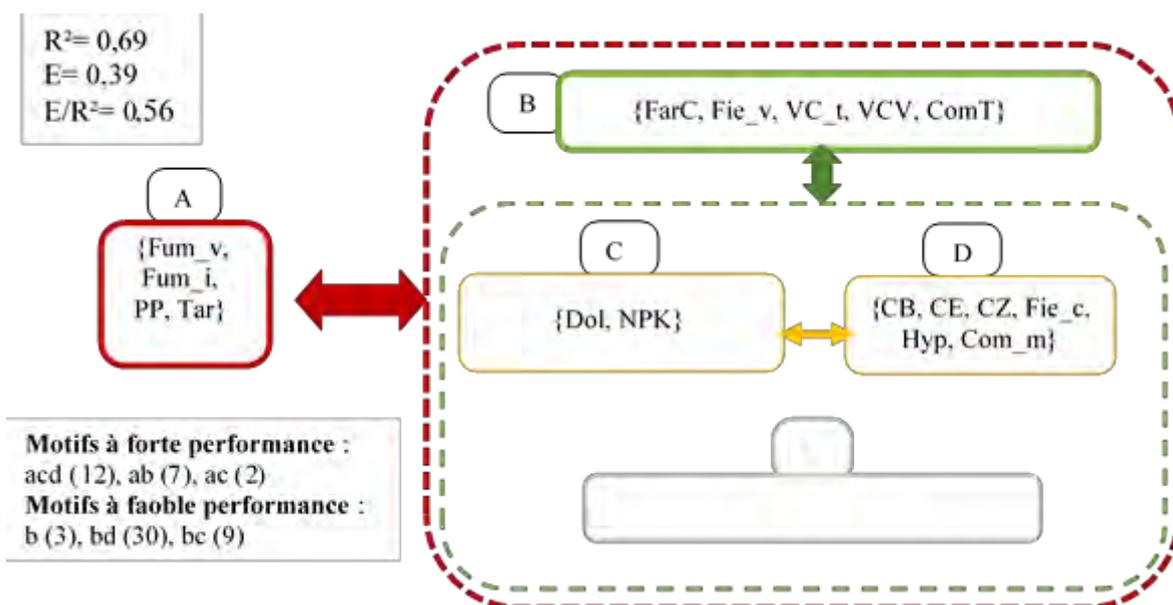


Figure 21: Typologie par approche combinatoire des matières fertilisantes organiques et/ou minérales sur l'indice multicritère des propriétés du sol. L'identification des matières fertilisantes sont données dans le Tableau 13.

La qualité d'ajustement du modèle R^2 est assez élevée (0,69) comparée au coefficient d'efficacité E , qui est de 0,39. Le coefficient E/R^2 reste acceptable avec une valeur de 56%. La classification des MF s'arrête à quatre groupes. Contrairement aux deux premiers indices, le groupe 'a' est formé de quatre matières dont {FumV, FumI, PP, Tar}. L'assemblage d'une des matières du groupe 'a', constitué particulièrement par des fumiers, avec les autres matières du groupe 'b', 'c' ou 'd' est recommandé pour redresser la fertilité du sol. Les meilleurs motifs d'assemblage sont d'ailleurs obtenus avec les motifs (acd), (ab) et (ac).

3.3. Classification finale des matières fertilisantes et situation de la pratique paysanne

3.3.1. Indice multicritère total (IMT)

Un modèle unique a été construit afin d'obtenir une classification finale des MF en tenant compte des critères de croissance et de nutrition des plantes, et des propriétés du sol (Figure 22). Les variables définies dans la construction des trois indices multicritères sont intégrées dans l'élaboration de l'indice multicritère total (IMT). La fiabilité du modèle est vérifiée, avec un coefficient de détermination R^2 de 0,90, un coefficient d'efficacité de 0,67 et un coefficient E/R^2 de 75%.

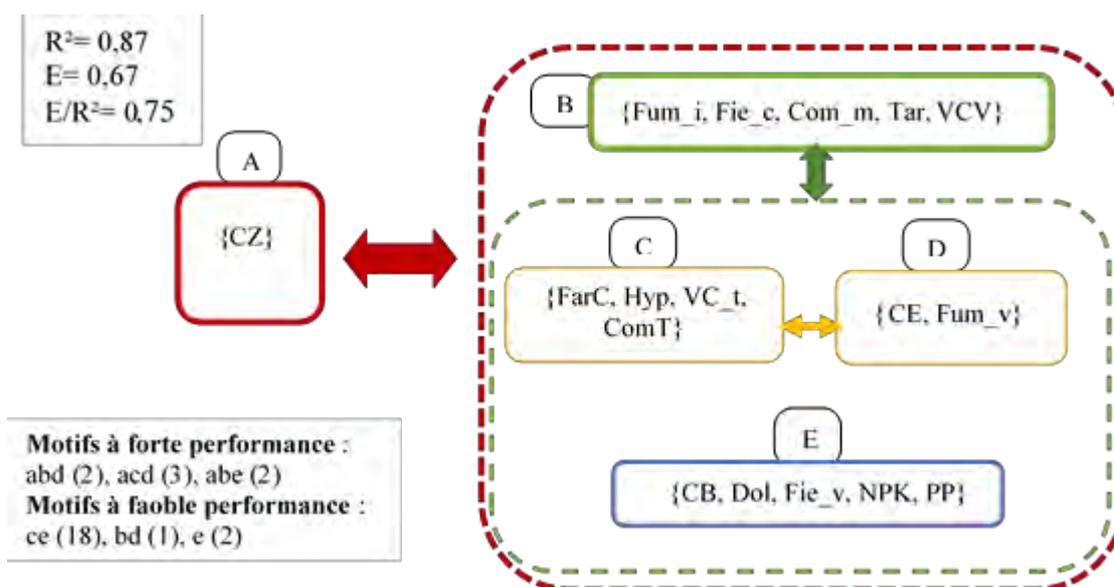


Figure 22: Typologie par approche combinatoire des matières fertilisantes organiques et/ou minérales sur l'indice multicritère total. L'identification des matières fertilisantes sont données dans le Tableau 13.

Au final, les 17 matières fertilisantes utilisées dans cette étude ont été classées dans cinq groupes. Cette classification génère 32 (2^5-1) motifs d'assemblage parmi lesquels 21 motifs ont été observés. Comme dans la majorité des modèles proposés, la corne de zébu {CZ} seule appartient au groupe 'a'. Les matières formées par {FumI, FieC, ComM, Tar, VCV} semblent 'fonctionnellement' redondants en formant le deuxième groupe 'b'. Autrement, lorsque ces matières coexistent dans un assemblage, et avec les matières appartenant à d'autres groupes, elles induisent des effets similaires sur la performance globale des assemblages. Les matières {FarC, Hyp, VCT, ComT} sont classés dans le groupe 'c' et {CE, FumV} dans le groupe 'd'. Le dernier groupe 'e' est défini par un ensemble de matières composé de {CB, Dol, FieV, NPK, PP}. Les motifs formés par (abd), (acd) et (abe) induisent des performances élevées améliorant à la fois les critères de croissance et de nutrition des plantes, et des propriétés du sol.

3.3.2. Situation de la pratique paysanne

Le motif correspondant à la pratique paysanne est située par rapport aux autres motifs obtenus, en tenant compte des modèles multicritères sur la croissance et la nutrition des plantes, sur les propriétés du sol, et du modèle final. Dans la plupart des cas, les agriculteurs fertilisent leur sol à partir des matières facilement disponibles. Parmi ces pratiques, ils associent couramment le fumier (FumI) et la cendre de balle de riz (CB). La Figure 23 suivante situe le motif correspondant à la combinaison de {FumI} et {CB} par rapport aux modèles issus des trois

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

indices multicritères et du modèle final. La transformation homothétique a été effectuée pour une représentation plus facile de la performance des motifs.

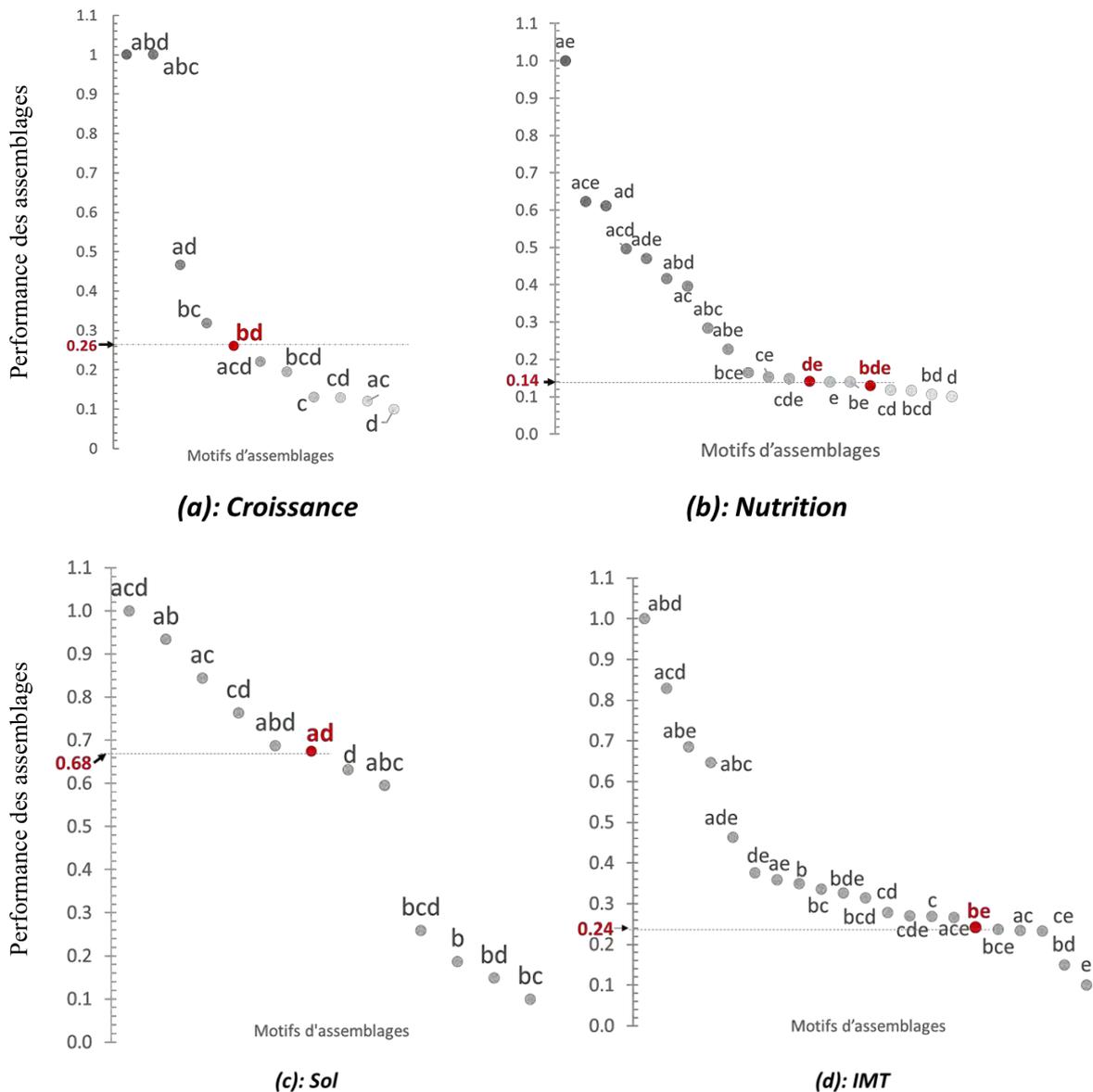


Figure 23: Situation du motif d'assemblages de la pratique paysanne (motif coloré en rouge), correspondant à l'association du fumier et de cendre de balle de riz, par rapport aux motifs d'assemblages observés sur (a) la croissance des plantes, (b) la nutrition des plantes, (c) les propriétés du sol et (d) l'indice multicritère total. Les performances des assemblages sur les quatre indices informent des performances relatives calculées suite à une transformation homothétique.

Le motif correspondant à la pratique paysanne varie en fonction des critères considérés. L'association du fumier et de la cendre de balle de riz correspond au motif (bd) avec une moyenne de 0,26 pour l'indice de croissance (Figure 23a). Il appartient à deux motifs différents (de) et (bde) pour l'indice de nutrition, avec une moyenne relativement faible de 0,14 (Figure

23b). En tenant compte de l'indice sur les propriétés du sol, les motifs se répartissent distinctement en deux catégories. La première catégorie possède une moyenne bien supérieure à 0,3 et améliore ainsi efficacement la fertilité du sol. La moyenne des motifs de la deuxième catégorie reste en dessous de 0,3 indiquant une capacité moins nette vis-à-vis de l'amélioration de la fertilité du sol. La pratique paysanne se trouve parmi les motifs appartenant à la première catégorie ayant une moyenne assez élevée de 0,68 (Figure 23c). Pour l'indice multicritère total (IMT) qui rassemble les trois grands critères, la pratique paysanne est représentée par le motif (bd) avec une moyenne de 0,24 (Figure 23d).

4. Discussion

4.1. Appréciation des critères statistiques

La combinaison des apports de matières fertilisantes est préconisée dans les agrosystèmes à bas intrants et caractérisés par des multiples carences (Vanlauwe *et al.*, 2014a, b). Cela requiert une typologie bien fondée des matières afin de profiter des interactions positives (synergiques ou complémentaires) qui peuvent se créer entre les matières. L'analyse combinatoire est un outil statistique qui consiste à dresser une typologie des composants en fonction des effets d'interaction réellement observés (Jaillard *et al.*, 2018a, 2018b). En d'autres termes, il s'agit de la mesure de la performance des assemblages ou de leurs réponses sur un ou des paramètres donnés (ex. sur la production de biomasse, les propriétés du sol, ...). Le modèle combinatoire est ainsi qualifié de classification *a posteriori* des composants. En fait, la prédiction des interactions existant entre les assemblages, se basant sur des critères *a priori* des matières, peut paraître difficile du fait que de nombreuses interactions positives ou négatives ou même neutres peuvent se produire au sein des assemblages.

Empiriquement, le modèle combinatoire est une approche utilisée en écologie pour quantifier les relations entre la biodiversité et le fonctionnement d'un écosystème (Jaillard *et al.*, 2018a, 2018b). Un bon modèle est un modèle dont l'efficacité est proche de son coefficient de détermination, c'est-à-dire un modèle qui prédit aussi bien qu'il explique la performance observée à partir des composants des assemblages. Jaillard *et al.* (2018a, 2018b) ont testé des données virtuelles en utilisant les données de Langenheder *et al.* (2010) et de Tilman (2001) pour prouver la robustesse et la précision de l'approche combinatoire. Le rapport entre l'efficacité du modèle et le coefficient de détermination (E/R^2) était respectivement de 90% et 80%. En considérant les indices multicritères, dans notre étude, ce rapport est supérieur à 0,75 pour les indices de croissance IM1 et de nutrition IM2 des plantes et l'indice multicritère total IMT. Cette valeur peut dépasser 0,9 pour certaines variables, comme la variable SPAD et la teneur en N totale dans le sol. Au vu des résultats, le modèle prédit une grande proportion de la variance expliquée et a donc une capacité prédictive élevée. Notre étude démontre ainsi qu'une analyse combinatoire des composants, ici les matières fertilisantes, en conditions

expérimentales, permet d'identifier avec fiabilité des groupes de matières dont les interactions régissent la performance des assemblages.

4.2. Assemblage des matières fertilisantes pour une meilleure croissance et nutrition des plantes

La typologie des matières fertilisantes par analyse combinatoire en se référant aux indices de la croissance (IM1) et de la nutrition des plantes (IM2) montre le rôle majeur de la corne de zébu {CZ}. Parmi les matières testées, la nutrition et la croissance des plantes est conditionnée par la présence de cette matière dans les assemblages. La matière {CZ} constitue seule le groupe 'a', d'après les modèles issus des deux indices, et son association avec les autres groupes de matière induit des performances plus intéressantes (Figure 19, Figure 20). En effet, l'approche *a posteriori* range les groupes selon le pouvoir explicatif décroissant de la variance d'un paramètre donné.

La corne de zébu se distingue des autres matières par sa forte teneur en carbone, en azote et en soufre (Annexe 6). La présence notable de kératine, qui est une protéine particulièrement riche en azote (Zoccola *et al.*, 2009) peut expliquer cette particularité (Ichida *et al.*, 2001); cette matière présente une source d'azote importante pour les plantes. Son utilisation est d'ailleurs fortement conseillée pour la fertilisation azotée en agriculture biologique (règlement (CE) 2007, n° 834/2007 du Conseil). La propriété récalcitrante de la kératine confère à la corne de zébu broyée une capacité à fournir de l'azote minéral de façon diffusive, le rendant disponible tout au long du développement de la plante. L'azote est l'un des facteurs les plus limitants de la productivité agricole dans la majorité des agrosystèmes (Fageria et Moreira, 2011). Cet élément tient un rôle fondamental dans le fonctionnement biochimique des plantes, entre autres, il entre dans la constitution des enzymes, de la chlorophylle, des acides nucléiques (Harper, 1994). La quantité d'azote absorbée détermine également le niveau d'absorption des autres éléments. C'est pour cette raison que l'azote est considéré comme le pivot de la culture (Fageria et Moreira, 2011).

Néanmoins, la corne de zébu seule ne permet pas de couvrir les multiples carences des Ferralsols. Une meilleure croissance et nutrition de la plante requiert la présence des autres éléments nutritifs et un environnement biologique optimal. D'ailleurs la présence de corne de zébu, seule, ne permet qu'un faible développement du riz (Annexe 8). La combinaison des matières fertilisantes peut couvrir ces besoins. Au niveau de la croissance des plantes, les meilleurs motifs d'assemblage sont les motifs (abc), (abd) et (ad). Pour la nutrition, les motifs (ae), (ad) et (ac) affichent les performances les plus élevées. Ces résultats montrent que la performance des assemblages sur la croissance et la nutrition des plantes ne varie pas systématiquement avec le nombre de groupes qui constituent un motif. Des effets d'interactions ou de complémentarité entre les assemblages des matières peuvent se créer (Barantal *et al.*,

2011), en favorisant par exemple la disponibilité d'un élément d'une matière grâce à la présence d'une autre matière spécifique. Par contre, il faut souligner que certaines interactions ne sont pas toujours bénéfiques. La qualité de la corne de zébu est masquée lorsqu'elle est associée avec les composants du groupe 'c' ; le motif (ac) correspondant à leur assemblage limite la croissance des plantes (Figure 19). Par conséquent, la stratégie de fertilisation qui repose sur un apport de matières fertilisantes maximum, autant que faire se peut, en fonction de la disponibilité des matières premières, n'est pas appropriée.

Le nombre de groupes formés et l'appartenance des matières fertilisantes dans des groupes varie en fonction des paramètres considérés. Le modèle de l'indice regroupant les variables sur la croissance des plantes a sorti quatre groupes, alors que celui regroupant les variables sur la nutrition a classé les matières en cinq groupes. Les caractères communs des matières appartenant au même groupe ne sont pas bien distincts. Mais, en s'appuyant sur les caractéristiques élémentaires des matières (Annexe 6), certaines propriétés des matières peuvent refléter en partie les propriétés fonctionnelles des groupes formés. Pour la croissance des plantes, le groupe 'b' rassemble les deux fumiers où leur présence dans un assemblage permet d'apporter du carbone organique dans le sol à une quantité adéquate (Annexe 6). A part les influences de la matière organique sur la fertilité biologique, physique et chimique du sol, elle améliore l'absorption en nutriments des plantes. Les nutriments dérivés des matières organiques seraient utilisés plus efficacement par les plantes et seraient plus accessibles et disponibles pour les cultures (Andriamananjara *et al.*, 2019; Hue, 1992). Les matières classées dans les groupes 'c' et 'd' sont capables de fournir aux plantes divers nutriments, tels que le P contenus dans {Hyp}, {NPK}, {FieC}, et {Tar} ; les cations basiques (K, Ca, Mg) contenus dans {CE}, {Dol}, {FieV}, {FieC}, et {FarC}. Les effets chaulant des cendres végétales, de la fiente de volailles, du guano, de la farine de crabe sont également prouvés par de nombreuses études, favorisant ainsi la croissance des plantes. Le modèle sur la nutrition des plantes classe les matières contenant des éléments nutritifs, notamment le P et le K, nettement élevés et (immédiatement) disponibles pour les plantes, dans le groupe 'b'. Les matières appartenant aux groupes 'c', 'd' et 'e' sont des matières assez différentes entre elles mais se caractérisent globalement par des matières riches en cations basiques (exemple, {CE} dans le groupe 'c', {FieV} dans le groupe 'd', {FieC} et {Dol} dans le groupe 'e') et en carbone (exemple, les fumiers, les composts et lombricomposts). Outre les effets d'interaction, les propriétés intrinsèques des matières peuvent ainsi engendrer des effets de composition ou additifs, c'est-à-dire que le nombre de matières à apporter détermine la performance des assemblages. Ces effets sont probablement caractéristiques des motifs (abd) et (abc) sur la croissance des plantes.

4.3. Assemblages de matières fertilisantes pour améliorer les propriétés du sol

La classification des matières par l'approche *a posteriori* s'arrête à quatre groupes dans le modèle synthétisant les effets des assemblages sur les propriétés du sol (IM3). Les teneurs en carbone et azote totale, le pH_{eau} et le rapport C/N des sols ont été les variables retenues. Cette fois, le groupe 'a', présent dans les meilleurs motifs d'assemblages, est constitué de matières classées, selon les normes françaises, dans les amendements organiques. Il s'agit des fumiers produits à bases de déjections animales {FumI, FumV, PP} et de compost enrichi en bactéries {Tar}. Le groupe 'b' représente des matières assez hétérogènes, riches en cations basiques, et/ou en azote avec une teneur modérée en matière organique. Les groupes 'c' et 'd' révèlent des caractéristiques assez proches et comprennent des matières minérales, libérant des nutriments (N, P, K, Ca et Mg) de façon immédiate. Les assemblages ayant les meilleures performances sont caractérisés par les motifs (acd), (ab) et (ac).

L'activité microbienne des Ferralsols se trouve limitée en raison du caractère acide des sols (Fageria et Baligar, 2008) et/ou de la disponibilité limitée des substrats organiques pour les microorganismes (Brussaard *et al.*, 2007; Kibblewhite *et al.*, 2008; Tiessen *et al.*, 1994). L'apport du fumier a révélé des effets notables pour y remédier grâce au carbone organique incorporé (Abbott *et al.*, 2018; Cai *et al.*, 2019) et à la diversification du réseau trophique (Marschner *et al.*, 2003; Ros *et al.*, 2006 ; Urrea *et al.*, 2019). Les microorganismes sont connus pour leur action primordiale sur la dégradation des matières organiques qui par la suite entraînent la libération des nutriments phytodisponibles, tels que l'azote (Lazcano *et al.*, 2013). Le modèle combinatoire confirme le rôle majeur des fumiers sur la fertilité biologique du sol en classant ces matières dans le groupe 'a'. Statistiquement, la qualité d'ajustement du modèle (R^2) augmente de manière significative passant de 0 à 0,42 lorsque le groupe 'a' est formé. Ainsi, la performance maximale des assemblages est obtenue en associant le groupe 'a' avec les autres matières. Afin d'optimiser la minéralisation des matières organiques contenues dans les fertilisants, le mélange du groupe 'a' avec les matières riches en N évite le phénomène de 'faim d'azote'. Par ailleurs, l'intégration des matières riches en Ca et/ou en Mg, ayant une efficacité de chaulage élevée, dans les assemblages améliore le pH_{eau} et tamponne l'acidité du sol.

4.4. Motifs d'assemblages des matières fertilisantes pour une innovation agronomique

Les résultats de cette étude se concentrent sur la constitution de groupes de matières et l'identification des meilleurs motifs d'assemblages. Brièvement, les composants classés dans un même groupe fonctionnent de manière identique et expriment les mêmes performances lorsqu'ils sont assemblés avec les autres matières. Un motif d'assemblages est une combinaison de groupes de composants/matières. La constitution des motifs d'assemblage présente une

significativité écologique puisqu'elle prend en compte les interactions qui peuvent exister entre les matières. Elle présente également une significativité agronomique. En effet, l'approche *a posteriori* peut ressortir les motifs d'assemblages testés selon leur performance par ordre décroissant. La pratique paysanne, de référence, qui associe le fumier avec les cendres de balle de riz peut être ensuite située par rapport à tous les motifs testés. Le modèle global qui résume les trois grands critères dans un seul modèle a été considéré (Figure 22). A la lumière des résultats, la pratique paysanne d'assemblages de matières présente des effets faibles sur les deux principaux paramètres. Une marge de progression (intensification écologique) est ainsi encore possible pour proposer des pratiques d'assemblages plus performants aux agriculteurs. En outre, dans plusieurs cas, un panel de choix existe dans un groupe de matières qui constitue un motif. L'agriculteur peut à son tour choisir les assemblages de matières en fonction de leurs connaissances empiriques, des disponibilités des matières et de leurs coûts. Ils peuvent composer des assemblages appartenant à des motifs plus performants en tenant compte de ces contraintes agronomiques et socio-économiques.

4.5. Évaluation de l'étude

4.5.1. Atouts et limites

- **Atouts de l'étude**

Les études précédentes sur la typologie des matières fertilisantes ont surtout été basées sur les connaissances *a priori* des qualités des matières, telles que les analyses élémentaires (teneurs en nutriments) et les analyses potentielles (cinétique de minéralisation) des matières. Les travaux de Rabetokotany (2013) avaient pour objectif d'élaborer une typologie de matières fertilisantes dans le but d'orienter leur potentiel agronomique et énergétique à partir des données prédites par la spectrométrie infrarouge (SPIR). Falinirina (2010) a fait des études sur la caractérisation et la classification des matières en s'appuyant sur leurs minéralisations potentielles en carbone et en azote. Rakotoarivelo (2011) a aussi fait des études sur la caractérisation des matières 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.

Par rapport aux études existantes, l'originalité de cette présente étude repose sur la mesure des effets des assemblages réellement observés sur les plantes et le sol. Toutefois, la caractérisation *a priori* des matières a été utilisée pour essayer d'expliquer l'appartenance des matières dans un groupe, mais les caractères communs ne sont pas évidents à identifier. Des matières intrinsèquement différentes mais présentant des effets similaires sur une performance, lorsqu'elles sont assemblées, peuvent ainsi se regrouper dans un même cluster. La fiabilité et la robustesse de la classification *a posteriori* par analyse combinatoire sont vérifiées également à partir des tests d'ajustement et d'efficacité via la cross-validation. L'agriculteur ou

l'utilisateur du modèle peut aussi composer les motifs d'assemblages dans sa pratique agricole selon l'objectif de la culture. Un modèle a été construit à chaque paramètre de croissance des plantes, de nutrition des plantes et des propriétés du sol. Ainsi, 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 matières sous différents objectifs.

- ***Limites de l'étude***

Il s'agit de la première étude portant sur la classification des matières par approche *a posteriori*, quelques limites ont été recensées à la fin de l'expérimentation. Les doses apportées se sont basées sur des connaissances *a priori* selon lesquelles les amendements organiques ont été apportés à 6 t MS ha⁻¹ et les engrais à 500 kg MS ha⁻¹. Ce choix fournissait le moyen le plus efficace dans la mesure où les résultats pourraient être facilement transférables au niveau des agriculteurs. De plus, le modèle ne permet pas de classer les matières avec plusieurs critères variés (composition et dose). Le modèle combinatoire, en prenant les matières fertilisantes comme composants, n'est pas une classification *a posteriori per se* mais nécessite des protocoles fondés à partir des connaissances *a priori* afin que les résultats se rapprochent le plus possible de la réalité (effets sur le sol et la plante).

En outre, les assemblages n'ont pas reçu la même dose équivalente en masse. Les tri-assemblages composés uniquement par des matières organiques (11 pots) ont reçu une dose équivalente à 18 t MS ha⁻¹ (6 t MS ha⁻¹ × 3), si dans les autres pots, on ne retrouve qu'environ 7 t MS ha⁻¹ (6 t MS ha⁻¹ + (500 kg MS ha⁻¹ × 2)).

4.5.2. Perspectives d'amélioration et recommandations

La corne de zébu n'est pas habituellement utilisée par les agriculteurs, et comme cette matière structure beaucoup la variance dans nombreux paramètres, il serait intéressant de refaire l'expérience sans la corne de zébu ou en diminuant la dose d'apport. Il s'agit d'une classification relative qui est fonction de l'identité des matières. Il se peut donc que la pratique paysanne (motif correspondant à l'association du fumier et de cendre de balle de riz) serait bien classée si la corne de zébu est retirée parmi les matières sélectionnées. Si l'on souhaite conserver des matières à valeur fertilisante élevée et diffusives dans la constitution des assemblages, tester d'autres matières équivalentes mais plus disponibles résoudrait la faible accessibilité de la corne.

Concernant la dose, il est préférable de reconsidérer la dose totale à apporter à un niveau similaire. La démarche la plus appropriée serait d'avoir des doses identiques aux doses paysannes issues des enquêtes socio-économiques. Un cadre de réflexion plus complexe en ciblant les quantités de nutriments (C, N, P, K, Ca, Mg) apportés est aussi une voie intéressante.

Les meilleurs et les mauvais motifs d'assemblages doivent être repris de façon à valider les résultats. Les fréquences d'utilisation des motifs d'assemblages pourraient être améliorées en se basant sur les résultats issus de cette première ébauche. Des matières non testées dans cette étude pourraient être introduites à l'exemple des lisiers de porc. Des tests avec d'autres variétés de riz ou d'autres plantes seraient aussi intéressants. Des réalisations sur terrain sont nécessaires pour valider les résultats obtenus en conditions contrôlées.

Les Ferralsols des Hautes Terres de Madagascar connaissent de multiples contraintes, biologique, physique et chimique. La (re)valorisation de ces sols requiert en premier lieu l'amélioration et/ ou la restauration de la fertilité du sol, afin de soutenir une production durable. Une grande partie de nos résultats entre dans cette optique d'intensification écologique et propose des assemblages qui peuvent s'adapter aux conditions locales.

5. Conclusion

Dans le but de promouvoir la riziculture pluviale, l'étude s'attache à fournir une réponse au problème de fertilité des sols de 'tanety'. Une orientation de la fertilisation a été proposée en fertilisant les sols par des assemblages des matières fertilisantes organiques et/ou minérales. Cette première ébauche consiste à ressortir une typologie de matières qui possèdent les mêmes performances, lorsqu'elles sont assemblées, à travers une modélisation par analyse combinatoire. Les effets des assemblages de trois matières tirées au hasard ont été testés au niveau de la production végétale et des propriétés du sol.

Malgré quelques limites rencontrées au cours de l'étude, nous avons pu ressortir des résultats conclusifs. Au terme de l'étude, les résultats ont montré que :

- Les classifications issues du modèle combinatoire de Jaillard *et al.* (2018a, 2018b) ont donné des modèles robustes (biens ajustés et bien prédits). Parmi les différentes variables considérées, seuls deux modèles ont affiché un coefficient de robustesse E/R^2 inférieur à 50% ; le coefficient maximal obtenu a atteint 0,94. Le nombre de groupes formés peut varier de deux à cinq ; et l'assemblage des matières intégrant la présence d'une matière du groupe 'a' a induit les performances les plus intéressantes. L'hypothèse 1 selon laquelle les matières fertilisantes peuvent être classées dans différents groupes et les assemblages des groupes expliquent de manière satisfaisante les variables mesurées, est validée.
- En s'intéressant aux identités des matières dans les groupes formés, la corne de zébu apparaît seule dans le groupe 'a', dans la majorité des modèles. Sa présence dans les motifs d'assemblages améliore particulièrement le paramètre de croissance (IM1) et de nutrition (IM2) ainsi que le pH_{eau} du sol. La capacité de cette matière à fournir de l'azote minéral de manière diffusive explique nettement les effets qu'elle produit dans les assemblages. L'interprétation des caractéristiques *a priori* des matières dans un même

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

groupe suggère que la composition des matières aurait des effets sur la performance des assemblages. Mais, des motifs qui regroupent des matières à caractères communs moins nets révèlent la possibilité d'effet d'interaction. L'hypothèse 2 qui stipule que les classifications des matières dans des groupes sont liées à des effets de composition et/ou d'interaction, selon les paramètres considérés est partiellement validée. Mais, la validation de cette hypothèse demande des recherches plus approfondies.

- Le potentiel du motif correspondant à la pratique de fertilisation paysanne reste faible par rapport aux motifs observés en se basant sur l'indice multicritère total (IMT). Ainsi, une marge de progression est encore possible pour proposer des assemblages plus performants, en laissant aux agriculteurs le choix des assemblages à partir des motifs et des groupes des matières qui leur conviennent. Une intensification écologique de la fertilité des sols est donc possible. L'hypothèse 3 qui relate que les motifs d'assemblages et les groupes de matières peuvent constituer un support théorique pour favoriser une innovation agronomique, est validée.

Ainsi, on peut confirmer que la typologie des matières à travers la modélisation par analyse combinatoire est une méthode à la fois innovante et fiable pour identifier les assemblages à haut potentiel. Aussi, la combinaison des matières par approche *a posteriori* est qualifiée d'assemblages agroécologiques puisque les aspects écologiques, agronomiques et socio-économiques sont mis en évidence dans la constitution et le choix des mélanges performants. L'étude offre ainsi un cadre de réflexion pour les orientations de fertilisation selon l'objectif de l'utilisateur du modèle.

Chapitre III.2. Amélioration de la fertilité des sols à travers l'identification des effets des matières fertilisantes en assemblage - Conditions au champ

1. Introduction

En Afrique Sub-Saharienne (ASS), l'amélioration de la production agricole et particulièrement de l'alimentation de base est contrainte par une gestion de terre inappropriée et non résiliente (Bekunda *et al.*, 2010 ; Vanlauwe *et al.*, 2001). Les sols des agrosystèmes se trouvent souvent limités par des carences naturelles, multiples, notamment en phosphore (P), en azote (N) et en potassium (K) (Kihara *et al.*, 2016 ; Raminoarison *et al.*, 2020). Aussi, les activités biologiques du sol impliquées dans de nombreuses fonctions sur la fertilité du sol sont inhibées, due à la faible disponibilité de substrats (Tiessen *et al.*, 1994). De ce fait, la monoculture et/ ou l'accès limité aux intrants (organiques ou minéraux), entraîne souvent des balances nutritionnelles négatives des sols. En plus de ces contraintes économiques et biophysiques, les activités agricoles sont soumises aux difficultés engendrées par le changement climatique et la dégradation de la biodiversité (Lichtfouse, 2017). La productivité agricole reste ainsi très faible, accentuant l'insécurité alimentaire déjà alarmante dans de nombreux pays de la région. Il est désormais crucial de fournir des pratiques de fertilisation durables, productives et adaptées au contexte des exploitations.

L'intensification écologique de l'agriculture, à travers la promotion des pratiques agroécologiques, est un moyen de production agricole permettant d'améliorer la performance des systèmes agricoles, tout en maintenant leur durabilité, l'efficacité et le bien-être des agriculteurs. Le cadre de l'ISFM (Integrated Soil Fertility Management) pourrait jouer un rôle important dans la réalisation d'une intensification durable en ASS. Une composante majeure de l'ISFM est l'application combinée de matières fertilisantes (MF) de manière à redresser la fertilité (physique, chimique et biologique) des sols, et à augmenter les rendements (FAO, 2019 ; Sanginga et Woomer, 2009 ; Vanlauwe *et al.*, 2014a, 2014b). La fertilisation minérale seule, notamment le NPK, en plus de son inaccessibilité, a montré ses limites et ne convient pas aux sols multicarencés (Goedert, 1983). De plus, ce type d'engrais accentue le développement des pathogènes selon une étude sur la résistance du riz pluvial face à la pyriculariose (*Pyricularia oryzae*) (Blanchart *et al.*, 2020).

L'assemblage des matières est reconnu comme l'un des moyens de fertilisation les plus adaptés aux agrosystèmes à bas intrants caractérisés par des carences multiples (Vanlauwe *et al.*, 2010, 2001). Nombreuses études ont confirmé un surplus de rendements obtenu à partir de l'assemblage de MF en comparaison aux applications séparées (Andriamananjara *et al.*, 2019, 2018; Edmeades, 2003; Nziguheba *et al.*, 2002; Vanlauwe *et al.*, 2002), grâce aux effets diversifiés, additifs ou synergiques de la qualité des matières. Néanmoins, le choix des

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

assemblages performants repose sur une classification bien appropriée des MF disponibles. Les résultats escomptés reposent sur l'hypothèse selon laquelle l'association des matières très contrastés, c'est-à-dire appartenant à de groupes fonctionnels différents augmenterait la performance des assemblages.

Deux phénomènes peuvent se produire au sein d'une combinaison des MF et vont régir la performance des assemblages (Jaillard *et al.*, 2018a) :

- (i) L'effet de composition : la performance de l'assemblage résulte de l'effet additif de la contribution propre des matières présentes dans le mélange.
- (ii) L'effet d'interaction : la performance de l'assemblage dépend des interactions existantes (effet non-additif : synergisme, complémentarité, antagonisme...) entre les matières, qui peuvent être positives, négatives ou nulles. Il est possible que certaines réponses d'assemblage favorisent un mécanisme plutôt que l'autre ; mais, ces deux mécanismes peuvent aussi coexister.

Alors que la conception d'une typologie des matières et des assemblages s'est essentiellement construite *a priori* à partir de leurs propriétés inhérentes, peu de travaux sont dédiés à l'identification des assemblages performants par une approche *a posteriori*. Dans le contexte des Hautes Terres de Madagascar, une première ébauche sur la typologie des MF à partir d'une approche *a posteriori* a été récemment réalisée, en conditions contrôlées sous serre, en vue de proposer des assemblages de matières qui améliorent la productivité de la riziculture pluviale. Une classification *a posteriori* grâce à un modèle combinatoire permettrait de proposer des assemblages performants à partir des réponses observées (Jaillard *et al.*, 2018a; 2018b). Ce modèle construit conceptuellement sur les espèces au sein d'un écosystème peut être appliqué pour tout objet au sein d'un assemblage. Dans ce cas, la classification ne se base pas sur les qualités inhérentes de chaque objet, obtenues à l'issue des caractérisations biochimiques. Il s'agit de grouper les composants/matières qui induisent les mêmes effets sur un paramètre donné, quand ils sont en interaction avec d'autres matières, et de modéliser la performance des assemblages à partir des groupements obtenus. Cette nouvelle approche a été choisie puisqu'elle tient compte des interactions réellement générées entre les matières au sein d'un assemblage (Jaillard *et al.*, 2018a; 2018b). L'identification des groupes homogènes à partir d'une classification *a posteriori* permet également de déterminer par quel effet (de composition ou d'interaction) la constitution des groupes par rapport à un paramètre donné est conditionnée. Toutefois, les connaissances sur les qualités intrinsèques des matières restent décisives afin de formuler des hypothèses explicatives de la classification obtenue *a posteriori*.

Suite à l'étude précédente réalisée sous serre, et en vue d'améliorer la typologie des matières et la représentativité des assemblages, et de concevoir une typologie plus proche de la réalité paysanne, un deuxième essai sur le même thème a été effectué au champ. L'objectif de cette

étude est de définir des groupes fonctionnels de matières fertilisantes organiques et minérales dans des conditions paysannes. Les objectifs spécifiques qui en découlent consiste à :

- (i) Déterminer l'effet induit de chacun des groupes en assemblage par rapport à la performance sur le rendement,
- (ii) Identifier par quel(s) effet(s) (de composition ou d'interaction) est gouvernée la performance des assemblages de matières fertilisantes et,
- (iii) Mettre en relation l'appartenance des matières dans des groupes fonctionnels avec leurs caractères biochimiques intrinsèques.

2. Matériels et méthodes

2.1. Localisation de la zone d'étude

L'expérience a été menée en conditions réelles au champ, durant la saison culturale 2019-2020, sur une parcelle agricole, près de la localité d'Imerintsiatosika (19° 05' 40''S; 47° 25' 65" E; 1480 m d'altitude), de la Région Itasy. Ce site n'a pas fait l'objet d'une gestion agricole depuis au moins 30 ans. Le sol est classé selon la taxonomie des sols du WRG en tant que Ferralsols (FAO, 2014). Le sol avait un pH acide (<5), une faible teneur en P Olsen de 3,8 mg.kg⁻¹, une faible CEC (< 2 cmol⁺ kg⁻¹) et de très faibles teneurs en cations échangeables (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺). Une faible teneur en N total a également été observée (< 2,5 g.kg⁻¹). La teneur en carbone organique dans le sol est relativement modérée avec 29,2 g.kg⁻¹. Sa texture était dominée par des fractions fines (70% argiles + limons fins) (Table 1, Partie I).

2.2. Préparation des assemblages

2.2.1. Collecte des matières fertilisantes

Les MF testées dans le cadre cette étude étaient celles utilisées dans l'étude précédente. La description et l'origine des matières sont disponibles sur le Table 6, Chapitre II.1. Seize matières ont été retenues auxquelles on a rajouté le lisier de porc, ce qui fait au total dix-sept matières.

Après la collecte, les matières ont été soumises à plusieurs analyses biochimiques en gardant les mêmes protocoles définis dans la section 2.3 du Partie III.1. En résumé, ces analyses concernent les teneurs en carbone (C), en azote (N), en phosphore (P), en potassium (K), en magnésium (Mg) et calcium (Ca). La teneur en cendres et le pH_{eau} ont été également déterminés. Les caractéristiques des matières sont détaillées en Annexe 6.

2.2.2. Constitution des assemblages

Le nombre d'assemblages retenu a été considéré comme les différents traitements testés. Parmi les assemblages testés, les effets des matières seules avec les 17 produits ont été pris en compte. La connaissance des réponses individuelles des matières permet de distinguer les effets de composition et d'interaction des matières lorsqu'elles entrent en interaction. Les assemblages des MF consistent à mélanger trois matières afin d'assurer que les déficiences nutritionnelles du sol soient comblées tout en proposant des assemblages d'un nombre raisonnable de matières. Les assemblages ont été sélectionnés de manière à représenter à la même fréquence chaque matière fertilisante. La liste des assemblages testés peut être consultée en Annexe 9.

2.2.3. Doses d'apport

La calibration de la dose d'apport a été fixée en prenant comme référence les doses paysannes :

- (i) Pour les assemblages des MF à base d'amendements organiques uniquement (exemple : Fumier+ Lombricompost+ Poudrette de parc), la somme d'apport a été ramenée à 3 t de MS ha⁻¹, i.e. chacune des 3 matières constitutives de l'assemblage a été apportée à 1/3 de la dose totale. Pour les amendements organiques apportées seules, la dose était fixée à 3 t de MS ha⁻¹.
- (ii) Les assemblages des MF à base d'engrais uniquement (exemple : Cendre d'*Eucalyptus*+ Fientes de volailles+ Corne de zébu broyée), la somme d'apport était de 500 kg de MS ha⁻¹, i.e. chaque matière constitutive de l'assemblage a été apportée à 1/3 de la dose totale. Pour les engrais apportées seules, la dose était de 500 kg de MS ha⁻¹.
- (iii) Le NPK seul a été apporté à raison de 150 kg ha⁻¹.
- (iv) Pour les assemblages des MF constitués par des amendements organiques et/ou des engrais et/ou du NPK (exemple : Fumier + Lombricompost + Cendre d'*Eucalyptus* ou Fumier + Cendre d'*Eucalyptus* + Fientes de volailles ou Fumier + Lombricompost + NPK ou Fumier + Cendre d'*Eucalyptus* + NPK ou Cendre d'*Eucalyptus* + Fientes de volailles + NPK), la somme d'apport des matières à base d'amendements organiques était gardée à 3 t de MS ha⁻¹, celle des matières à base d'engrais était de 500 de MS ha⁻¹, la dose du NPK était ajoutée à raison de 150 kg.ha⁻¹. Les informations concernant la dose sont synthétisées dans le Tableau 17.

Il est à noter que la corne de zébu a expliqué une forte proportion de la variance dans la classification des matières issue de la première étude en serre. Comme cette matière n'est pas habituellement utilisée par les agriculteurs, sa dose d'apport a été diminuée selon les doses pour les engrais et suite aux échanges avec le paysan du site, soit 500 kg.ha⁻¹.

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

Tableau 17 : Classification des matières fertilisantes à partir des enquêtes paysannes et leurs doses d'apport.

Doses d'apport	Amendements organiques		Engrais	
	3 t MS ha ⁻¹		500 kg MS ha ⁻¹ Sauf NPK : 150 kg MS ha ⁻¹	
Classification	Fumier provenant d'Itasy	FumI	Dolomie	Dol
	Compost par Madacompost	ComM	Phosphate naturel	Hyp
	Vermicompost par l'association TATA	VCT	Fiente de volailles	FieV
	Vermicompost provenant de Vakinankaratra	VCV	Fiente de chauve-souris	FieC
	Taroka	Tar	Farine de crabe	FarC
	Compost d'Andralanitra	ComT	Cendre de balle de riz	CB
	Poudrette de parc	PP	Cendre d'Eucalyptus	CE
			Corne de zébu	CZ
			Lisier de porc	Lis
			NPK (11 : 22 : 16)	NPK

2.2.4. Description du dispositif et du design expérimental

Le dispositif expérimental a été réalisé en adéquation avec l'objectif du modèle combinatoire, en testant le nombre maximal d'assemblages possible. Le dispositif expérimental approprié était le dispositif en randomisation totale, c'est-à-dire que la disposition des différents assemblages a été entièrement aléatoire par répétition.

Trois blocs de 4x4 m ont été préparées pour l'installation de l'expérience, un bloc pouvant contenir 400 poquets de plantes de riz espacés de 20 × 20 cm. Dans cet essai, un poquet de plantes de riz va être soumis à un assemblage. Chaque bloc représente une répétition des différents traitements, d'un côté pour prendre en compte la possibilité de transfert de nutriments entre deux assemblages côte à côte (i.e. la variabilité spatiale) et de l'autre côté, pour minimiser la possibilité de perte durant l'expérimentation et pour avoir des valeurs statistiques rigoureuses.

Chaque bloc comporte deux zones :

- La zone d'échantillonnage : les poquets à l'intérieur des bordures.
- La zone de bordures : deux lignes extérieures de chaque côté du bloc. La présence de la zone de bordure permet d'éviter des effets « bordure » au sein de chaque bloc.

En tenant compte de l'espacement entre les poquets et de la surface d'une placette et en éliminant les bordures, 256 assemblages possibles ont été étudiés, ce qui fait un total de 256 assemblages × 3 répétitions = 768 poquets d'assemblages. Un apport de 3 t MS ha⁻¹ de fumiers ont été appliquées au niveau des deux premières lignes de bordures. Leur disposition au champ est illustrée dans la Figure 24.

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

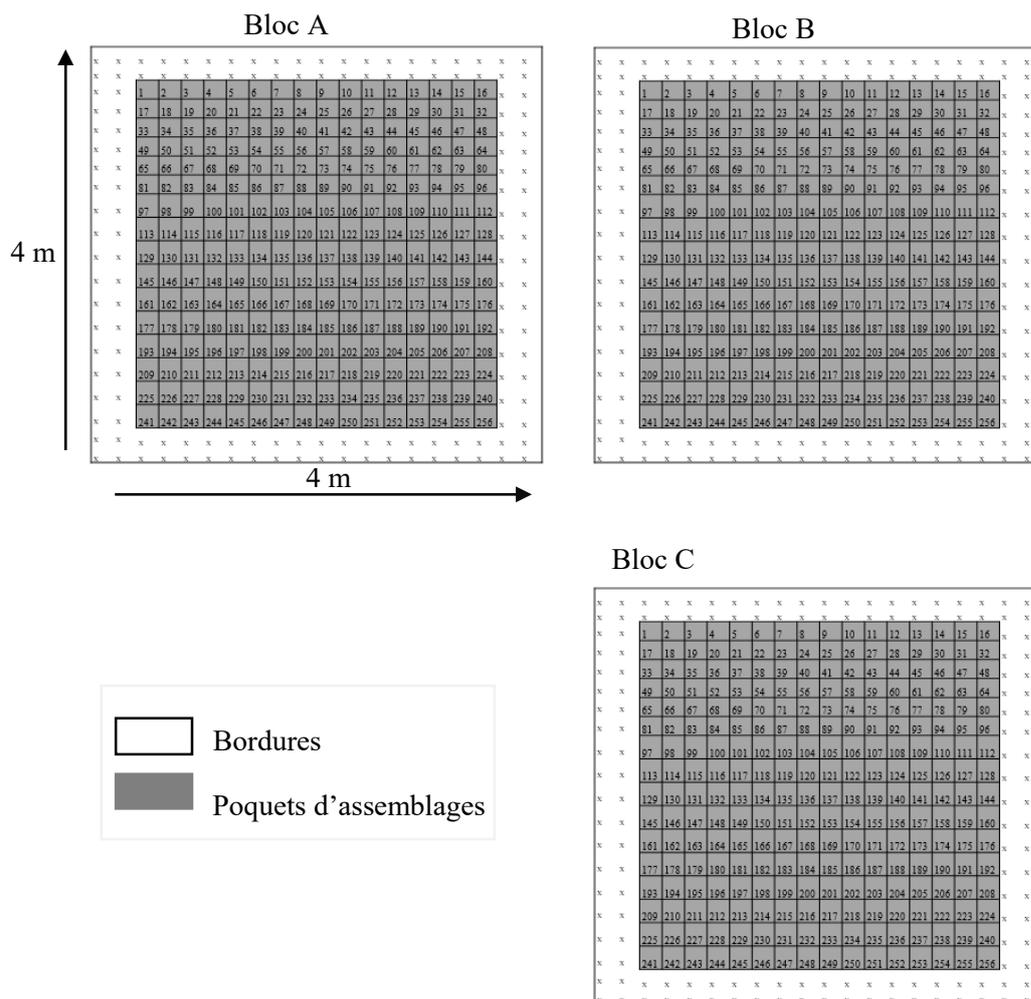


Figure 24: Dispositif expérimental de l'essai sur les assemblages des matières fertilisantes en conditions réelles au champ. Les chiffres indiquent le numéro des assemblages.

2.3. Variété de riz utilisée

La variété de riz *Chhomrong Dhan* a été utilisée dans cette étude. Il s'agit d'une variété d'origine népalaise introduite à Madagascar dans les années 1990 (Raboin *et al.*, 2013). La variété de riz pluvial *Chhomrong Dhan* est destinée aux altitudes supérieures à 1 300 m, se caractérise par une tolérance au froid et à la pyriculariose, une productivité élevée et s'adapte aux sols peu fertiles. Une enquête en 2010, dans deux communes des Hautes Terres, indiquait que 80% des surfaces cultivées en riziculture pluviale sont occupées par la variété *Chhomrong Dhan* (Raboin *et al.*, 2014).

2.4. Conduite de la culture

2.4.1. Préparation des parcelles et semis

Avant l'installation de l'expérience, un éclaircissement des parcelles a été effectué. Ensuite, le labour, suivi d'un planage a été entrepris manuellement avec l'*angady*. Des canaux en amont des parcelles ont été aménagés afin de dévier la direction des crues hors de la parcelle expérimentale lors des fortes pluies. Au moment du semis, des trous espacés de 20 × 20 cm ont été installés, dans lesquels les assemblages de fertilisants ont été disposés simultanément avec 5 semences de riz. Pour éviter au maximum le risque de transfert inter-poquet, chaque poquet a été recouvert de terres sans encombrer la germination des graines.

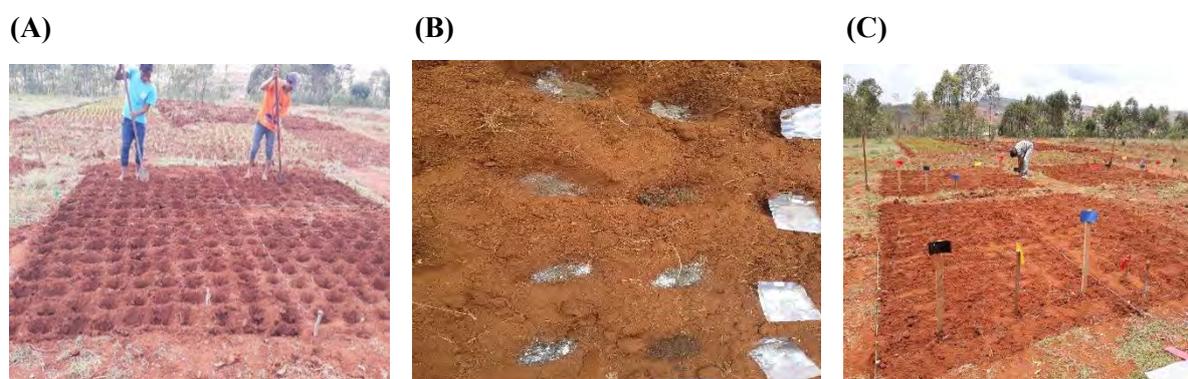


Photo 4: Installation de l'expérience, (A) : trouaison, (B) : mise en place des assemblages dans les trous et semis, (C) : état final des parcelles après l'installation.

2.4.2. Entretien des parcelles

Les entretiens ont essentiellement consisté à appliquer deux opérations de sarclo-binage, à 21 et 49 jours après le semis (JAS) ; et une opération de resemis, à 21 JAS, réalisé sur les poquets qui n'ont pas germé. Le sarclo-binage permet de faire à la fois un désherbage et un ameublissement de la surface du sol. Les résidus ont été écartés hors de la parcelle pour ne pas biaiser les résultats dus aux effets des résidus.

Aucune lutte phytosanitaire chimique n'a été envisagée. Par contre, les attaques des *Heteronychus sp.* qui sont survenues sur le site, ont nécessité une lutte manuelle en inspectant les poquets infestés et en écrasant manuellement les insectes.

2.5. Variables mesurées

L'expérience a été maintenue jusqu'au rendement (140 jours). Quatre observations ont été effectuées le long du cycle cultural pour le comptage des talles et la mesure de la hauteur des plantes : (i) mi- période de la phase végétative (35 JAS), (ii) fin de la phase végétative (63 JAS), (iii) mi- période la phase reproductive (84 JAS) et (iv) enfin à la récolte (140 JAS). A la fin de

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

l'expérience, les parties aériennes des plantes ont été coupées puis séparées en grains et en paille. Les rendements en grains et en pailles de chaque assemblage ont été déterminés après séchage à l'étuve à 60°C pendant 72 h et sont exprimés par le poids en grains ou en paille par plant.

Les opérations de mesures ont été réalisées sur tous les poquets à l'exception des bordures.

Un schéma illustrant la date des opérations culturales et le calendrier de mesures durant l'expérience est décrit sur la Figure 25.

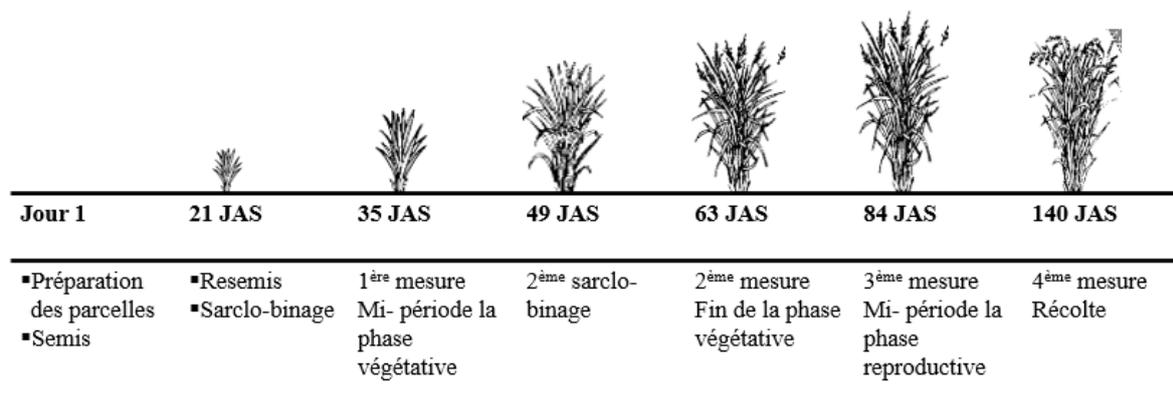


Figure 25 : : Calendrier cultural et périodes de mesures durant l'expérience. JAS : jours après semis

2.6. Analyses statistiques

2.6.1. Statistique descriptive

Les médianes des trois répétitions ont été prises pour les analyses statistiques ; tous les traitements de données ont été faits avec le logiciel R (R Team, 2016). Des statistiques descriptives qui informent sur la moyenne, la médiane, les valeurs maximale et minimale ont été construites, en premier lieu, par représentation en boîtes à moustaches des observations sur toutes les variables.

2.6.2. Analyse combinatoire

- **Typologie des matières fertilisantes par approche *a posteriori***

L'analyse combinatoire est un modèle qui permet de proposer une typologie des composants en se basant uniquement sur la connaissance des composants qui constituent les assemblages (Jaillard *et al.*, 2018a; 2018b). Les étapes de la typologie *a posteriori* de composants sont décrites dans la section § 2.6.1. du chapitre III.1.

Brièvement, le modèle est basé sur une procédure qui regroupe les individus en groupes en fonction de leurs effets sur une performance des assemblages observée et pour laquelle l'ajustement aux données observées est maximisé. Ce modèle se déroule en deux temps : une

étape de calibration suivie d'une étape de validation pour une performance mesurée. Dans les deux cas, une approche itérative est utilisée. Dans l'ensemble, la procédure construit un arbre hiérarchique de classification des individus/ composants en groupes qui explique au mieux la performance observée. A chaque élagage de l'arbre hiérarchique, la validité (R^2) et la précision (E) du modèle sont appréciées et, à l'aide d'un critère de prédiction AIC (Ajustement Information Criterial), le nombre optimal de groupes formés correspond à la valeur de l'AIC la plus basse. L'analyse combinatoire est disponible avec le package « functClust ».

- ***Séparation des effets de composition et d'interaction***

La performance des assemblages observée peut être décomposée en effet d'interaction et de composition. Cela est possible grâce à la connaissance des effets individuels des matières sur les variables étudiées. L'effet de composition est défini par un effet additif de chaque matière dans un assemblage. Il correspond à la prédiction selon laquelle l'effet d'un assemblage est équivalent à la somme des effets des matières qui composent cet assemblage. L'effet d'interaction correspond à une performance globale non additive d'un assemblage. Il résulte de mécanismes soient antagonistes (effet négatif des matières entres-elles) ou synergiques (effet positif des matières entres-elles). Le modèle détermine l'effet de composition et d'interaction des assemblages en comparant la fonction des assemblages observée à celle prévue par les fonctions des matières en apport seul contenus dans le mélange.

Par définition, soit $F_{observée}$ la performance observée (hauteur, nombre de talles, rendement) d'un mélange de matières, $F_{attendue}$ la performance attendue qui est la performance moyenne des effets individuels des matières cooccurrentes dans un assemblage, et F_{seules} la performance moyenne des effets seuls de toutes les matières étudiées. La performance de l'assemblage peut être répartie comme la formule suivante :

$$F_{observée} = \frac{F_{observée}}{F_{attendue}} \times \frac{F_{attendue}}{F_{seules}} \times F_{seules} \quad (1)$$

Ou $F_{observée} = \alpha \times \beta \times F_{seules} \quad (2)$

Avec $\alpha = \frac{F_{observée}}{F_{attendue}} \quad (3)$

Et $\beta = \frac{F_{attendue}}{F_{seules}} \quad (4)$

Le premier quotient α est l'effet d'interaction entre les composants, β l'effet de composition, et le dernier terme est appelé l'échelle facteur de l'expérience. L'effet d'interaction mesure l'effet induit par les interactions entre matières sur un paramètre donné de chaque assemblage de matières. Par définition, l'effet d'interaction des matières apportées seules vaut donc 1. L'effet de composition mesure l'effet induit par la contribution de chaque composant par rapport à la performance moyenne en apport seul de toutes les matières utilisées dans l'expérience. Dans notre cas, F_{seules} est égale à la moyenne des effets seuls des 17 matières. L'effet de composition d'un assemblage de matières composé de toutes les matières utilisées dans l'expérience est

donc, par définition, égale à 1. En d'autres termes, l'effet de composition moyen d'un ensemble d'assemblages de matières ayant une composition équitable vaut 1. Le facteur d'échelle mesure les effets globaux des conditions où s'est déroulée l'expérience. La performance corrigée par le facteur d'échelle, peut donc s'écrire comme suit :

$$\frac{F_{observée}}{F_{seules}} = \alpha \times \beta = f_{observée} \quad (5)$$

Les effets d'interaction (α) et de composition (β) sont des grandeurs relatives, donc centrées sur 1. Si la valeur des effets est supérieure à 1, cela signifie que l'effet d'interaction ou de composition améliore la performance ; en revanche, un effet (d'interaction ou de composition) inférieur à 1 indique que les interactions existantes tendent à diminuer la performance des assemblages.

Pour déterminer lequel de ces effets conditionne la performance des assemblages, les effets d'interaction α et de composition β ont été modélisés séparément avec le modèle combinatoire. Si le modèle obtenu arrive à bien expliquer (R^2 élevé) et prédire (E élevé) l'un des effets, cet effet (d'interaction α ou de composition β) explique donc les variations de la performance observée (Annexe 10). Cette opération a été effectuée sur toutes les variables étudiées.

- ***Analyse de la variance***

Le package « functClust » permet également de faire une analyse de la variance (anova) de la performance des assemblages de matières organiques expliquées par la cooccurrence des différents groupes fonctionnels de matière organique. Cette analyse permet de déterminer automatiquement l'effet de chacun des groupes fonctionnels sur la performance du système.

3. Résultats

3.1. Statistiques descriptives de la performance des matières seules ou en assemblage

La Figure 26 illustre la distribution des effets des matières seules ou en assemblage sur la hauteur des plantes à la récolte et le rendement en grains. Les résultats concernant les autres variables peuvent être consultés en Annexe 11.

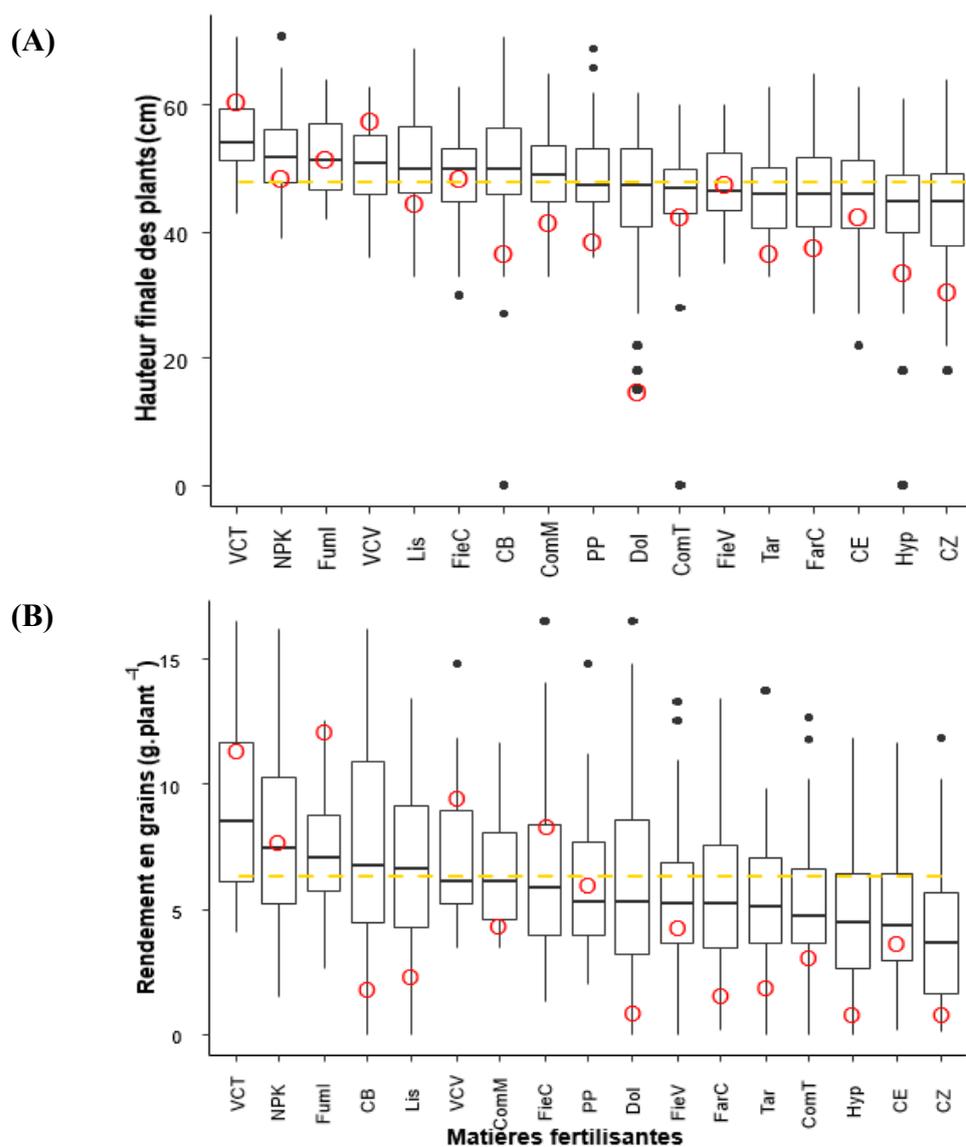


Figure 26 : Répartition de la performance des matières fertilisantes, (A) sur la hauteur finale des plants et (B) sur le rendement en grains, des matières seules et en assemblage. Les figurés en rouge représentent l'effet des matières seules. Les lignes discontinues verticales représentent la moyenne de tous les assemblages. Les matières fertilisantes apparaissent selon un ordre décroissant des médianes. CB : cendre de balle de riz, CE : cendre d'Eucalyptus, CZ : corne de zébu, Com : compost, Dol : dolomie, Fie : fientes, FarC : farine de crabe, Fum : fumier, Hyp : hyperfos, Lis : lisier de porc, PP : poudrette de parc, Tar : taroka, VC : lombricompost.

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

Pour tous les assemblages confondus, la hauteur des plantes varie de 0 à 71 cm ; la médiane et la moyenne présentent les mêmes valeurs de 48 cm. Quant au rendement en grains, la valeur minimale est de 0 tandis que la valeur maximale atteint 16,5 g plante⁻¹. La moyenne est de 6,15 g plante⁻¹ et la médiane est située en dessous avec une valeur de 5,74 g plante⁻¹.

En séparant les boîtes à moustache selon la présence des matières en assemblages (Figure 26), une tendance assez nette et similaire s'aperçoit sur les deux variables. Les boîtes à moustache ont une allure très allongée sur toutes les observations, et sont distribuées symétriquement dans beaucoup de cas. La performance des matières seules diffèrent nettement entre elles. Les effets individuels des matières sont soit très faibles comme pour {CZ}, {Hyp} et {Dol}, soit très forts comme pour {VCT}, {VCV} et {FumI}, par rapport à leurs médianes en assemblages. Les matières qui présentent une capacité de production en grains élevée en apport seul sont également les matières à forte productivité en assemblages ; c'est particulièrement observé pour {VCT}, {FumI} et {NPK}. Dans ce cas, leurs médianes en assemblages se trouvent bien supérieures à la moyenne générale de tous les assemblages testés. A l'opposé, il existe des matières qui ont des performances faibles à la fois en application seule et en assemblages. Cette tendance s'observe surtout pour {CZ} et {Hyp}. Ceci suppose déjà que la présence des matières {VCT}, {NPK} et {FumI} dans un assemblage renforce la productivité du riz, tandis que la présence de {Hyp} et {CZ} la diminue. En outre, {Dol}, {CB} et {Lis}, en application seule, ne fournissent pas les éléments nécessaires pour combler la demande des plantes ; par contre, lorsqu'elles sont incluses dans des assemblages, leurs médianes dépassent largement leurs performances en applications seules. La médiane de {CB} en assemblages se situe même de façon supérieure à la moyenne générale, de même pour {Lis}.

3.2. Typologie des matières fertilisantes par rapport à la hauteur finale des plantes

3.2.1. Identification des groupes fonctionnels formés et des motifs d'assemblage performants

L'analyse combinatoire sur la hauteur finale des plantes a classé les matières en quatre groupes fonctionnels, correspondant à la valeur minimale de l'AIC. Le modèle est caractérisé par des critères statistiques moyens : $R^2=0,49$, $E= 0,30$ et $E/R^2= 62\%$. Le premier groupe 'a' est constitué de deux matières {CZ, ComT}. Seule la matière {VCT} forme le groupe 'b'. Les 14 matières restantes se répartissent ensuite dans les deux derniers groupes dont {FarC, FumI, FieC, Lis, NPK} dans le groupe 'c' et {CB, CE, Dol, FieV, Hyp, ComM, PP, Tar, VCV} dans le groupe 'd' (Figure 27a). Parmi les 15 ($2^4 - 1$) motifs d'assemblages possibles, 12 ont été observés sur la modélisation de la hauteur des plantes à la récolte (Figure 27b). La représentativité des motifs d'assemblages obtenus est mal répartie, où un seul motif (cd) a été représenté plus de 90 fois, alors que d'autres motifs ne sont apparus qu'une (motif (ab)) ou deux (motif (abc)) fois seulement.

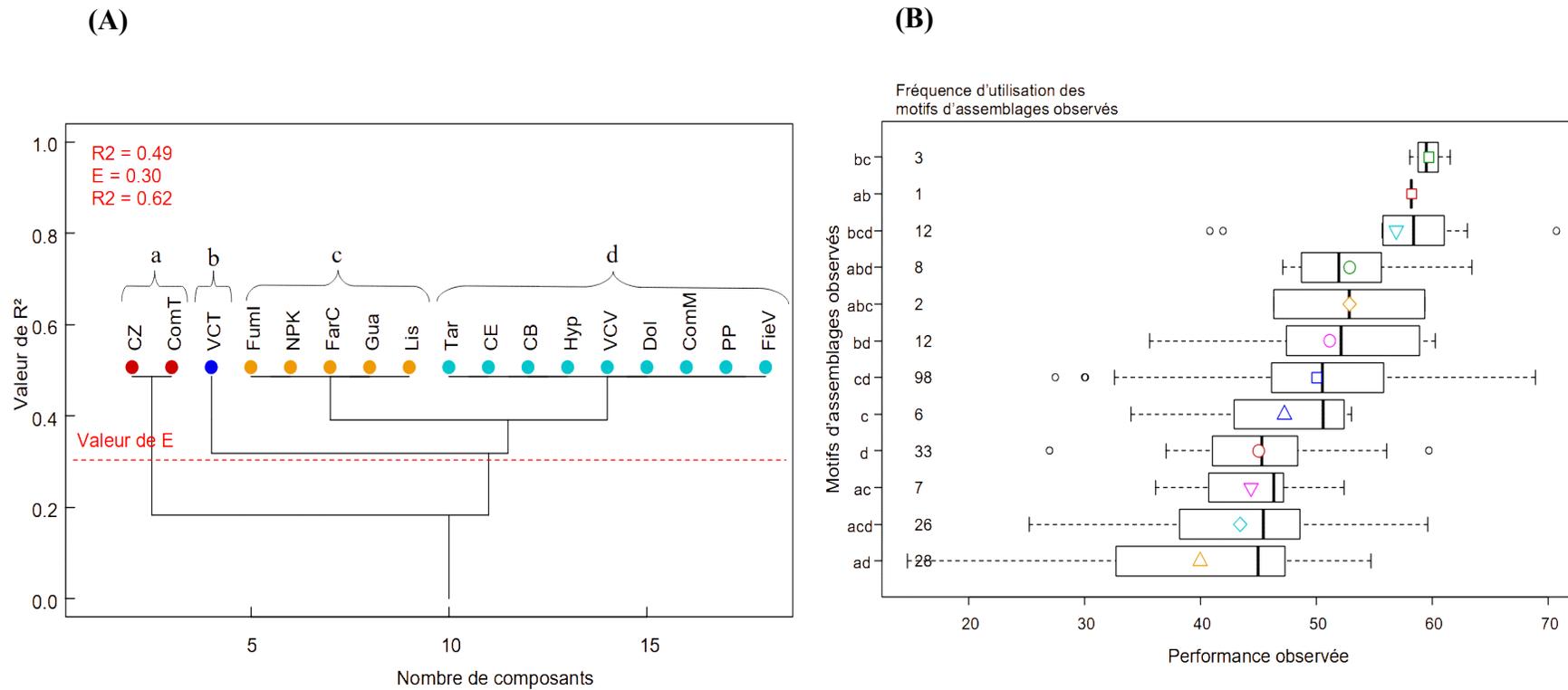


Figure 27: Typologie des matières fertilisantes basée sur la performance de la hauteur des plantes à la récolte. (A) Arbre hiérarchique de la typologie des matières fertilisantes selon une classification à quatre groupes. Les matières possédant la même couleur appartiennent au même groupe. (B) Boîtes à moustaches des performances observées rassemblées par motifs d'assemblages. L'identification des matières fertilisantes est donnée dans le Tableau 17.

3.2.2. Effet des groupes et des interactions entre les groupes sur la hauteur finale des plantes

La part de chacun des groupes formés à améliorer ou à défavoriser la performance d'un assemblage a été étudiée à travers l'analyse de la variance (Tableau 18). Au vu des résultats, les groupes 'a', 'b' et 'c' ont des effets très significatifs sur la performance de la hauteur des plantes avec des p -value $< 0,01$. Les matières du groupe 'a' ont des effets négatifs, lorsqu'elles sont présentes dans un assemblage, tandis que celles appartenant aux groupes 'b' et 'c' induisent des effets positifs.

Ces résultats sont confirmés par les performances des motifs d'assemblages observés, décrites dans la Figure 27b. La présence des matières appartenant aux groupes 'b' et/ou 'c' favorise la croissance en hauteur des plantes. Le motif (bc) correspond d'ailleurs au meilleur motif d'assemblage. Au contraire, la présence du groupe 'a' dans un assemblage a tendance à diminuer la performance des assemblages (cf. motif (ac), (acd) et (ad)). L'action désavantageante des matières du groupe 'a' est surtout remarquable en comparant les positions des motifs (c) et (ac), (d) et (ad), (cd) et (acd) (Figure 27b).

Par contre, l'effet des matières du groupe 'd' n'est pas significatif (Tableau 18), c'est-à-dire que l'apport de ces matières ne présente aucun intérêt pratique par rapport à la hauteur des plantes à la récolte. L'interaction entre les groupes est également non significative.

Tableau 18 : Analyse de la variance des performances des assemblages expliquées par les groupes et les interactions entre les groupes sur la hauteur des plantes à la récolte

Groupe	Ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	p.value	median.diff
a	1	0,95	0,95	27,36	<0,001 ***	-0,14
b	1	0,93	0,96	27,46	<0,001 ***	0,17
c	1	0,49	0,49	14,09	<0,001 ***	0,09

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Les interactions sans effet significatif ne sont pas présentées dans le tableau. Groupe : le nom des groupes fonctionnels. Ddl : degré de liberté. median.diff : la médiane de l'intensité de l'effet induit, le signe donne le sens de l'effet, positif ou négatif.

3.2.3. Séparation de la hauteur en effets d'interaction et de composition

La performance des assemblages observée peut être décomposée en effet d'interaction (α) et en effet de composition (β) sachant que la performance en elle-même est le produit des deux mécanismes. L'obtention du modèle de classification des matières fertilisantes sur la hauteur finale des plantes est surtout liée à un phénomène de composition. L'effet de composition est très bien expliqué par le modèle et remarquablement prédit, avec un coefficient R^2 de 0,97, un coefficient E de 0,94, et un coefficient E/R^2 de 97% (Figure 34a en Annexe 12). Les critères statistiques restent corrects, lorsque l'effet d'interaction est modélisé, avec une qualité d'ajustement R^2 de 0,44, un coefficient d'efficacité E de 0,31 et un coefficient E/R^2 assez élevé

de 71% (Figure 34b en Annexe 12). L'effet des matières fertilisantes sur les assemblages est donc cumulatif : la performance des assemblages dépend grandement de la composition des assemblages.

3.3. Typologie des matières fertilisantes par rapport au nombre de talles

3.3.1. Identification des groupes fonctionnels formés et des motifs d'assemblage performants

Le modèle de classification *a posteriori* des matières en se référant au nombre de talles fertiles se caractérise par un coefficient R^2 de 0,59, un coefficient E de 0,44 ; ce qui donne un coefficient E/R^2 de 74% (Figure 28a). Les MF sont classées en quatre groupes homogènes. Les {FumI, VCV, ComM, ComT, Tar, PP} constituent le premier groupe 'a'. Cinq matières composées par {FarC, FieC, CB, NPK, Lis} sont groupées dans le second groupe 'b'. Le groupe 'c' ne contient qu'une seule matière {VCT}. Le dernier groupe 'd' rassemble les cinq matières restantes {FieV, Hyp, CE, CZ, Dol} (Figure 28a). Le modèle a pu prédire 12 motifs d'assemblages parmi les 15 motifs possibles (Figure 28b). Par rapport à la variable précédente, l'apparition des motifs d'assemblages testés est plus ou moins équilibrée.

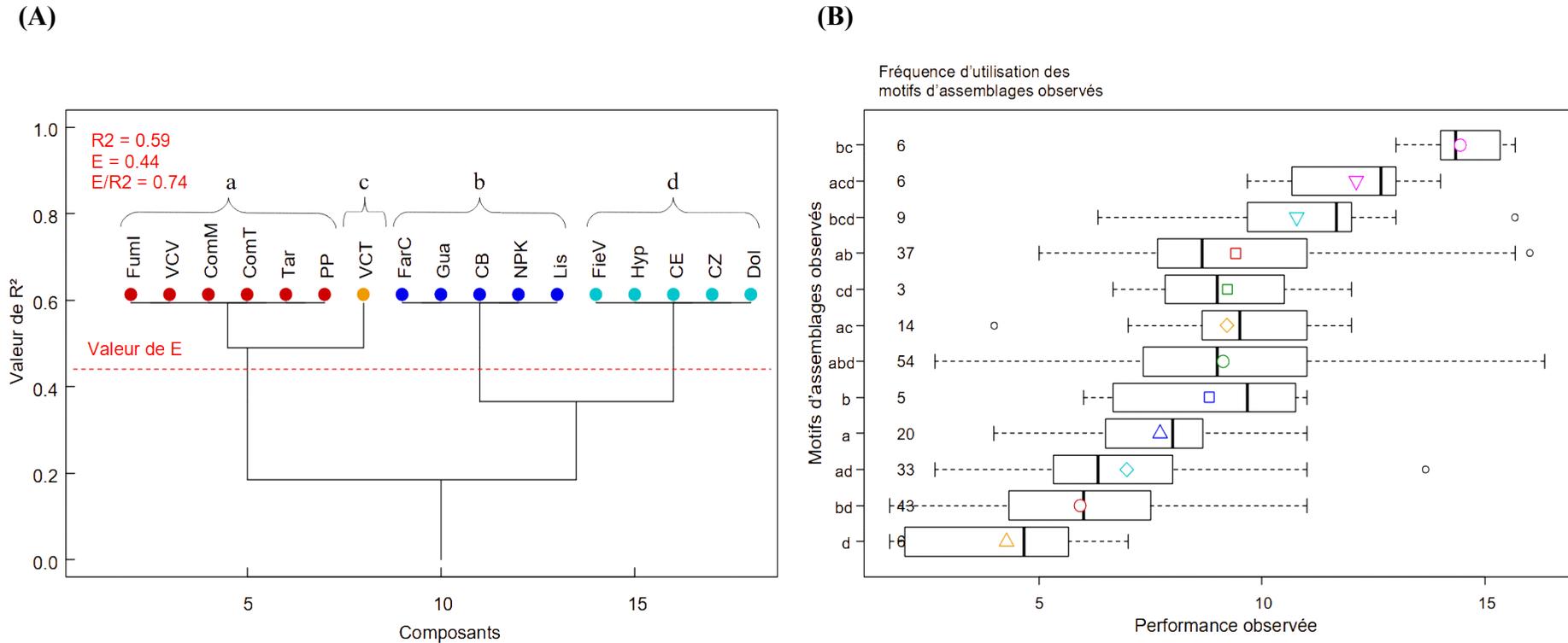


Figure 28 : Typologie des matières fertilisantes basée sur la performance du nombre de talles fertiles. (A) Arbre hiérarchique de la typologie des matières fertilisantes selon une classification à quatre groupes. Les matières possédant la même couleur appartiennent au même groupe. (B) Boîtes à moustaches des performances observées rassemblées par motifs d'assemblage. L'identification des matières fertilisantes est donnée dans le Tableau 17.

3.3.2. Effet des groupes et des interactions entre les groupes sur le nombre de talles fertiles

L'analyse de la variance des performances des assemblages, expliquée par la cooccurrence des différents groupes est affichée dans le Tableau 19. Les effets simples des matières des groupes 'a', 'b' et 'c' sont hautement significatifs et leurs présences dans un assemblage favorisent d'une manière positive l'émission de talles fertiles. Une significativité élevée de nombreuses interactions statistiques entre 'a:c', 'a:d', et 'a:c:d', est également observée. Les interactions entre 'a:c' et 'a:c:d' ont statistiquement des effets positifs sur le nombre de talles à la récolte alors que l'interaction entre 'a:d' tend à baisser cette variable. En revanche, les cinq matières du groupe 'd' n'ont significativement aucun effet sur le nombre de talles bien que leur présence dans un assemblage tende à diminuer le nombre de talles formé (Tableau 19).

Cette analyse de la variance explique l'appartenance des motifs (bc), (acd), (bcd) et (ab) parmi les meilleurs motifs d'assemblages (Figure 28b), et les motifs (ad), (bd) et (d) parmi les motifs d'assemblages à faible performance.

Tableau 19: Analyse de la variance des performances des assemblages expliquées par les groupes et les interactions entre les groupes sur le nombre de talles fertiles à la récolte

Groupes	Ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	p.value	median.diff
a	1	1,67	1,67	14,50	<0,001 ***	0,18
b	1	1,72	1,72	14,96	<0,001 ***	0,17
c	1	10,86	10,86	94,31	<0,001 ***	0,54
d	1	0,35	0,35	3,07	0,081	-0,07
a:c	1	1,4	1,4	12,15	0,001 ***	0,42
a:d	1	1,42	1,42	12,33	0,001 ***	-0,16
a:c:d	1	0,47	0,47	4,10	0,044 *	0,19

* p < 0.05; ** p < 0.01; *** p < 0.001. Les interactions sans effet significatif ne sont pas présentées dans le tableau. Groupe : le nom des groupes fonctionnels. Ddl : degré de liberté. median.diff : la médiane de l'intensité de l'effet induit, le signe donne le sens de l'effet, positif ou négatif.

3.3.3. Séparation du nombre de talles en effets d'interaction et de composition

La décomposition du nombre de talles en effets d'interaction et de composition montre que l'effet de composition β explique en grande partie les variations des performances observées en se référant au nombre de talles. Le modèle issu de l'effet de composition possède un coefficient de détermination R^2 très élevé de 0,98, avec un coefficient d'efficacité E de 0,96 ($E/R^2= 98\%$) (Figure 35 en Annexe 12). La performance des assemblages va ainsi dépendre majoritairement de la contribution propre des matières fertilisantes qui constituent les assemblages.

3.4. Typologie des matières fertilisantes par rapport aux rendements en grains et en pailles

3.4.1. Identification des groupes fonctionnels formés et des motifs d'assemblage performants

La performance agronomique d'un fertilisant ou d'une combinaison de fertilisants est essentiellement jugée sur sa capacité de production. Dans cet essai, les rendements en grains et en pailles ont été considérés.

Le modèle de classification des MF a expliqué 79% et 68% de la variance totale, en considérant les variables sur les rendements en grains et en pailles, respectivement. L'efficacité du modèle E est de 54% pour le rendement en grains ($E/R^2=68\%$) et de 47% pour le rendement en pailles ($E/R^2= 69\%$) (Tableau 20).

Tableau 20: Typologie des matières fertilisantes en se basant sur les rendements en grains et en pailles des plantes.

	Rendement en grains	Rendement en pailles
a *	{FumI, ComM, PP, VCV}	{VCT}
b	{CB, FieC, Lis, NPK}	{CE, CZ, FarC, FieV, Hyp}
c	{VCT}	{CB, Dol, FieC, Lis, NPK}
d	{CE, CZ, Dol, Hyp}	{FumI, VCV}
e	{FieV, Tar}	{ComM, PP, Tar, ComT}
f	{ComT, FarC}	
R^2	0,79	0,68
E	0,54	0,47
E/R^2	68%	69%

* : désigne les groupes fonctionnels

R^2 : coefficient de détermination

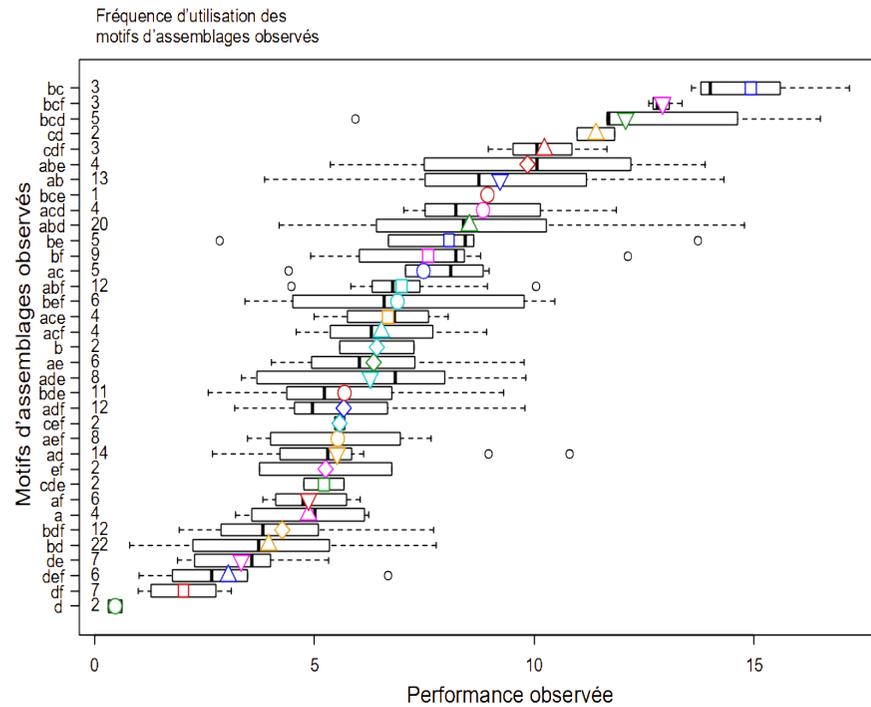
E : coefficient d'efficacité

L'identification des matières fertilisantes est donnée dans le Tableau 17.

Les modèles de classification des MF sur le rendement en grains et en paille ont proposé respectivement une typologie des composants à six et à cinq groupes. Le Tableau 20 donne les résultats détaillés sur l'appartenance des matières dans chaque groupe formé. Parmi les 63 motifs d'assemblages possibles, 35 motifs ont pu être prédits par le modèle sur la variable rendement en grains. Pour le rendement en pailles, 21 sur 31 motifs d'assemblages possibles ont été observés (Figure 29). La représentativité des motifs d'assemblages est assez disparate, et de nombreux motifs ont été représentés moins de cinq fois.

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

(A)



(B)

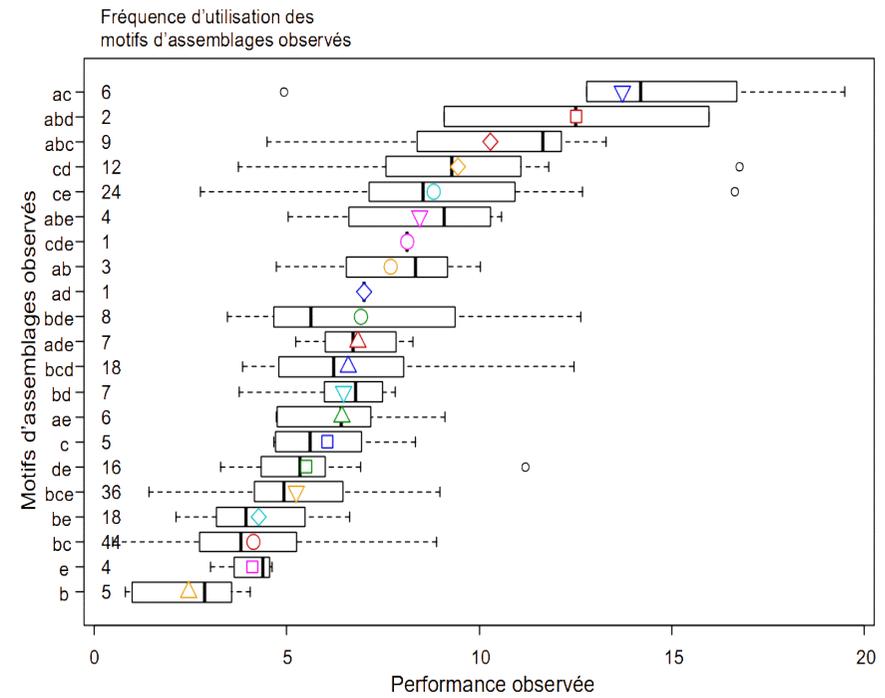


Figure 29 : Boîtes à moustaches des performances observées rassemblées par motifs d'assemblage, (A) sur le rendement en grains, et (B) sur le rendement en pailles. Ordonnées : les motifs d'assemblage.

3.4.2. Effet des groupes et des interactions entre les groupes sur les rendements en grains et en pailles

L'effet des groupes et des interactions entre les groupes sur les rendements en grains et en pailles peut être identifié en effectuant une analyse de la variance. L'anova montre que la présence des matières appartenant aux groupes 'a', 'b', et 'c' dans un assemblage influence significativement, et positivement le rendement en grains du riz ($p < 0,05$, Tableau 21). A l'inverse, les groupes 'd' et 'f' tendent à baisser le rendement (cf. sens du median.diff, Tableau 21), mais cette tendance n'est pas statistiquement significative avec le groupe 'f'. Aucun effet significatif n'est détecté avec la présence du groupe 'e' dans un assemblage. Des interactions statistiques (cooccurrence des groupes fonctionnels) entre 'a:c', 'a:d', 'c:e', 'c:f', 'e:f' et 'a:c:e' ont été également identifiées. Seules les interactions entre 'a:d' et 'e:f' agissent négativement sur le rendement en grains.

Afin d'obtenir une production en grains plus intéressante, l'utilisation des matières {FumI, ComM, PP, VCV}, {CB, FieC, Lis, NPK} et {VCT} dans un mélange est donc à privilégier, ces matières appartiennent aux groupes 'a', 'b' et 'c', respectivement. Les meilleurs motifs s'obtiennent d'ailleurs avec l'assemblage de (bc), (bcd) et (bce) (Figure 29). La présence de {CE, CZ, Dol, Hyp} (matières du groupe 'd') est à éviter, autant que possible, dans la conception d'un assemblage. Cette tendance est confirmée par la position des motifs d'assemblages en présence du groupe 'd', illustrée dans la Figure 29a. L'intégration des matières des groupes 'e' et 'f' {FieV, Tar}, {ComT, FarC} dans un assemblage présente un effet nul sur le rendement en grains.

Tableau 21: Analyse de la variance des performances des assemblages expliquées par les groupes et les interactions entre les groupes sur le rendement en grains

Groupes	Ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	p value	median.diff
a	1	2,97	2,97	15,91	<0,001 ***	0,22
b	1	12,02	12,02	64,45	<0,001 ***	0,43
c	1	24,80	24,80	132,94	<0,001 ***	0,86
d	1	0,71	0,71	3,79	0,05 '	-0,10
e	1	0,40	0,40	2,16	0,14	0,08
f	1	0,11	0,11	0,59	0,44	-0,04
a:c	1	8,02	8,02	43,01	<0,001 ***	0,59
a:d	1	3,23	3,23	17,32	<0,001 ***	-0,05
c:e	1	4,70	4,70	25,21	<0,001 ***	0,26
c:f	1	0,79	0,79	4,26	0,04 *	0,32
e:f	1	0,82	0,82	4,41	0,04 *	-0,02
a:c:e	1	1,42	1,42	7,60	0,01 **	0,16

'p<0.1 ; * p < 0.05; ** p < 0.01; *** p < 0.001. Les interactions sans effet significatif ne sont pas présentées dans le tableau. Groupe : le nom des groupes fonctionnels. Ddl : degré de liberté. median.diff : la médiane de l'intensité de l'effet induit, le signe donne le sens de l'effet, positif ou négatif.

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

Pour le rendement en pailles, tous les groupes formés, à l'exception du groupe 'e' ont eu une influence significative sur la performance des assemblages (Tableau 22). Le sens de l'effet, c'est-à-dire le sens de la médiane de l'effet induit, précise que les matières figurant dans les groupes 'a', 'c' et 'd' renforcent la production en pailles du riz. Ces matières concernent {VCT}, {CB, Dol, FieC, Lis, NPK} et {FumI, VCV}, respectivement. A l'opposé, les matières {CE, CZ, FarC, FieV, Hyp}, appartenant au groupe 'b', ont des effets négatifs sur le rendement en pailles. Par ailleurs, les interactions entre 'a:b', 'a:c' et 'b:c' présente une influence hautement significative et positive sur la performance des assemblages en se référant à la production en pailles.

La hiérarchisation des motifs d'assemblages décrit dans la Figure 29b témoigne de ces effets induits par les groupes et les interactions des groupes. Les meilleurs motifs d'assemblages sont obtenus avec les motifs $(ac) \geq (abd) > (abc)$, tandis que les motifs à faible performance sont observés, par ordre décroissant, avec $(bc) \geq (e) \geq (b)$.

Tableau 22: Analyse de la variance des performances des assemblages expliquées par les groupes et les interactions entre les groupes sur le rendement en pailles

Groupes	Ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	p value	median.diff
a	1	15,47	15,47	66,83	0,00 ***	0,70
b	1	7,93	7,93	34,26	0,00 ***	-0,38
c	1	6,07	6,07	26,21	0,00 ***	0,33
d	1	3,69	3,69	15,92	0,00 ***	0,25
e	1	0,32	0,32	1,36	0,24	0,06
a:b	1	3,40	3,40	14,68	0,00 ***	0,21
a:c	1	3,09	3,09	13,35	0,00 ***	0,69
b:c	1	10,05	10,05	43,40	0,00 ***	0,12

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$. Les interactions sans effet significatif ne sont pas présentées dans le tableau. Groupe : le nom des groupes fonctionnels. Ddl : degré de liberté. median.diff : la médiane de l'intensité de l'effet induit, le signe donne le sens de l'effet, positif ou négatif.

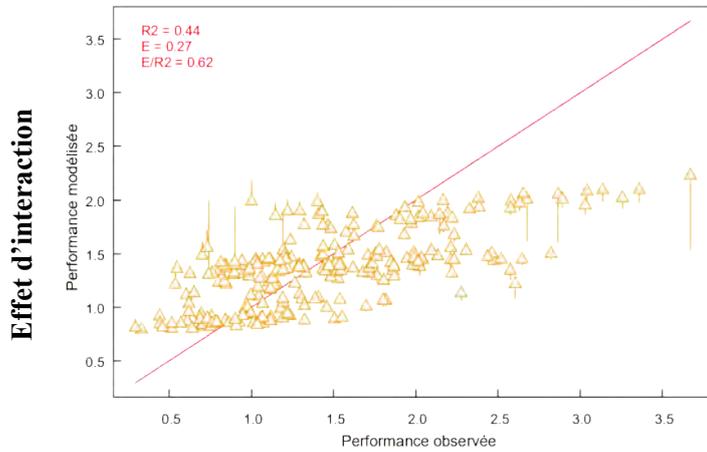
3.4.3. Séparation des rendements en grains et en pailles en effets d'interaction et de composition

La séparation de la performance des assemblages sur le seul effet de composition ou d'interaction, en termes de rendement en grains et en paille, est décrite dans la Figure 30. Une nouvelle fois, la performance des assemblages apparaît fortement contrôlée par la contribution propre de chaque matière fertilisante dans les mélanges. Autrement dit, le potentiel des rendements est sous l'effet de la composition des mélanges (Figure 30b, d) : le coefficient de détermination R^2 est supérieur à 0,92, et le coefficient E/R^2 se trouve proche de 100%, pour les deux variables. En revanche, le modèle n'arrive pas à expliquer plus de 50% de la variance totale et le coefficient E/R^2 avoisine 60%, dans le cas où l'effet d'interaction est pris en compte dans la modélisation des groupes fonctionnels (Figure 30a, c). Bien que l'effet d'interaction ne soit pas très bien expliqué par le modèle combinatoire, la moyenne de l'effet reste non

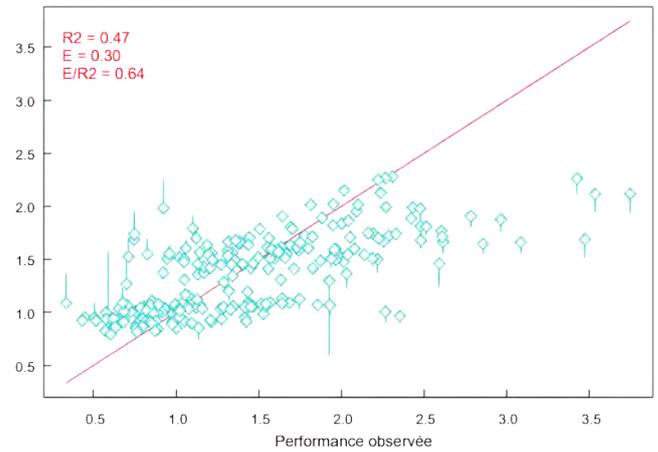
PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

négligeable avec une valeur proche de 1,3, indiquant qu'en moyenne les interactions existantes entre les matières augmentent la production en grains.

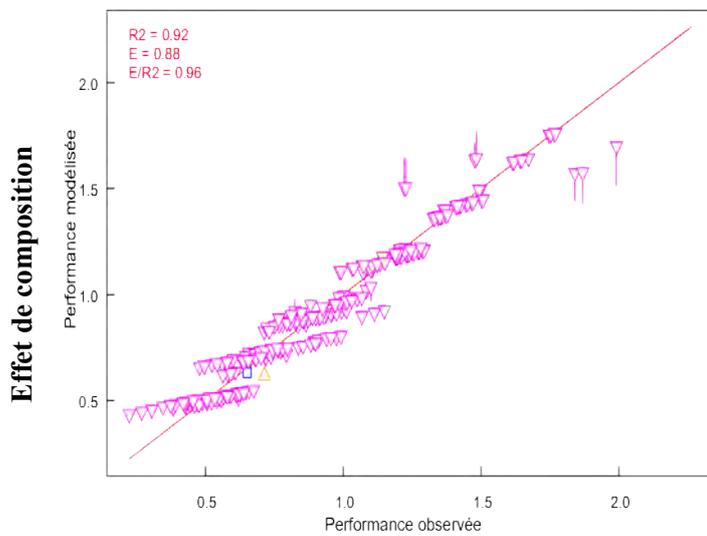
(A) Rendement en grains



(B) Rendement en pailles



(C)



(D)

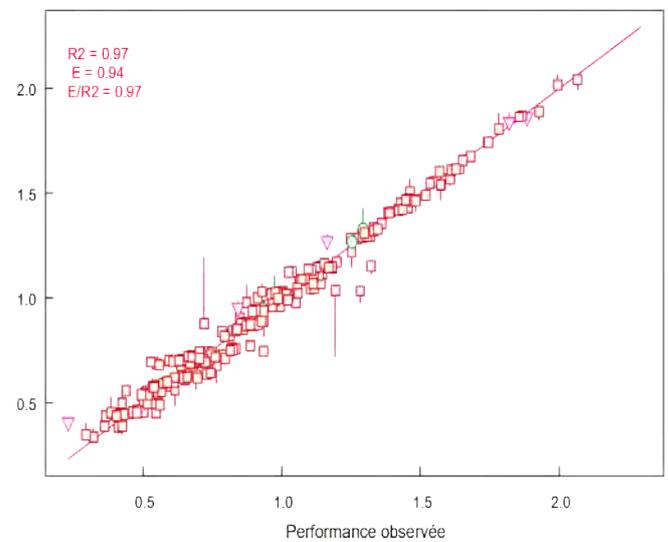


Figure 30 : Relation entre les performances observées et modélisées sur (A) et (C) le rendement en grains, et (B) et (D) sur le rendement en pailles, suivant une modélisation séparée (A) et (B) en effet d'interaction, et (C) et (D) en effet de composition. Les valeurs sont transformées en valeurs normalisées selon l'équation 5.

3.5. Situation de la pratique paysanne

La pratique habituelle des agriculteurs a été située par rapport aux autres motifs observés en considérant le modèle de classification *a posteriori* des MF sur la production en grains. L'association de la cendre de balle de riz et du fumier traditionnel figure parmi les pratiques habituelles des exploitants, et correspond au motif (ab). La position du motif (ab) par rapport aux autres motifs d'assemblage observés peut être visualisée sur la Figure 29a. Les résultats ont montré que la pratique paysanne considérée dans cette étude se trouve parmi les motifs d'assemblage à performance élevée et se classe en septième place sur les 35 motifs d'assemblages obtenus.

4. Discussion

4.1. Validité des critères statistiques

Dans ce travail, la performance des assemblages a été évaluée sur le rendement en grains et sur les paramètres de croissance des plantes de riz comme la hauteur finale des plantes riz et le nombre de talles fertiles à la récolte. La typologie des MF basée sur l'approche *a posteriori*, en termes de nombre de groupes formés et d'appartenance de matières dans des groupes, comme l'étude précédente, varie en fonction du paramètre considéré. L'analyse combinatoire a classé les MF entre quatre à cinq groupes fonctionnels, avec des valeurs de R^2 allant de 0,49 à 0,79 et de E allant de 0,30 à 0,54. Par rapport à l'étude précédente en serre, les critères statistiques sont relativement faibles mais restent acceptables.

Le modèle de classification issu de la performance sur le rendement en grains possède les critères statistiques les plus élevés (R^2 de 0,79 et E de 0,54 $E/R^2= 68\%$, Tableau 20). Ces critères correspondent à une classification des MF à six groupes. Pour des raisons pratiques, dans la discussion, nous avançons un modèle alternatif qui s'arrête à une typologie des matières à cinq groupes. Ce modèle pourrait être plus intéressant afin de garder des groupes de matières de nombre raisonnable et de faciliter la construction des arguments dans la discussion. Les résultats du modèle à cinq groupes sont décrits dans l'Annexe 13.

La suite de la discussion sera ainsi principalement axée sur le paramètre du rendement en grains et tiendra compte de la classification à cinq groupes des matières fertilisantes.

4.2. Assemblages performants dépendant de l'effet des matières seules

Dans un système interactif, comme l'assemblage des matières fertilisantes, la cooccurrence des composants définit la performance des assemblages. Les réponses des assemblages dépendent de ce fait de l'effet diversifié des matières, qui peut s'exprimer soit par un effet d'interaction, soit par un effet de composition. L'analyse combinatoire, qui est une classification *a posteriori* des matières, permet de comprendre par quel effet les réponses des assemblages ont été

obtenues. Ainsi, l'un des objectifs de notre étude consiste à quantifier ces effets sur la performance des assemblages de MF.

Au vu des résultats, quelles que soient les variables étudiées, la réponse des assemblages semble étroitement liée à l'effet individuel des matières qui constituent les assemblages (Figure 30c et d, Figure 34b, Figure 35b). Les coefficients de détermination R^2 et de l'efficacité E se trouvent tous supérieurs à 0,92 avec les modèles construits à partir de l'effet de composition, alors que ces valeurs ne dépassent pas 0,45 en tenant compte de l'effet d'interaction. En d'autres termes, l'effet de composition semble très bien expliqué et remarquablement prédit par le modèle combinatoire. La performance des assemblages dépend ainsi essentiellement de la capacité productive individuelle des composants présents dans un assemblage.

Ces résultats paraissent en adéquation avec les carences multiples des Ferralsols (Raminoarison *et al.*, 2020) et conséquemment, l'amélioration de la fertilité des sols pour une productivité améliorée nécessite, en assemblages, la présence de toutes les matières capables d'apporter les éléments nécessaires pour couvrir les nutriments les plus limitants. Chaque matière présente dans un assemblage devrait combler certaines carences et générer un effet additif sur un paramètre. Néanmoins, même si les effets d'interaction n'ont pas été bien modélisés ($R^2 < 0,50$ et $E < 40$), des interactions statistiques, qui résultent de l'analyse de la variance (Tableau 19, Tableau 21, Tableau 22), indiquent l'existence d'interactions entre les groupes qui peuvent être synergiques/complémentaires ou compétitives. Dans ce cas, certaines interactions vont permettre de stimuler ou de ralentir la performance d'une autre matière. C'est la raison pour laquelle les performances observées lorsque les matières sont seules, sont différentes de celles observées lorsque les matières sont assemblées avec d'autres matières (Figure 26). L'interaction entre 'a:c', c'est-à-dire une matière du groupe 'a' {FumI, ComM, PP, VCV} et une du groupe 'c' {VCT}, est significativement bénéfique sur le rendement en grains, alors que l'interaction entre 'a:d', une matière du groupe 'a' et une du groupe 'd' {CE, CZ, Dol, Hyp} engendre une interaction négative. Toutefois, la moyenne de l'effet d'interaction reste supérieure à 1, ce qui révèle qu'en moyenne les interactions observées tendent à produire des effets synergiques ou de complémentarité.

4.3. Identification des effets induits par les matières pour proposer des assemblages performants

L'un des principaux résultats attendus de ce travail consiste à identifier les assemblages de matières fertilisantes qui améliorent la production. Les combinaisons des matières ont été évaluées à partir de la performance des motifs d'assemblage qui se définissent comme la combinaison des groupes (fonctionnels) cooccurrents dans un assemblage. Les assemblages de matières qui partagent le même motif possèdent donc la même performance.

Dans les conditions au champ, les meilleurs motifs d'assemblages sont obtenus avec (bc), (bcd) et (bce) (Annexe 13). L'analyse de la variance des performances des assemblages, expliquées par les groupes et les interactions entre les groupes, aide à déterminer les effets induits de chacun des groupes de MF, en assemblage. Cette analyse va par la suite informer les matières à privilégier ou à exclure dans un assemblage afin de proposer des assemblages performants.

4.3.1. Matières fertilisantes à privilégier dans un assemblage

Les résultats ont montré que l'ajout des matières appartenant au groupe 'a' {FumI, ComM, PP, VCV}, au groupe 'b' {CB, FieC, Lis, NPK} ou au groupe 'c' {VCT} dans un assemblage renforce la production en grains (Tableau 21).

En premier lieu, les résultats témoignent du rôle majeur des matières fabriquées à base de fumier d'animaux, transformées ou non, sur la fertilité des sols et spécifiquement des Ferralsols ; et grâce à leur présence dans un assemblage, le rendement du riz se trouve améliorer. Ces produits constituent une source importante de substrats organiques capables de (i) réactiver les activités microbiennes du sol (Abbott *et al.*, 2018; Cai *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2018), (ii) d'alléger l'acidité du sol grâce à la libération des ions OH⁻ au cours de la décomposition des matières organiques et grâce à leur teneur substantielle en cations (Andriamananjara *et al.*, 2019, 2018; Haynes et Mokolobate, 2001), (iii) d'atténuer la toxicité aluminique due à l'adsorption de l'Al soluble sur la surface des substances humiques solubles et à la précipitation de l'Al échangeable et soluble en composés insolubles (Haynes et Mokolobate, 2001) et (iv) de libérer une quantité importante de P adsorbée sur la phase solide du sol (Haynes et Mokolobate, 2001). Les avantages des fumiers d'animaux, et probablement de leurs dérivés transformés ou non, sont également liés à leurs capacités à atténuer le stress hydrique (Andriamananjara *et al.*, 2019, 2018), étant donné que la saison culturale a été plutôt sèche en début de culture et est caractérisée par un retard de pluies, provoquant des répercussions assez conséquentes sur la culture.

Par rapport aux produits bruts, les produits (lombri-)compostés, sont aussi des matières stabilisées dans lesquelles la plupart des éléments nutritifs sont présents sous des formes facilement disponibles pour les plantes (Diacono et Montemurro, 2010). Par ailleurs, les actions des lombricomposts en ce qui concerne les caractéristiques physiques et chimiques du sol peuvent être considérablement supérieures par rapport au compost classique (Abbott *et al.*, 2018; Chaudhary *et al.*, 2004). L'influence spécifique des lombricomposts provient de la stimulation des activités microbiennes plus accrue due à la présence des turricules produites par les vers de terre durant le processus de compostage (Chaudhary *et al.*, 2004).

En deuxième lieu, l'ajout des matières du groupe 'b' {CB, FieC, Lis, NPK} dans un assemblage tend également à augmenter le rendement. Ce constat rejoint les résultats de plusieurs études abordant la nécessité d'apporter des matières minérales dans un assemblage pour couvrir les

déficiences nutritionnelles des Ferralsols. L'action positive de la cendre de balle de riz {CB} peut être liée à sa forte teneur en silice (Della *et al.*, 2002; Koyama *et al.*, 2016), un élément reconnu pour son rôle prophylactique (contre les stress biotique et abiotique) pour les plantes (Wang *et al.*, 2017), et à sa structure microporeuse qui permet de réduire la densité apparente et d'améliorer la capacité de rétention en eau du sol (Singh *et al.*, 2019). En outre, en plus des substrats organiques qu'ils apportent, la disponibilité en macronutriments du lisier de porc et du guano de chauve-souris est plus élevée (N, P) voire comparable (K, Mg) aux engrais minéraux, leur permettant de fournir immédiatement des nutriments indispensables aux plantes. Même si le NPK est recommandé dans un assemblage pour favoriser la production de grains, son utilisation mérite une gestion raisonnée. L'étude de Blanchart *et al.* (2020) a montré une forte prolifération des pathogènes, en particulier de la pyriculariose, avec l'apport du NPK dans la pratique de fertilisation. Leur résultat vient soutenir les travaux de Sester *et al.* (2019) mentionnant la forte sensibilité des Ferralsols aux maladies par rapport aux Andosols. De plus, les produits minéraux ne présentent pas d'effets significatifs sur le stock en C du sol donc, la fertilité à long terme des sols n'est pas maintenue.

Ainsi, d'une manière *a priori*, les motifs d'assemblages à forte performance, sur le rendement en grains, résultent de la combinaison des MF à valeur amendante, comme {VCT}, et d'une à valeur fertilisante, comme le {FieC}, correspondant aux motifs (bc) par exemple. Cette pratique de fertilisation qui associe deux types de matières explique également la position de la pratique paysanne ({FumI} + {CB}), parmi les motifs d'assemblages à performance relativement élevée. Pourtant, d'autres paramètres qui renseignent sur le maintien à long terme de la fertilité des sols sont importants à considérer pour proposer des assemblages dans le cadre de l'intensification durable. Enfin, il faut souligner le rôle spécifique du {VCT} dans cette étude, où les motifs d'assemblages les plus performants résultent de l'association de ce produit avec d'autres appartenant à un groupe différent. Nous pouvons visualiser la position des mêmes motifs en présence et en absence du {VCT} dans la Figure 29.

4.3.2. Matières fertilisantes à exclure dans un assemblage

A l'issue des résultats, le groupe de matières 'd' constitué par {CE, CZ, Dol, Hyp} tend à baisser le rendement en grains lorsque ces produits sont inclus dans un assemblage, bien que l'effet soit non significatif au seuil de 5%. Pour avoir une tendance plus précise de leur effet, les motifs d'assemblage en leur présence, affiche une performance plus faible par rapport aux motifs en leur absence (Figure 29a). Cette tendance a probablement un lien sur le fait que l'intégration des matières {CZ}, {CE} et des foies {ComT} dans un assemblage a induit significativement des effets négatifs sur les autres variables. Par contre, selon leurs caractéristiques intrinsèques (Annexe 6), {CE, CZ, Dol, Hyp} contiennent de quantités considérables en nutriments, notamment en N, Ca, Mg et P, et présentent un potentiel fertilisant élevé.

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

Par rapport à l'étude réalisée sous serre (voir Partie III.1) où les meilleurs motifs d'assemblage ont été obtenus dans la majorité des cas avec la présence de {CZ} dans un assemblage ; cette tendance n'a pas été observée dans la présente étude réalisée au champ. Deux hypothèses sont émises pour expliquer cette différence. Premièrement, les doses apportées diffèrent entre les deux études : la {CZ} a été appliquée à 6t MS ha⁻¹ dans l'étude sous serre et à seulement 500 kg ha⁻¹ dans l'étude au champ. Cette diminution de dose, au champ, a été décidée parce que la {CZ} n'est pas utilisée habituellement par les agriculteurs dans leurs pratiques de fertilisation ; réduire la dose permettait donc de mieux valoriser le produit et mieux refléter la réalité paysanne. Toutefois, la teneur en N remarquablement élevée dans la {CZ} (Ichida *et al.*, 2001 ; Zoccola *et al.*, 2009) serait supposée améliorer le statut nutritionnel du sol dans une certaine mesure et donc le rendement. En effet, un apport en {CZ} à raison de 500 kg ha⁻¹ correspond à un ajout d'azote de 75 g N ha⁻¹, au-dessus de la valeur plancher des besoins en azote du riz (FAO, 1997). Ce qui nous amène à avancer la deuxième hypothèse. L'effet négatif induit par {CZ} pourrait provenir des conditions de culture différentes entre les deux études, en serre sous conditions contrôlées et au champ en conditions réelles. La {CZ} possède un caractère particulièrement absorbant, et dans ce sens, cette matière exige la présence abondante d'eau pour libérer les nutriments qui y sont présents. En conditions au champ, la saison culturale a été marquée par un retard de pluies, ce qui a probablement altéré la capacité fertilisante de la {CZ}, contrairement à ce qui s'est passé en conditions contrôlées sous serre où les pots d'expérimentation ont été arrosés régulièrement. La propriété récalcitrante de la {CZ} (Zoccola *et al.*, 2009) accompagnée d'une pluviosité limitée, dans les conditions au champ, aurait empêché la diffusion et la solubilisation de l'N de la corne dans la solution du sol. En assemblage, cette condition aurait entraîné une immobilisation, par les microorganismes, de l'N contenu dans d'autres matières. Par conséquent, la quantité d'N disponible pour les plantes aurait diminué (pendant un certain moment) et cette situation aurait affecté négativement la performance de l'assemblage en présence de la {CZ}.

En ce qui concerne {Dol}, ce produit est couramment recommandé pour la correction de l'acidité du sol des agrosystèmes. La capacité de chaulage de la cendre {CE} a été aussi longuement prouvée par de nombreuses recherches, grâce à la quantité en cations (K, Ca, Mg) élevée dans le produit (Augusto *et al.*, 2008; Khanna *et al.*, 1994). La riziculture pluviale en altitude, par contre, tolère les sols acides et une diminution du rendement est même signalée avec une augmentation de pH_{eau} supérieure à 6 (Raboin *et al.*, 2016 ; Fageria *et al.*, 2004). Les assemblages des matières en présence de {CE} et {Dol} auraient donc rehaussé le pH_{eau} à un niveau proche de la neutralité, ce qui aurait généré un effet négatif sur le rendement. Toutefois, l'action de ces produits sur la réduction de la toxicité aluminique serait importante à considérer (Delhaize et Ryan, 1995; Kochian *et al.*, 2004).

4.3.3. Matières fertilisantes à effets neutres

Le groupe de matières 'e' composé de {FieV, Tar, ComT, FarC} génère des effets neutres, au niveau du rendement en grains, lorsqu'elles sont présentes dans un assemblage. Autrement dit, leur présence ne présente aucun intérêt pratique sur la production en grains. Néanmoins, les analyses (bio)chimique des {FieV}, {Tar} et {FarC} montrent que ces matières sont riches en P et Ca (Annexe 6). La capacité du {FieV} à élever le pH du sol a été également prouvée par de nombreuses études (e.g. Materechera et Mkhabela, 2002; Steiner *et al.*, 2007)). L'hypothèse avancée pour expliquer ces résultats 'neutres' est que la dose d'apport serait trop faible pour que les effets de ces matières puissent s'exprimer, même si pour le {Tar}, la quantité appliquée était de 3 t MS ha⁻¹. De plus, il est important de mentionner que les actions de ces matières, et surtout du {FieV} et du {FarC}, pourraient être détectées sur d'autres paramètres et non sur le rendement en grains.

Ainsi, les résultats de la présente étude viennent confirmer que la stratégie de fertilisation qui repose sur un apport de MF, autant que faire se peut, en fonction de la disponibilité des matières premières, n'est pas appropriée. La compréhension du comportement des MF en assemblage permet d'éviter de fertiliser le sol avec des matières qui induisent des effets négatifs et des effets non significatifs en assemblages. Aussi, le modèle ne peut pas prédire la performance des motifs d'assemblages non observés, par contre, les résultats issus de l'anova permettent d'identifier les matières à privilégier et à exclure dans un assemblage, ce qui donne une idée sur la performance des motifs non prédits.

Pour résumer, un schéma récapitulatif des effets des matières fertilisantes sur le rendement en grains est représenté dans la Figure 31 ; ceux des autres variables, sont donnés en Annexe 14.

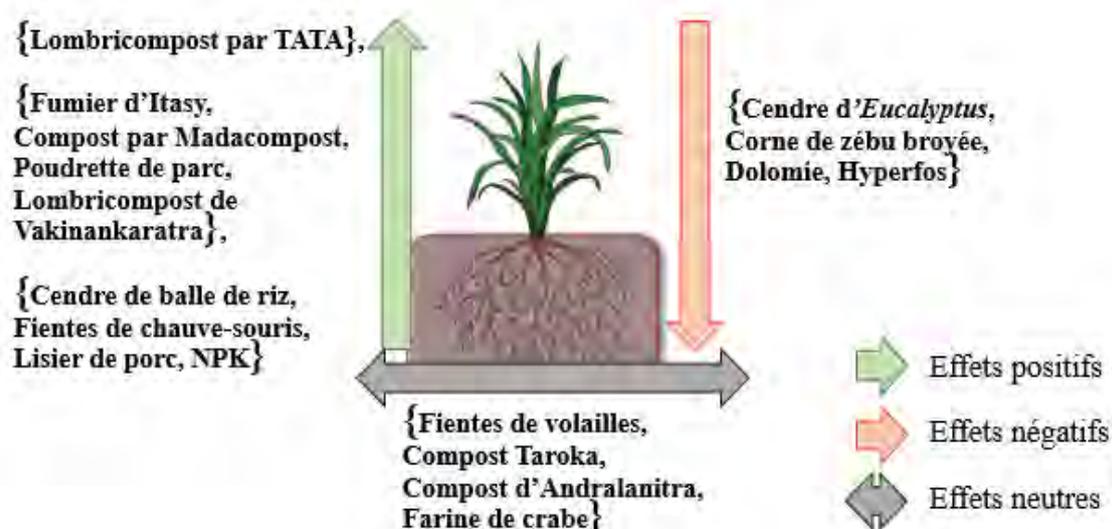


Figure 31 : Schéma récapitulatif des effets des matières fertilisantes en assemblage sur le rendement en grains du riz. Les matières fertilisantes listées dans une même accolade appartiennent au même groupe fonctionnel.

4.4.Perspectives et limites

Le message principal qui ressort de cette étude est que la performance des assemblages est principalement liée à un effet de composition, c'est-à-dire que les réponses des assemblages dépendent grandement de la performance des matières qui composent un assemblage. Comme les matières sélectionnées ont été caractérisées avant l'expérience, les quantités des nutriments apportées dans chaque assemblage sont connues. Une analyse statistique qui étudie la relation entre les qualités intrinsèques des matières et les réponses des assemblages offrirait une opportunité pour voir l'importance de chaque caractéristique des matières sur la performance des assemblages.

Les résultats expérimentaux ont aussi démontré que des matières qui possèdent des caractéristiques inhérentes intéressantes peuvent induire des effets significativement négatifs ou neutres en assemblages. Il est impossible pour le moment de valider ces résultats ; mais la prise en compte des mesures sur d'autres paramètres serait une piste, toujours en conditions variables sur le terrain, pour identifier dans quelle mesure les matières moins efficaces peuvent être valorisées, et permettrait d'approfondir la validité des résultats.

En outre, une hypothèse concernant la dose apportée a été avancée pour expliquer l'action désavantageante de la {CZ}. Ceci est bien entendu valable pour toutes les matières. La construction d'un modèle combinatoire se basant sur la variabilité de la dose mériterait d'être conduite.

En comparaison avec l'étude précédente en serre, les critères statistiques issus des modèles de classification en conditions expérimentales au champ restent faibles. Cela confirme que les

conditions variables sur terrain auraient affecté le développement du riz et donc les réponses observées. Pour les recherches ultérieures, il serait préférable de poursuivre les études dans des conditions réelles sur terrain pour permettre de valider les hypothèses proches de la réalité.

Enfin, une limite importante de l'étude est la durée de l'expérience (une saison) relativement courte. Certaines matières peuvent avoir des effets rapides visibles dès la première année, d'autres comme la dolomie, la corne de zébu ou les engrais issus des roches phosphatées peuvent avoir des effets sur le long terme. La classification qui résulte de notre essai est donc intéressante pour rapidement produire, ce qui est en adéquation avec l'urgence de production de l'agriculture familiale vivrière, mais ne permet pas de fournir un cadre générique sur des temps moyens ou longs. D'autres essais sont nécessaires.

5. Conclusion

Le redressement de la fertilité des Ferralsols des agrosystèmes nécessite l'application combinée de matières fertilisantes. L'identification des assemblages performants nécessite à cet effet l'élaboration d'une typologie bien appropriée des MF disponibles. L'objectif principal de cette présente recherche est de définir des groupes fonctionnels de matières fertilisantes organiques et minérales dans des conditions paysannes et sous climat 'naturel'. L'approche combinatoire par classification *a posteriori* a été choisie pour répondre aux objectifs posés. La présente étude a permis de mettre en évidence que :

- La performance des assemblages est principalement sous l'effet de composition des MF qui constituent les assemblages. La modélisation de l'effet de composition par approche combinatoire est définie par des coefficients R^2 et E très élevés ($>0,90$) sur toutes les variables étudiées. Ainsi, la capacité individuelle des matières présentes dans un assemblage influe grandement la performance des assemblages, et dans ce cas, le nombre de groupes qui constitue un motif d'assemblage influe sur la performance, à condition que l'effet des groupes constitutifs soit positif. Bien que l'effet d'interaction ne soit pas correctement modélisé, la moyenne de l'effet reste à une valeur proche de 1,3, indiquant qu'en moyenne les interactions existantes entre les matières augmentent la production en grains.
- Les MF peuvent être divisées en trois classes selon leurs effets sur la performance des assemblages, lorsqu'elles sont assemblées. Les matières composées de {VCT}, {FumI, ComM, PP, VCV}, et {CB, FieC, Lis, NPK} induisent des effets positifs en améliorant le rendement en grains quand elles sont intégrées dans un mélange, et les meilleurs motifs d'assemblages s'obtiennent avec leur combinaison. Les matières caractérisées par {CE, CZ, Dol, Hyp} tendent à baisser la production en grains, en assemblage. Les restes {FieV, Tar, ComT, FarC} ne présentent aucun effet significatif sur la variable

PARTIE III. Les assemblages de matières organiques et minérales comme pratiques innovantes pour accroître la fertilité des sols

rendement en grains. Les meilleurs motifs d'assemblages peuvent être ainsi identifiés à partir de la connaissance des effets stimulateur ou inhibiteur des MF en assemblages.

- Les MF qui présentent des effets moins encourageants pourraient en revanche avoir un rôle positif sur d'autres paramètres que le rendement et les composantes du rendement. La durabilité du système agricole requiert, aussi, le maintien de la fertilité à long du terme du sol.

Ainsi, la typologie des matières fertilisantes par l'approche combinatoire offre un corpus d'interprétations des résultats relativement étendu, aussi importantes les unes que les autres, pour mieux appréhender la constitution de la classification. Il s'agit de la première recherche qui s'intéresse à la classification *a posteriori* des matières en conditions expérimentales au champ. La poursuite des recherches en conditions réelles semble essentielle afin de faciliter le transfert des connaissances vers les agriculteurs.

⌘ PARTIE IV

Discussion générale et perspectives

1. Rappel sur les objectifs et originalité de la thèse

L'objectif central de ce travail de thèse était de **proposer une stratégie innovante de méthode d'assemblages de matières fertilisantes pour accroître la fertilité des sols des Hautes Terres de Madagascar destinés à la riziculture pluviale**. De cet objectif découlent trois objectifs spécifiques et successifs, qui forment les trois grandes parties de la thèse :

- **Partie I** : Identifier et hiérarchiser les éléments nutritifs dont les carences limitent la productivité du riz pluvial sur les Ferralsols des Hautes Terres de Madagascar.
- **Partie II** : Définir les caractéristiques initiales des matières fertilisantes organiques et minérales existantes sur les Hautes Terres de Madagascar à l'aide des analyses physicochimiques standard en laboratoire et de présenter leurs effets sur le sol, en insistant sur leur valeur amendante et leur valeur fertilisante azotée.
- **Partie III** : Etablir par approche *a posteriori*, une typologie des matières possédant les mêmes réponses (vis-à-vis de la croissance du riz) afin d'identifier les assemblages qui améliorent la fertilité des Ferralsols et la nutrition de la plante.

Cette thèse comporte des méthodes expérimentales et analytiques particulières qui font l'originalité de l'étude :

- (i) Il s'agit de la première étude portant sur l'identification des carences nutritionnelles des sols des Hautes Terres de Madagascar à l'aide d'essais soustractifs, en tenant compte d'autres nutriments que le N et le P,
- (ii) C'est aussi la première étude qui aborde sur le déterminisme des paramètres de cinétique d'échange des ions orthophosphates à l'aide de l'équation de Freundlich après fertilisation des sols par des apports de matières fertilisantes disponibles à Madagascar,
- (iii) C'est une première contribution sur les assemblages de matières fertilisantes organiques et minérales en se basant sur une approche *a posteriori* correspondant au contexte des exploitants des Hautes Terres de Madagascar. Ainsi, à chaque partie de la thèse, une méthodologie (expérimentale et analytique) spécifique aux objectifs a été adoptée.

Dans ce dernier chapitre, l'objectif consiste à synthétiser l'ensemble des résultats obtenus, à statuer les hypothèses avancées dans l'introduction, et finalement à évoquer les limites et les perspectives de recherche.

2. Synthèse des résultats

2.1. Quels éléments nutritifs limitent la productivité du riz pluvial des Hautes Terres de Madagascar ?

L'étude expérimentale sur les essais soustractifs a été menée en conditions contrôlées, pendant 57 jours de croissance du riz, incluant dix traitements de fertilisation. Deux sols provenant des Hautes Terres de Madagascar ont été collectés, l'un provenant de l'Imerintsiatosika et l'autre de l'Ivory, avec lesquels deux variétés de riz, Chhomrong Dhan et Nerica 4, utilisées respectivement sur les sites ont été testées.

Les résultats nous ont permis de voir que la mise en culture des Ferralsols des Hautes Terres est limitée fortement par la faible phytodisponibilité du P. Pour les deux sols, l'omission de P a induit la plus faible quantité de biomasse, avec une moyenne d'environ 180 mg plant⁻¹, non significative par rapport au sol sans apport (moyenne de 90 mg plant⁻¹) (Figure 4). L'omission de P entraînait une diminution de la biomasse évaluée à 95 % par rapport à la fertilisation adéquate, dans laquelle tous les nutriments (N, P, K, Ca, Mg, S et Si) ont été rajoutés. Pour les plants de riz cultivés sur les sols d'Imerintsiatosika, le Ca agit également parmi les plus importants facteurs limitant la productivité du riz, suivi de N et de Mg. Au contraire, pour les plants de riz cultivés sur les sols d'Ivory, seul N limite le développement du riz, alors que Ca et Mg contenus dans le sol se trouvent à une quantité élevée permettant de produire des biomasses semblables aux traitements de fertilisation adéquate. Par ailleurs, il ne faut pas exclure la possibilité de la toxicité aluminique dans les Ferralsols puisque le pH du sol se trouve en dessous 5 dans certains traitements ; une valeur au-dessous de laquelle la solubilisation de l'aluminium est élevée. En revanche, le S et le Si ne se semblent pas déficients dans la productivité du riz pluvial (Figure 4) ; autrement dit, leurs omissions n'ont pas affecté négativement la production en biomasse des variétés de riz testées.

L'omission du K ne figurait pas parmi les traitements testés dû à une erreur expérimentale en relation avec la source de S qui était le K₂SO₄. Une perspective proche issue de cet essai serait d'étudier les effets de l'omission de K et des micronutriments, tels que le Mo, le Zn et le Cu.

2.2. Dans quelle mesure les matières fertilisantes diffèrent entre elles en termes de composition élémentaire et en termes de disponibilité en nutriments ?

La mesure de la diversité des matières fertilisantes sélectionnées dans notre étude a été réalisée au moyen de trois types d'analyses : (i) la détermination de la composition élémentaire et le fractionnement biochimique des produits, (ii) la mesure de la cinétique de minéralisation du C et de l'N, et (iii) la mesure de la phytodisponibilité du P, à l'aide d'un échange isotopique.

Les effets individuels des matières fertilisantes à entretenir le sol (valeur amendante) et à fournir des nutriments, notamment en N et en P, seront discutés. La valeur amendante des produits est

comparée par rapport à leurs effets sur la quantité de CO₂ respiré par g de C ajouté. La valeur fertilisante azotée a été appréciée en calculant la quantité d'N minéralisée en µg N kg⁻¹ jour⁻¹. Pour ces deux critères, un équivalent de 0,004 g de matières g⁻¹ de sol en poids sec (0,4% de matières par gramme de sol) a été mélangé avec le sol.

La phytodisponibilité du P a été évaluée après apport de 25 g de matières kg⁻¹ de sol sec. Le P phytodisponible induit par les matières fertilisantes a été quantifiée comme étant la somme des ions-P dissous (Q_w) et des ions-P diffusibles (Pr). La quantification de Pr a été déterminée expérimentalement sur des suspensions des mélanges sol + matières (1g : 10ml) en couplant des expériences de sorption avec du traçage et de la dilution isotopique des ions phosphates (Fardeau *et al.*, 1991 ; Morel *et al.*, 2000). Les données expérimentales obtenues servent ensuite à estimer les paramètres (v , w , p) de l'équation cinétique de Freundlich : $Pr = v C_P^w t^p$ ($Pr < P$ mineral). L'intérêt de cette équation permet de simuler la quantité de Pr (mg P kg⁻¹ sol) pour toutes durées (t , en minutes) de transfert et de concentration des ions-P en solution (C_P , mg P L⁻¹ solution). Pour comparer nos produits, les dynamiques de Pr pour les traitements de sol fertilisé et le contrôle (sol sans apport) ont été extrapolées en prenant C_P égale à la valeur initiale de C_P du sol après apport (Table 9) et t égal à 120 jours. Cette simulation permet de comprendre les conséquences de la double modification sur C_P et sur la dynamique sol-solution des ions-P diffusibles, i.e. sur les paramètres (v , w , p), due à l'apport des produits. Par ailleurs, la connaissance de la concentration initiale en ions-P C_P des sols fertilisés est également importante car l'absorption des ions-P par les racines est fonction de C_P et ne se produit qu'à partir d'un seuil estimé à 0,005 mg P L⁻¹ (Barber, 1995).

- **Cendres végétales**

Trois types de cendres ont été étudiés : la cendre de paille de riz, la cendre de balle de riz et la cendre d'*Eucalyptus*. Les cendres issues des sous-produits du riz ne présentent pas de caractéristiques particulières et sont pauvres en nutriments de toute sorte. Ces matières ne sont ni amendantes ni fertilisantes en termes de N. L'azote et le carbone qui se libèrent au cours de l'expérience d'incubation proviennent probablement du stock du sol. En revanche, la cendre d'*Eucalyptus* est une matière riche en P, K et Ca et Mg, ce qui en fait un fertilisant très intéressant, mais n'est pas préconisée pour l'entretien du sol à long terme ; il devrait alors être associée à d'autres matières.

La concentration en ions-P dissous des sols après apport de cendre de balle de riz reste inférieure à 0,005 mg P L⁻¹. La valeur de C_P après apport de la cendre de paille de riz s'accroît modestement à 0,008 mg P L⁻¹ et s'élève à 1,430 mg P L⁻¹ suite à une application de la cendre d'*Eucalyptus*. A cette condition (apport de 25 g de produit kg⁻¹ de sol), la cendre de balle de riz ne stimule pas l'interception racinaire alors que l'apport est déjà assez conséquent dans les conditions des agriculteurs. La valorisation de ce produit nécessite l'assemblage avec d'autres

matières. Néanmoins, la cendre de balle de riz est une excellente source de silice qui est un élément à rôle prophylactique pour les plantes.

D'un autre côté, la cendre de paille de riz a un effet assez notable sur C_P mais on note une diminution du nombre de sites de réactions des ions-P diffusibles avec la phase solide du sol. L'effet de la cendre d'*Eucalyptus* sur C_P est remarquable, car la valeur de C_P s'élève à 1,430 mg P L⁻¹ après son application, et le sol restauré avec cette matière a la capacité d'augmenter le nombre de sites de réactions des ions-P diffusibles.

- ***(Lombri)composts de matières végétales et animales***

Toutes les (lombri)composts issus de matières végétales et animales présentent une valeur amendante importante, particulièrement le lombricompost produit par TATA et le compost produit par le LRI. Ils présentent des caractéristiques assez variables en termes de teneur en C et N totales, ainsi qu'en d'autres nutriments (P, K, Ca et Mg). Par exemple, le compost fabriqué par le LRI contient des teneurs totales en C (294 g kg⁻¹), en N (19,6 g kg⁻¹) et en Ca (27,7 g kg⁻¹) les plus élevés. Le vermicompost par TATA se démarque des autres composts par sa teneur en K totale (1,1 g kg⁻¹) plus importante. A court terme (durant les 15 premiers jours), ces composts libèrent de l'N en quantité très intéressante, à l'exception du vermicompost venant de Vakinankaratra. Par contre, leur valeur fertilisante azotée sur le long terme reste faible à modérée; l'apport du compost par le LRI induisait même une immobilisation.

Un compost assez particulier, connu commercialement sous le nom de Taroka figure aussi dans notre gamme de produit. Par rapport aux autres composts, cette matière est riche en P et en Ca totaux mais ne participe pas au stockage de carbone dans le sol (valeur amendante faible). La libération de l'N, à court terme et à long terme, est comparable aux autres composts du même groupe.

Les ions-P dissous après apport de ces types de compost varient, et peuvent se trouver supérieure (à 0,022 mg P L⁻¹) pour certains produits (Compost par le LRI), et rester à 0,003 mg P L⁻¹ pour d'autres (Vermicompost provenant de Vakinankaratra). La simulation des ions-P diffusibles a montré que seul le Taroka augmente le nombre de sites de réactions des ions P diffusibles avec la phase solide du sol.

- ***Composts fermentescibles alimentaires et/ou issus des produits ménagers***

Il s'agit des produits issus du compostage naturel des déchets des décharges urbaines d'Andralanitra et de Mahajanga.

Les deux composts diffèrent nettement entre eux ; le compost urbain venant de Mahajanga présente de teneurs en nutriments de toute sorte plus élevées que celui provenant de la décharge d'Andralanitra. Néanmoins, leurs valeurs amendantes restent modérément faibles, et ne

participent pas au stockage de carbone dans les sols. La minéralisation de N sur le court terme est relativement élevée pour les deux produits ; par contre, avec le temps, N peut se trouver limitant compte tenu de l'immobilisation assez importante de N sur le moyen terme.

Le compost issu de la décharge urbaine a eu un effet assez positif sur les ions-P dissous ($0,007 \text{ mg P L}^{-1}$) après un apport de $25 \text{ g MS kg}^{-1} \text{ sol}$. On dénote une diminution du transfert sol-solution des ions-P diffusibles.

- ***Fumiers***

Les fumiers sont des produits à base de déjections de bovins récupérés sur une litière qui est généralement de la paille de riz et est variable selon la disponibilité en matières premières. Trois types de fumiers d'origine et de mode fabrication différentes ont été testés dans notre étude.

Les teneurs en nutriments des fumiers sont très variables. Le fumier provenant d'un producteur d'Itasy (FumI) est plus riche en nutriments par rapport aux deux autres fumiers ; sa teneur en C ($318,8 \text{ g kg}^{-1}$) est l'une des plus élevées parmi notre gamme de produit. Par conséquent, ce produit a une valeur amendante plus intéressante par rapport aux deux autres, qui permettent néanmoins d'améliorer le stockage en C du sol. L'apport de fumiers améliore à la fois la disponibilité en N à court terme mais aussi à long terme ; par contre, l'immobilisation de l'N modérément élevée, à moyen terme, après l'apport du fumier (FumV2) limite la disponibilité de l'N et nécessite une correction.

L'application du fumier présente un effet significativement positif sur la concentration en ions-P dissous, et est plus remarquable avec le fumier provenant d'Itasy ($0,022 \text{ mg P L}^{-1}$). En revanche, l'action des fumiers sur le transfert sol-solution des ions-P diffusibles diffère : le FumI favorise le nombre de sites de réactions des ions-P tandis que le FumV1 tend à baisser.

- ***Déjections animales sans litières***

Il s'agit de fèces de bovins stockés à l'extérieur et contient de quantité importante de terre récupérée au moment du raclage. Ce produit est appelé communément poudrette de parc.

Par rapport aux fumiers, les valeurs amendante et fertilisante de la poudrette de parc se trouvent inférieures. Cette matière est également appauvrie en d'autres éléments tels que le P, le Ca, le K et Mg.

La poudrette de parc présente très peu d'effet sur la concentration en ions-P dissous ($0,005 \text{ mg P L}^{-1}$), mais une diminution du nombre de sites de réactions des ions-P diffusibles avec la phase solide du sol a été remarquée, qui s'explique par les modifications profondes de propriétés des sols suite aux apports. En d'autres termes, les paramètres (v , w , p) diffèrent significativement de ceux du sol sans apport.

- **Fientes d'animaux**

Les fientes d'animaux sélectionnées parmi notre gamme de produit sont le guano de chauve-souris et la fiente de volailles. Ces produits sont formés généralement par des excréments d'animaux sans mélanges.

Les deux fientes sont très riches en nutriments de toute sorte (N, P, K, Ca, Mg et en S). Les teneurs en N, en K et en Ca de la fiente de volailles sont l'une des plus élevées parmi les matières testées. La fiente de chauve-souris possède des teneurs totales en P et en S supérieures par rapport aux autres matières. Par contre, ces produits se minéralisent rapidement et ne permettent pas de stockage de C dans les sols. La libération de l'N sur le court terme de la fiente de volailles est faible mais s'élève modérément sur le long terme. Pour la fiente de chauve-souris, la disponibilité en N à court terme est élevée, comparable à la corne de zébu, mais jugée faible sur le long terme. Une immobilisation importante de l'N minéral sur le moyen et le long termes a été signalée.

L'apport de la fiente de volailles et de la fiente de chauve-souris modifie significativement à la fois la valeur de C_P avec respectivement, 0,155 et 0,130 mg P L⁻¹, et la dynamique sol-solution des ions-P diffusibles. La prise en compte de ce double effet sur la simulation de Pr a montré que ces produits augmentent considérablement le nombre de sites de réactions des ions-P diffusibles sur la phase solide du sol.

- **Corne de zébu broyée**

La principale caractéristique de la corne de zébu est sa grande teneur en C, en N et en S : c'est la matière qui améliore le plus le stockage en carbone dans le sol et qui libère le plus d'azote aussi bien à court terme qu'à long terme. La présence notable en kératine, le principal composé qui structure la corne, explique cette particularité.

Malgré les quantités aussi importantes en ces éléments, l'apport de la corne de zébu à 25 g MS kg⁻¹ de sol n'affecte que peu la valeur des ions-P dissous (0,005 mg P L⁻¹). Néanmoins, les paramètres (v , w , p) diffèrent significativement du sol sans apport, et les conséquences de la double modification de C_P et les paramètres (v , w , p) a affiché une baisse du nombre de sites de réactions des ions-P diffusibles.

- **Dolomie**

Il s'agit d'un produit de chaulage d'origine naturelle produit à partir de poudre de roche riche en Ca et en Mg.

La dolomie est une matière purement minérale et contient essentiellement du Ca et du Mg. De son origine, elle ne permet ni d'améliorer le stock en carbone ni d'apporter de l'azote dans le

sol. Elle possède donc des valeurs amendante et fertilisante azotée très faibles. Par contre, ce produit est indispensable pour rehausser le pH du sol.

Comme la corne de zébu, la dolomie n'augmente que peu la concentration en ions-P dissous ($0,005 \text{ mg P L}^{-1}$) qui reste non significative par rapport à celle du témoin (sol seul). Par contre, le nombre de sites de réactions des ions-P diffusibles avec la phase solide du sol change et diminue suite à un apport de 25 g MS kg^{-1} .

- **Hyperfos**

Il s'agit d'un produit organo-minéral obtenu à partir du mélange de roche apatitique micronisée et de sol noir volcanique.

L'hyperfos est spécifiquement riche en P et en Ca, mais présente un taux de C et de N très faibles. Ce produit présente une valeur amendante très faible et l'N libéré à court et à long terme provient probablement de l'N du sol.

Malgré un apport de P considérable avec l'Hyperfos ($6000 \text{ kg P ha}^{-1}$), la valeur de C_p ne diffère pas significativement de celle du sol sans apport et les paramètres (v , w , p) ne diffèrent pas non plus significativement de ceux du témoin. L'effet combiné sur ces deux propriétés se traduit par des valeurs de Pr légèrement plus faible sur une durée de 120 jours.

2.3. Les approches *a priori* et *a posteriori* pour une typologie des matières fertilisantes sont-elles complémentaires dans la constitution des assemblages performants ?

Les résultats issus de la première partie nous amènent à proposer des assemblages des matières fertilisantes pour résoudre la co-limitation nutritionnelle de la culture du riz. Dans cette thèse, l'identification des assemblages performants repose sur le concept de l'approche combinatoire qui établit une typologie *a posteriori* des matières fertilisantes. La typologie *a posteriori* des matières se base sur une procédure qui regroupe les matières en groupes fonctionnels en fonction de leurs effets sur une performance des assemblages observée, et pour laquelle l'ajustement aux données observées est maximisé.

Deux expériences ayant le même thème, mais à des échelles expérimentales différentes et à des calibrations de dose d'apport différentes ont été conduites.

- La première expérience a été réalisée en conditions contrôlées sous serre, pour servir de prototype, et pendant laquelle les doses d'apport ont été appliquées à une dose assez élevée. Les matières ont été apportées à même masse individuelle. Quels que soient les assemblages, les matières fertilisantes à base d'amendements organiques ont été apportées à une dose de 6 t MS ha^{-1} et de $500 \text{ kg MS ha}^{-1}$ celles à base d'engrais. La corne de zébu a été considérée en tant qu'amendement organique selon la première impression des agriculteurs. La durée de l'expérience était de 57 jours.

- La deuxième expérience a été conduite en conditions réelles sur le terrain dans le but de s'approcher aux réalités paysannes et pendant laquelle les matières ont été apportées à une dose assez faible. La dose d'apport a été fixée en prenant comme référence les doses paysannes, et a été calibrée sur la même masse totale : 3 t MS ha⁻¹ pour les assemblages à base d'amendements organiques, 500 kg ha⁻¹ pour les assemblages à base d'engrais, 3,5 t MS ha⁻¹ pour les assemblages à base d'amendements organiques et d'engrais. Aussi, une nouvelle matière, qui est le lisier de porc a été incluse parmi les matières testées. Par contre, la corne de zébu n'est pas habituellement utilisée par les agriculteurs, sa dose d'apport a été diminuée selon les doses pour les engrais. L'expérience a été maintenue jusqu'à la production en grains.

Pour la suite de la discussion, les paramètres retenus pour évaluer la performance des assemblages vont s'orienter sur l'indice multicritère final pour l'expérience en serre (Partie III.1) et sur le rendement en grains pour l'expérience au champ (Partie III.2).

Les résultats issus de l'essai en serre sur l'indice multicritère final ont montré que la classification finale des matières fertilisantes s'arrête à cinq groupes (Partie III.1) : le premier groupe 'a' est formé par la {Corne de zébu}, le groupe 'b' est formé par {Fumier provenant d'Itasy, Fiente de chauve-souris, Compost par Madacompost, Taroka, Lombricompost venant de Vakinankaratra}, le groupe 'c' est composé par {Farine de crabe, Hyperfos, Vermicompost par TATA, Compost d'Andralanitra}, le groupe 'd' est composé par {Cendre d'*Eucalyptus*, Fumier venant de Vakinankaratra} et les restes {Cendre de balle de riz, Dolomie, Fiente de volailles, NPK, Poudrette de parc} constituent le dernier groupe 'e'. Cette classification correspond à un coefficient de détermination R^2 de 0,87, et un coefficient d'efficacité E de 0,67.

Le modèle issu de l'essai en conditions au champ propose également une classification des matières à cinq groupes : 'a' = {Fumier provenant d'Itasy, Compost par Madacompost, Poudrette de parc, Lombricompost venant de Vakinankaratra}, 'b' = {Cendre de balle de riz, Fiente de chauve-souris, Lisier de porc, NPK}, 'c' = {Vermicompost par TATA}, 'd' = {Cendre d'*Eucalyptus*, Corne de zébu, Dolomie, Hyperfos}, et 'e' = {Fiente de volailles, Taroka, Compost d'Andralanitra, Farine de crabe}. Les critères statistiques du modèle sont définis par un R^2 de 0,74, un E de 0,53 et un coefficient $E/R^2 = 72\%$. L'écart entre les coefficients de convergence s'explique par le fait que les conditions variables sur terrain auraient affecté le développement du riz et donc les réponses observées.

Par ailleurs, la typologie *a priori* des matières fertilisantes en se basant sur la classification proposée par Lashermes *et al.* (2010) a regroupé les matières en quatre groupes, vis-à-vis de la disponibilité en azote. Dans le premier groupe se trouve la {Corne de zébu} qui se caractérise par une matière avec une très forte minéralisation, le deuxième groupe est défini par la {Fiente de chauve-souris} qui se caractérise par une minéralisation faible à moyenne, en troisième

groupe sont classés les {Cendre d'*Eucalyptus*, Fiente de volailles, Dolomie, Hyperfos} qui se caractérisent par une faible minéralisation et/ou présentent un risque d'immobilisation, et le dernier groupe rassemble les matières restantes qui présentent un risque élevé d'immobilisation de l'azote. Par contre, cette classification ne s'avère pas fiable lorsque celle-ci est confrontée avec la minéralisation potentielle de l'azote.

Par principe, l'approche *a posteriori* range les groupes selon le pouvoir explicatif décroissant de la variance d'un paramètre donné.

Avec l'essai en serre, la matière {Corne de zébu} constitue seule le groupe 'a', et son association avec les autres groupes de matière induit des performances plus intéressantes. Au niveau de l'indice multicritère finale, les meilleurs motifs d'assemblage sont obtenus avec les motifs (abd), (acd) et (abe). D'après ces résultats, la {Corne de zébu} aurait donc assuré la libération diffusive de l'N minéral (Partie II.1) qui restait disponible tout au long de la croissance du riz. Ensuite, la présence de l'une du groupe 'b' {Fumier provenant d'Itasy, Fientes de chauve-souris, Compost par Madacompost, Taroka, Lombricompost venant de Vakinankaratra} et l'une du groupe 'd' {Cendre d'*Eucalyptus*, Fumier venant de Vakinankaratra} aurait comblé les autres carences notamment en P, Ca et Mg (Partie II). L'effet positif de la {Fiente de chauve-souris}, {Taroka} et {Cendre d'*Eucalyptus*} sur la disponibilité en P a été prouvée ; de plus, la {Cendre d'*Eucalyptus*} a la capacité de fournir suffisamment de Ca et de Mg pour la plante. Par rapport au motif (abe), les matières du groupe 'e' se caractérisent principalement par des matières minérales (N, P, K, Ca, Mg) capables de fournir aux plantes de nutriments d'une manière immédiate. Par ailleurs, la classification se basant sur l'indice multicritère des propriétés des sols démontre que les assemblages incluant les matières à bases de fumiers {Fumier provenant d'Itasy, Fumier provenant de Vakinankaratra, Poudrette de parc, Taroka} induisent des performances plus élevées. Ces résultats révèlent les rôles majeurs des substrats organiques dans l'amélioration des propriétés chimiques et biologiques du sol, et particulièrement des Ferralsols.

Avec l'essai en conditions réelles sur terrain, une analyse complémentaire des effets induits (positifs, négatifs ou neutres) des matières fertilisantes en assemblage a été étudiée. Ceci nous a permis de voir que les motifs d'assemblages les plus performants résultent de la combinaison des groupes qui produisent des effets positifs en assemblages. A titre indicatif, l'ajout des matières du groupe 'a' {Fumier provenant d'Itasy, Compost par Madacompost, Poudrette de parc, Lombricompost provenant de Vakinankaratra}, du groupe 'b' {Cendre de balle de riz, Fiente de chauve-souris, Lisier de porc, NPK} et du groupe 'c' {Lombricompost par TATA} dans un assemblage renforce la production en grains. Parmi les motifs d'assemblages observés, les meilleurs motifs sont obtenus avec (bc), (bcd) et (bce). Sur la base des caractéristiques inhérentes des matières fertilisantes, les meilleurs motifs confirment la nécessité d'inclure dans un assemblage, des matières riches en composés organiques, d'une part, et des matières qui

apportent des éléments nutritifs facilement disponibles, d'autre part. En revanche, les matières appartenant au groupe 'd' présentent des effets négatifs sur le rendement, i.e. l'intégration de ce groupe de matières dans un assemblage tend à diminuer le rendement. Il apparaît aussi de nos résultats que la {Corne de zébu} qui était une matière particulièrement intéressante avec l'étude en serre appartient au groupe 'd' avec l'essai sur terrain. Deux hypothèses ont été avancées pour expliquer cet effet contradictoire. Premièrement, la dose d'apport de la corne de zébu a été diminuée avec l'essai en conditions réelles, à seulement 500 kg ha⁻¹ contre 6 t MS ha⁻¹. Deuxièmement, la différence des conditions expérimentales entre les deux études d'assemblage, notamment par rapport à la disponibilité en eau, a affecté la performance de la corne de zébu en assemblage. Nous pouvons tirer de ces deux expériences que le modèle combinatoire offre un modèle générique et le regroupement des matières va changer en fonction de la dose d'apport et des conditions climatiques.

Un des principaux apports de ce travail de thèse a permis de définir que, dans le contexte des Hautes Terres de Madagascar, les assemblages des matières fertilisantes dépendent de la performance individuelle des matières qui constituent un assemblage. L'effet de composition, qui correspond à une prédiction selon laquelle l'effet d'un assemblage est équivalent à la somme des effets des matières qui composent cet assemblage, a été remarquablement expliqué et prédit par le modèle (Partie III.2). Ces résultats paraissent en adéquation avec les carences multiples des Ferralsols (Partie I) et par conséquent, l'amélioration de la fertilité des sols pour une productivité améliorée nécessite, en assemblages, la présence de toutes les matières capables d'apporter les éléments nécessaires pour couvrir les nutriments les plus limitants. Chaque matière présente dans un assemblage devrait combler certaines carences et générer un effet additif sur un paramètre. Même si l'effet d'interaction reste faiblement expliqué et prédit par le modèle, les analyses statistiques ont montré que les interactions qui existaient entre les matières produisent en moyenne des effets positifs (synergisme et complémentarité).

3. Validation des hypothèses

Hypothèse 1. *Les Ferralsols des Hautes Terres de Madagascar présentent des carences nutritionnelles multiples, notamment en P, en N et en cations basiques, mais également en S et en micronutriments.*

Les résultats émanant de la Partie I ont montré que le phosphore constitue le premier facteur limitant la productivité rizicole des Ferralsols. L'azote, le calcium et le magnésium agissent parmi les seconds facteurs limitants, mais leurs disponibilités dans le sol varient en fonction de la pédogénèse. Par contre, dans notre étude, le S se trouve en quantité adéquate dans le sol pour répondre aux besoins de la plante. L'hypothèse 1 est ainsi confirmée.

Hypothèse 2 : Les matières peuvent être classées dans différents groupes selon leurs effets sur le sol et la plante, et les assemblages des groupes expliquent de manière satisfaisante les paramètres mesurés sur la fertilité des sols, la croissance et la nutrition des plantes.

Au vu des résultats, notre étude démontre que l'approche *a posteriori* pour élaborer une typologie à partir des réponses des assemblages peut s'appliquer aux différentes matières fertilisantes comme composants. La modélisation par approche *a posteriori* des matières fertilisantes a donné des critères statistiques fiables, voire très élevés dans certains paramètres (Partie III.1.). En revanche, les critères statistiques du modèle diminuent en conditions expérimentales variables au champ (Partie III.2.). Nous ne pouvons ainsi que partiellement approuver l'hypothèse 3, car les coefficients de détermination et d'efficacité restent faibles, mais acceptables, dans les conditions variables au champ.

Hypothèse 3 : La connaissance *a priori* des caractéristiques intrinsèques des matières constitue un élément informatif essentiel pour expliquer l'appartenance des matières dans des groupes fonctionnels, établis par l'approche *a posteriori*.

L'hypothèse 3 est confirmée à l'issue des résultats des Parties II et III. Néanmoins, les caractéristiques *a priori* des matières ne fournissent pas systématiquement des informations complètes pour expliquer l'appartenance des matières dans un même groupe. Par exemple, quelle que soit la base métrique de calibration, la cendre de balle de riz figure parmi les matières à inclure dans un assemblage pour obtenir une performance élevée, alors que ses caractéristiques initiales indiquent qu'elle n'apporte ni des éléments nutritifs ni du carbone pour le sol. Ceci est expliqué par l'existence d'une interaction entre les matières, ce qui n'est pas facilement reliable à leurs qualités intrinsèques.

4. Assemblages des matières fertilisante, une pratique innovante de fertilisation vers l'intensification écologique : les avantages du modèle combinatoire

La mise en culture des Hautes Terres de Madagascar est contrainte par la multiple carence des sols (Partie I), ce qui requiert un mode de fertilisation adéquate qui s'adapte au contexte des agriculteurs. L'assemblage des matières fertilisantes est considéré comme étant le moyen le plus efficace pour améliorer la fertilité de ces sols. La démarche que nous proposons, dans cette étude, consiste à combiner deux approches conceptuellement différentes mais complémentaires : l'approche *a priori* et l'approche *a posteriori* (Partie II et Partie III). D'un côté, le modèle de classification des matières et d'identification des assemblages performants a été construit à partir d'une approche *a posteriori*. De l'autre côté, les caractéristiques *a priori* des matières nous a servi un élément explicatif des appartenances des matières dans des groupes. L'intérêt de l'approche *a posteriori* se réside surtout sur sa capacité à prendre en compte des interactions réelles qui peuvent exister entre les matières dans un assemblage.

Les assemblages performants sont identifiés par rapport à la position des motifs d'assemblages issus du modèle combinatoire. Pour rappel, un motif d'assemblage est une combinaison de groupes de matières, et les matières qui appartiennent dans un même groupe fonctionnent de manière identique et expriment les mêmes performances lorsqu'ils sont assemblés avec les autres groupes de matières. L'approche *a posteriori* ressort les motifs d'assemblages testés selon leur performance par ordre décroissant. Ainsi, les retombées agronomiques de notre étude résident en premier lieu sur la marge d'intensification écologique possible par rapport à la pratique habituelle. En identifiant la pratique d'assemblages habituelle des agriculteurs, ils peuvent décrire le motif d'assemblage correspondant et se positionner au classement des motifs d'assemblage testés. Les motifs qui se trouvent au-dessus du motif habituel constituent un pas vers l'intensification écologique (Partie III.1, Partie III.2). Une illustration similaire au classement des motifs d'assemblage qui figure parmi les sorties du modèle est l'identification des effets des groupes des matières (motifs d'assemblages) lorsqu'elles entrent en assemblages (Partie III.2). Grâce à cette sortie, la conception des assemblages peut être optimisée pour éviter les relations de compétition entre les matières constitutives. Les motifs d'assemblages qui présentent des effets positifs sont les matières à privilégier dans un assemblage. Les matières à effets négatifs et neutres peuvent être exclues; par contre, le paramètre de mesure de la performance des assemblages doit être bien défini.

Par ailleurs, dans plusieurs cas, un panel de choix existe dans un groupe de matières qui constitue un motif d'assemblages. Les agriculteurs peuvent à leur tour choisir les assemblages de matières en fonction de leurs connaissances empiriques, des disponibilités des matières et de leurs coûts. Ils peuvent composer des assemblages appartenant à des motifs plus performants en tenant compte de ces contraintes agronomiques et socio-économiques.

Notre travail suggère ainsi un nouveau cadre de fertilisation des sols et intègre dans son processus des connaissances scientifiques fiables et des retombées agronomiques transférables aisément auprès des agriculteurs. A l'issue de ce travail, nous pouvons affirmer que la combinaison des deux approches *a priori* et *a posteriori* a une significativité statistique, écologique et agronomique. D'un côté, la constitution des groupes des matières a été construite à partir des critères statistiques rigoureuses et tient compte des interactions qui se produisent réellement entre les matières. De l'autre côté, les appréciations des agriculteurs ont été considérées dès la mise en place du protocole, notamment sur la dose, et les résultats issus du modèle combinatoire offre une possibilité de choix d'assemblages performants par rapport auxquels les agriculteurs peuvent tenir compte de leurs contraintes spécifiques (économiques, sociales, facilité de manipulation, ...).

Pour tenter de synthétiser les résultats issus de cette étude, la Figure 32 a été construite.

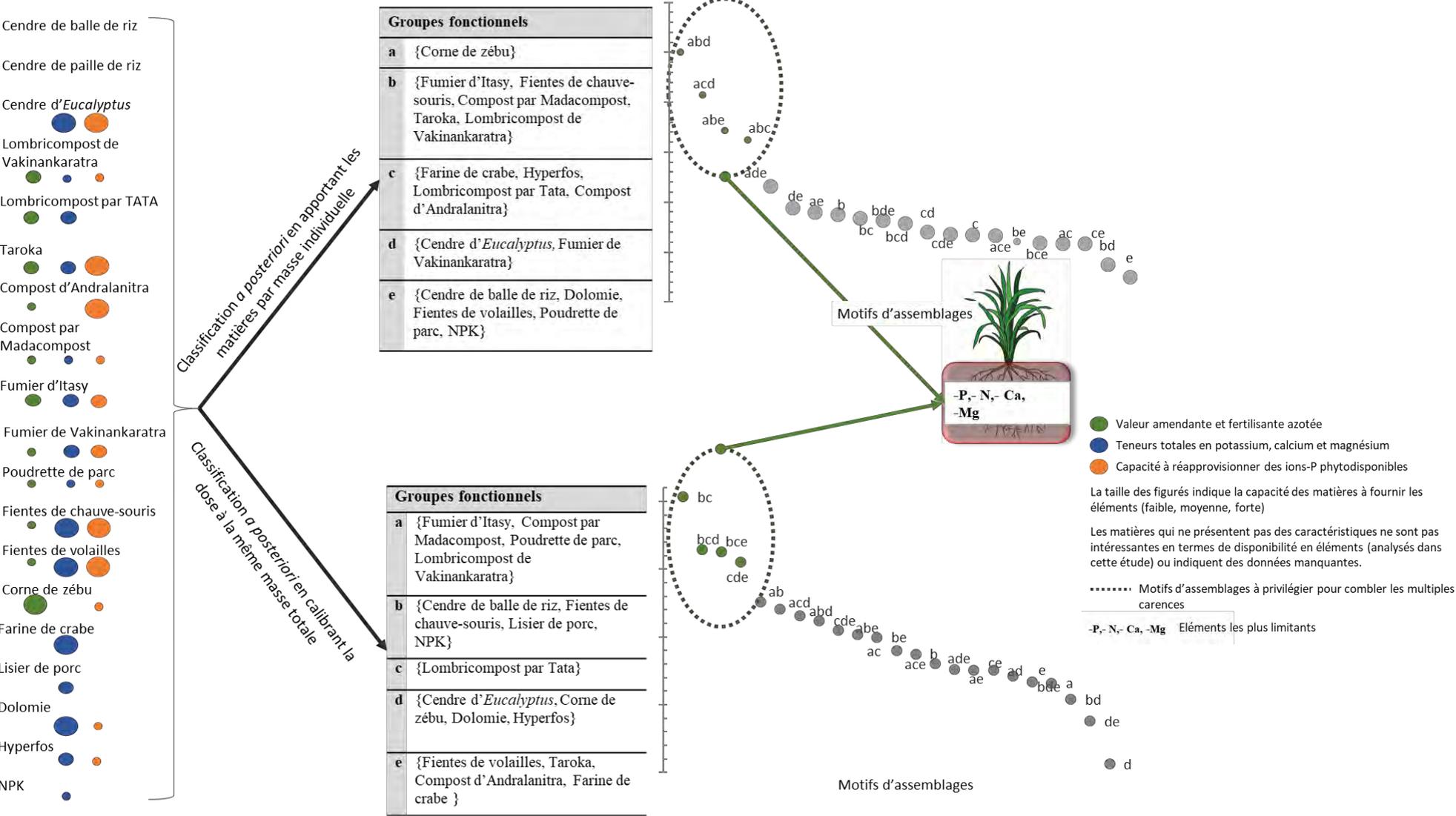


Figure 32: Schéma synthétique d'une typologie a posteriori des matières fertilisantes, disponibles sur les Hautes Terres de Madagascar, à l'aide du modèle combinatoire et en se basant sur deux méthodes de calibration de la dose d'apport.

5. Limites et perspectives

L'approche théorique développée dans cette thèse a des perspectives nombreuses et diversifiées, à la fois théoriques, expérimentales et appliquées. Les résultats ont démontré l'intérêt de poursuivre les quelques pistes de recherche proposées ci-après pour compléter nos connaissances sur la constitution des assemblages performants. Cette étude présente aussi un certain nombre de limites permettant de proposer des perspectives à ce travail.

5.1. Carences nutritives de la population microbienne des Ferralsols des Hautes Terres de Madagascar

La capacité des matières fertilisantes à fournir au sol et à la plante du carbone et des nutriments disponibles ne repose pas uniquement sur les caractéristiques intrinsèques des matières. Parmi les facteurs de contrôle, l'activité des microorganismes hétérotrophes des sols s'élève au premier rang. Cette dernière semble être fortement limitée par le C et le P, mais ce consensus est remis en cause dans la littérature et d'autres éléments (Ca, Mg) pourraient jouer des rôles importants (Camenzind *et al.*, 2018 ; Mori *et al.*, 2018). Il apparaît important de bien définir cette carence nutritive microbienne car celle-ci pilote la mise en disponibilité des nutriments pour la plante cultivée et est impliquée dans l'installation de nombreuses interactions bénéfiques. D'autres essais dont l'objectif consisterait à identifier les carences nutritionnelles des microorganismes des Ferralsols des Hautes Terres à l'aide d'une approche soustractive, seraient intéressantes. De plus, cette étude permettrait de découvrir dans quelle mesure l'absence d'un élément altère le réseau trophique. L'hypothèse qui mériterait d'être testée est que les processus microbiens du sol seraient co-limités, en plus du C, par des nutriments qui sont particulièrement les plus limitants pour les plantes. Les résultats pourraient être mis en parallèle avec ceux de l'essai soustractif sur la plante (Partie I) pour comparer les carences nutritives des microorganismes de celles de la plante cultivée.

5.2. Réponses de différentes variétés de riz aux assemblages complexes

L'intensification agroécologique peut être classée en trois catégories en fonction des mécanismes qu'elle mobilise et de la profondeur des changements requis : augmentation de l'efficacité, substitution des intrants externes et refonte des systèmes (*redesign*) (Wezel *et al.*, 2014). Parmi ses techniques, l'augmentation de l'efficacité peut se référer à travers l'adoption des variétés à forte efficacité en valorisant mieux les nutriments présents dans le sol et en stimulant les interactions avec les organismes mutualistes. Nombreuses études ont déjà montré que les réponses du riz vis-à-vis de l'absorption en nutriments diffèrent significativement d'un cultivar à un autre, indiquant l'importance du choix des variétés dans la stratégie de fertilisation. Dans le contexte des Hautes Terres de Madagascar, des études récentes ont également souligné que les actions des organismes mutualistes, notamment des nématodes et des vers de terre, (Ranoarisoa *et al.*, 2018; Ratsiatosika, 2018) diffèrent en fonction de la variété de riz pluviale

testées. Les résultats ont été surprenants puisque, parmi les variétés étudiées, le cultivar W880 agit négativement sur l'attractivité des nématodes au niveau de la rhizosphère et répond très mal à la présence des vers de terre. Dans ce sens, une expérience sur les réponses de différentes variétés de riz aux assemblages complexes serait utile dans le but d'évaluer la performance de différentes variétés de riz pluvial sous un régime de fertilisation innovante différent. Par rapport aux résultats obtenus, une telle étude permettrait de considérer et d'intégrer parmi les critères la performance à la fois agronomique et écologique lors d'une sélection variétale.

5.3. Prédiction de la phytodisponibilité de P induite par les matières : C_P et des paramètres (v , w et p)

Pour l'identification des déterminants bio-physico-chimiques des matières fertilisantes sur la valeur de C_P et les paramètres (v , w et p), nous n'avons pas pu trouver des relations significatives pour expliquer la variabilité des paramètres v et p . Ceci pourrait s'expliquer par la faible quantité des matières ajoutées qui était de 25 g MS g^{-1} de sol et ce sont les propriétés des sols et non des matières qui auraient expliqué le mieux la variabilité des paramètres. Aussi, après 7 mois de stabilisation, la matière ajoutée s'est dégradée et beaucoup transformée, et par conséquent, les déterminants des paramètres sur la phytodisponibilité n'étaient plus prédictibles à partir des qualités initiales des matières. Il nous manquait également la solubilité du P des matières qui est de toute évidence un déterminant de C_P . La correction de la prédiction en tenant compte de ces points, et peut être en adoptant d'autres méthodes statistiques (random forest, glm) pourraient améliorer l'identification des déterminants sur la phytodisponibilité du P induite par les matières.

5.4. Construction d'une typologie *a posteriori* en variant la calibration de la dose d'apport

Le modèle combinatoire a été conçu dans la compréhension de la relation entre la biodiversité et le fonctionnement d'un écosystème. Puis, l'approche a été transférée dans notre étude en considérant les matières fertilisantes comme composants. Pour tenir compte de l'applicabilité des résultats, l'aspect agronomique de la méthodologie en soi a été gardée, particulièrement au niveau de la dose. Déjà, la dose d'apport devrait varier en fonction de la classe des matières, qui peut être soit un amendement organique (AO) soit un engrais (EN). Ensuite, la calibration de la dose d'apport (en masse équivalente) peut aussi varier en fonction de l'objectif.

La calibration de la dose des deux études sur l'approche combinatoire était différente.

Pour l'essai contrôlé en serre, la masse individuelle des matières a été gardée quels que soient les assemblages, en considérant que la dose attribuée est un caractère en soi de la matière. Les doses apportées se sont basées sur des connaissances *a priori* selon lesquelles les AO ont été apportés à 6 t MS ha^{-1} et les EN à $500 \text{ kg MS ha}^{-1}$. Dans ce cas, certains assemblages ont eu des

apports beaucoup plus conséquents que d'autres. Les assemblages de trois matières à base d'AO ont reçu une masse équivalente une dose équivalente à 18 t MS ha⁻¹ (6 t MS ha⁻¹ × 3), si dans les autres pots, on ne retrouve qu'environ 7 t MS ha⁻¹ (6 t MS ha⁻¹ + (500 kg MS ha⁻¹ × 2)).

Pour l'essai au champ, la dose d'apport a été fixée en prenant comme référence les doses paysannes, et a été calibrée sur la même masse totale : 3 t MS ha⁻¹ pour les assemblages à base d'AO, 500 kg ha⁻¹ pour les assemblages à base d'EN, 3,5 t MS ha⁻¹ pour les assemblages à base d'AO + EN. Comme la teneur en nutriments (C, N, P, K, Ca, Mg, S) varie considérablement entre les matières, les situations entre les matières fertilisantes en assemblage et apportées seules, varient aussi beaucoup. Par exemple, si (i) l'assemblage est défini par {Fumier}+{Lombricompost}+{Compost}, le {Fumier} a été apporté à une dose 1 t MS ha⁻¹, (ii) l'assemblage est défini par {Fumier}+{Cendre}+{Fiente}, le {Fumier} a été apporté à une dose 3 t MS ha⁻¹, (iii) l'assemblage est défini par {Fumier}+{Lombricompost}+{Cendre}, le {Fumier} a été apporté à une dose de 1,5 t MS ha⁻¹.

Ainsi, la méthode de calibration de la dose d'apport est le verrou méthodologique qui subsiste et peut constituer la limite principale de notre étude. Par contre, l'approche *a posteriori* permet de savoir dans quelle mesure les quantités en nutriments apportées ainsi que les méthodes de calibration de la dose expliquent la classification des matières. Apparemment, les groupements des matières vont changer en fonction des quantités des matières apportées. Le modèle obtenu est donc un modèle générique en fonction des critères de base retenus. Une prochaine étape à ce travail pourrait être un essai sur des assemblages avec un panel de matières moins nombreux mais avec des doses variables. On pourrait également envisager de proposer un modèle en calibrant la dose d'apport par rapport aux teneurs totales en nutriments (C, N, P,...) contenus dans un assemblage. Pour exploiter la généricité du modèle, il est aussi intéressant de dresser une classification des matières à partir des paramètres (performances) qui possèdent une corrélation.

5.5. Effets à long terme des assemblages des matières

Parmi les sorties du modèle, l'approche *a posteriori* de typologie des matières renseigne les effets (positifs, négatifs ou neutres) des motifs d'assemblage lorsqu'ils sont en assemblages. Les motifs d'assemblages représentés par des matières qui présentent des effets positifs semblent les motifs les plus intéressantes et sont les matières à privilégier dans un assemblage. Au contraire, les matières à effets négatifs sont à exclure dans un assemblage puisqu'elles tendent à baisser la performance d'un assemblage. La cendre d'*Eucalyptus*, la corne de zébu broyée, la dolomie et la roche phosphatée ont présentés des effets négatifs en assemblages (Tableau 21, Figure 31 - Partie III.2).

Compte tenu du pas de temps considéré dans cette étude, nos interprétations se sont limitées à l'analyse des effets des assemblages sur la fertilité du sol à l'échelle de l'année culturale. La

classification qui résulte de notre essai est donc intéressante pour rapidement produire, ce qui est en adéquation avec l'urgence de production de l'agriculture familiale vivrière, mais ne permet pas de fournir un cadre générique sur des temps moyens ou longs. D'autres matières comme la corne de zébu, la dolomie et la roche phosphatée nécessitent des années de culture relativement longues pour que leurs effets puissent s'exprimer. Il serait intéressant d'étendre la durée de l'expérience pendant plusieurs cycles cultureux afin de déterminer les effets potentiels des matières.

5.6. Effets contaminants ou polluants des assemblages des matières

La question environnementale concernant l'utilisation des matières fertilisantes a pris de l'ampleur dans les sujets qui traitent la valorisation des produits surtout organiques. Parmi les risques, on peut citer les émissions des gaz à effet de serre et l'accumulation des éléments traces métalliques dans le sol. Les matières fertilisantes issus des déchets urbains sont les plus discutées. Il serait intéressant de prendre en compte ces aspects et d'étudier les performances des assemblages par rapport à ces paramètres. Cela donnerait également d'avoir des réponses si l'interaction entre les paramètres permettent de réduire la contamination des plantes et accélérer l'élimination des sols de ces polluants.

5.7. Relation entre les caractéristiques des matières fertilisantes et les groupes de matières formés

Cette étude a mis en évidence que la performance des assemblages est principalement sous l'effet de composition, c'est-à-dire que les réponses des assemblages dépendent grandement de la performance des matières qui les composent. Comme les matières sélectionnées ont été caractérisées avant l'expérience, les quantités des nutriments apportées dans chaque assemblage sont connues. Une étude qui pourrait être réalisée consiste à faire une analyse statistique sur la relation entre les qualités intrinsèques des matières et les réponses des assemblages. Trois pistes sont proposées : (i) un modèle lm avec comme variable réponse les 'groupes' et comme variables explicatives 'les caractéristiques des matières', (ii) une random forest avec comme variable réponse les 'groupes' et les 'caractéristiques des matières' comme variables explicatives, (iii) une régression avec la variable réponse 'la performance des assemblage' (le rendement par exemple), et les variables explicatives 'les quantités totales apportées dans les mélanges'. Plus précisément, pour les deux premières, l'idée est de tester un modèle pour voir quelles caractéristiques des matières expliquent la variable 'groupe'. La dernière permet de voir si finalement la fonction observée est directement prédictible par la quantité totale en nutriments apportée dans le mélange étant donné le fort effet de composition.

5.8. Approche exploratoire de l'analyse combinatoire sur les matières fertilisantes

Ce travail de thèse est une première contribution à la typologie des matières fertilisantes par approche *a posteriori* adaptée au contexte des Hautes Terres de Madagascar. Nous considérons de ce fait que les résultats issus de cette recherche fournissent en premier lieu des informations théoriques, nécessaires et précises, sur la constitution des groupes des matières fertilisantes et sur l'identification des assemblages performants, à travers le modèle combinatoire. En ce sens, il s'agit plutôt d'une approche exploratoire, car peu de documentation existe sur ce sujet, et a d'abord pour but de se familiariser et d'apporter une compréhension d'ordre général avec le modèle, en utilisant les matières fertilisantes comme composants. Ce référentiel constitue un prototype et aide par la suite à ajuster et à définir un protocole expérimental, en fonction de l'objectif de l'utilisateur du modèle, afin de vérifier, de valider ou d'approfondir les résultats obtenus.

Ainsi, selon la finalité des études ultérieures, nous proposons les points suivants qui devraient être définis au préalable :

- Le nombre d'assemblages testés.
- L'intégration des effets des matières seules parmi les assemblages testés pour voir si la performance des assemblages est liée à un effet d'interaction ou de composition. Par contre, cette étape n'est pas obligatoire.
- La connaissance des qualités initiales des matières afin d'identifier si les matières appartenant au même groupe possèdent des caractéristiques communes et voir si les caractéristiques des matières régissent la performance des assemblages.
- Le moyen de calibration de la dose d'apport.

Malgré ses limites, cette approche ouvre d'autres perspectives et constitue une avancée méthodologique intéressante pour proposer des assemblages performants à partir d'une typologie *a posteriori* des matières fertilisantes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

- Abbott, L.K., Macdonald, L.M., Wong, M.T.F., Webb, M.J., Jenkins, S.N., Farrell, M.,** 2018. Potential roles of biological amendments for profitable grain production – A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 256, 34–50.
- Abiven, S., Menasseri, S., Chenu, C.,** 2008. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis, *Soil Biol. Biochem.* 41, 1–12.
- Acton, C.J., Rennie, D.A., Paul, E.A.,** 1962, The relationship of polysaccharides to soil aggregation. *Can. J. Soil Sci.*, 43, 201-209.
- AFNOR,** 2011. Guide d'interprétation pour les méthodes de caractérisation de la matière organique des amendements organiques (XP U 44-162 et XP U 44-163). GA U 44-168 France, AFNOR: 20.
- Agegehu, G., Bird, M.I., Nelson, P.N., Bass, A.M.,** 2015. The ameliorating effects of biochar and compost on soil quality and plant growth on a Ferralsol. *Soil Res.* 53, 1-12.
- Akpan, S.B., Udoh, E.J., Nkanta, V.S.,** 2012. Factors influencing fertilizer use intensity among smallholder crop farmers in Abak agricultural zone in Akwa Ibom State, Nigeria. *J Biol Agric Healthc* 2:54–65.
- Altieri, M.A.,** 2002. Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 93, 1–24.
- Altieri, M.A.,** 1995. *Agroecology: the Science of Sustainable Agriculture*. Westview Press, Boulder, CO, 433 pp.
- Andriamananjara, A.,** 2011. Système de culture à rotation voandzou-riz pluvial (*Oryza Sativa*) sur les hautes terres de Madagascar. Rôle du voandzou (*Vigna Subterranea*) sur la biodisponibilité du phosphore dans les Ferralsols. Thèse de doctorat en sciences agronomiques, Université d'Antananarivo. 176p
- Andriamananjara, A., Rakotoson, T., Razafimbelo, T., Rabeharisoa, L., Razafimanantsoa, M.-P., Masse, D.,** 2019. Farmyard manure improves phosphorus use efficiency in weathered P deficient soil. *Nutr Cycl Agroecosyst*.
- Andriamananjara, A., Rakotoson, T., Razanakoto, O.R., Razafimanantsoa, M.-P., Rabeharisoa, L., Smolders, E.,** 2018. Farmyard manure application in weathered upland soils of Madagascar sharply increase phosphate fertilizer use efficiency for upland rice. *Field Crops Research* 222, 94–100.
- Annabi, M., Houot, S., Francou, C., Poitrenaud, M., Le Bissonnais, Y.,** 2007. Soil Aggregate Stability Improvement with Urban Composts of Different Maturities. *Soil Science Society of America Journal* 71: 413-423.
- Antelo, J., Avena, M., Fiol, S., Lopez, R., Arce, F.,** 2005. Effects of pH and ionic strength on the adsorption of phosphate and arsenate at the goethite-water interface. *J. Colloid Interface Sci.* 285, 476-486
- Arancon, N.Q., Edwards, C.A., Bierman, P., Welch, C., Metzger, J.D.,** 2004. Influences of vermicomposts on field strawberries: 1. Effects on growth and yields. *Bioresource Technology* 93, 145–153.
- Augusto, L., Bakker, M.R., Meredieu, C.,** 2008. Wood ash applications to temperate forest ecosystems—potential benefits and drawbacks. *Plant Soil* 306, 181–198.

B

- Bais, H.P., Weir, T.L., Perry, L.G., Gilroy, S., Vivanco, J.M.,** 2006. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annu. Rev. Plant Biol.* 57, 233–266.
- Balamurugan, P., Balasubramanian, V.,** 2017. Challenges and opportunities for increasing rice production in Sub Saharan Africa. *J. Inno. Agri.* 4 (2) :1-10.
- 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
- Barber, S.A.,** 1995. Soil nutrient bioavailability. John Wiley. New York. 414p.
- Barber, S.A.,** 1984. Soil nutrient availability. A mechanistic approach. Wiley, New-York.
- Barrios, E., Shepherd, K., Sinclair, F.,** 2015. Soil health and agricultural sustainability. *Agroecology for food security and nutrition*, 104.
- Barrow, N.J.,** 2017. The effects of pH on phosphate uptake from the soil. *Plant Soil* 410, 401-410.
- Barrow, N.J.,** 2008. The description of sorption curves. *European Journal of Soil Science* 59, 900–910.
- Barrow, N.J.,** 1979. The description of desorption of phosphate from soil. *J. Soil Sci.* 30, 259–270
- Bationo A., Hartemink, A.E., Lungo, O., Naimi, M., Okoth, P., Smaling, E.M.A., Thiombiano, L.,** 2006. African soils: their productivity and profitability of fertilizer use: background paper for the African Fertilizer Summit 9-13th June 2006, Abuja, Nigeria. IFDC.
- Bastida, F., Kandeler, E., Hernandez, T., Garcia, C.,** 2008. Long term effect on municipal solid waste amendment on microbial abundance and humus-associated enzyme activities under semi-arid conditions. *Microbial Ecol.* 55: 651-661.
- Becquer, A., Trap, J., Irshad, U., Ali, M.A., Claude, P.,** 2014. From soil to plant, the journey of P through trophic relationships and ectomycorrhizal association. *Front. Plant Sci.* 5.
- Bekunda, M., Sanginga, N., Woome, P.L.,** 2010. Restoring Soil Fertility in Sub-Sahara Africa, in: *Advances in Agronomy*. Elsevier, pp. 183–236.
- Berg, A.S., Joern, B.C.,** 2006. Sorption dynamics of organic and inorganic phosphorus compounds in soil. *Journal of Environmental Quality*, 35, 1855–1862.
- Blanchart E., Trap J.,** 2020. Intensifier les fonctions écologiques du sol pour fournir durablement des services écosystémiques en agriculture. *Etude et Gestion des Sols*, 27: 121-134.
- Blanchart, E., Ratsiatosika, O., Raveloson, H., Razafimbelo, T., Razafindrakoto, M., Sester, M., Becquer, T., Bernard, L., Trap, J.,** 2020. Nitrogen supply reduces the earthworm-silicon control on rice blast disease in a Ferralsol. *Applied Soil Ecology* 145, 103341.
- Bot, A.,** 2005. The importance of soil organic matter: key to drought-resistant soil and sustained food production, FAO, Rome.
- Boyer, J.,** 1982. Facteurs de fertilité et utilisation des sols, Les sols ferrallitiques. ORSTOM, Paris.
- Breumier, P., Ramarosandratana, A., Ramanantsoanirina, A., vom Brocke, K., Marquié, C., Dabat, M.H., Raboin, L.M.,** 2018. Évaluation participative des impacts de la recherche sur le riz pluvial d'altitude à Madagascar de 1980 à 2015. *Cahiers Agricultures* 27 (1): 1-9.
- Brussaard, L.,** 1997. Biodiversity and Ecosystem Functioning in Soil 9.
- Brussaard, L., de Ruiter, P.C., Brown, G.G.,** 2007. Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 121: 233–244.

- Buehler, S., Oberson, A., Rao, I. M., Friesen, D. K., Frossard, E., 2002.** Sequential phosphorus extraction of a ³³P-labeled Oxisol under contrasting agricultural systems. *Soil Science Society of America Journal* 66:868–877.
- Buresh, R.J., Smithson, P.C., Helium, D.T., 1997.** Building soil phosphorus capital in Africa, in: Buresh, R.J., Sanchez, P.A., Calhoun, F. (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa*. SSSA, Madison, WI, pp. 111–149.
- Burger, M., Jackson, L.E., 2003.** Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems. *Soil Biol Biochem* 35:29–36.

C

- 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.
- Cai, A., Xu, M., Wang, B., Zhang, W., Liang, G., Hou, E., Luo, Y., 2019.** Manure acts as a better fertilizer for increasing crop yields than synthetic fertilizer does by improving soil fertility. *Soil and Tillage Research* 189, 168–175.
- Camenzind, T., Hättenschwiler, S., Treseder, K.K., Lehmann, A., Rillig, M.C., 2018.** Nutrient limitation of soil microbial processes in tropical forests. *Ecological Monographs* 88, 4–21.
- Chang, E.H., Chung, R.S., Tsai, Y.H., 2007.** Effect of different application rates of organic fertilizer on soil enzyme activity and microbial population. *Soil Sci Plant Nutr* 53:132–140
- Chapuis-Lardy, L., Ramiandrisoa, R.S., Randriamanantsoa, L., Morel, C., Rabeharisoa, L., Blanchart, E., 2009.** Modification of P availability by endogeic earthworms (Glossoscolecidae) in Ferralsols of the Malagasy Highlands. *Biol Fertil Soils* 45, 415–422.
- Chardon, W.J., Blaauw, D., 1998.** Kinetic Freundlich equation applied to soils with high residual phosphorus content. *Soil Sci.* 169, 30-35.
- Chaubey, C.N., Senadhira, D., Gregorio, G B., 1994.** Genetic analysis of tolerance for phosphorus deficiency in rice (*Oryza sativa* L.). *Theoret. Appl. Genetics* 89: 313-17.
- Chaudhary, D.R., Bhandari, S.C., Shukla, L.M., 2004.** Role of vermicompost in sustainable agriculture - A review 12.
- Chivenge, P., Vanlauwe, B., Six, J., 2011.** Does the combined application of organic and mineral nutrient sources influence maize productivity? A meta-analysis. *Plant Soil* 342, 1–30.
- Cobo, J., Dercon G., Cadisch G., 2010.** Nutrient balances in African land use systems across different spatial scales: a review of approaches, challenges and progress. *Agriculture, ecosystems and environment*, 136(1): 1–15.
- Constantinides, M., Fownes, J.H., 1994.** Nitrogen mineralization from leaves and litter of tropical plants: Relationship to nitrogen, lignin and soluble polyphenol concentrations. *Soil Biology and Biochemistry* 26, 49–55
- CPCS, 1974.** Classification des sols, 1976th ed. Association Française pour l'Etude du Sol-www.afes.fr, 2011. 96p

D

- Dabat, M. H., Jenn-Treyer, O., Razafimandimby, S., Bockel, L., 2008.** L'histoire inachevée de la régulation du marché du riz à Madagascar. *Économie rurale* 303-304 305: 75 89.

- Darch, T., Blackwell, M.S.A., Hawkins, J.M.B., Haygarth, P. M., Chadwick, D.**, 2014. A meta-analysis of organic and inorganic phosphorus in organic fertilizers, soils, and water: Implications for water quality. *Environmental science and technology*, 44, 2172–2202.
- Deckers, J.**, 1993. Soil fertility and environmental problems in different ecological zones of the developing countries in Sub-Saharan Africa, in: van Reuler, H., Prins, R.W. (Eds.), *The role of plant nutrients for sustainable food crop production in sub-Saharan Africa*. The Netherlands, Vereniging van Kunstmest Producenten, pp. 37–52.
- Delhaize, E., Ryan, P.R.**, 1995. Aluminum Toxicity and Tolerance in Plants. *Plant Physiol* 107, 315–321.
- Della, V.P., Kühn, I., Hotza, D.**, 2002. Rice husk ash as an alternate source for active silica production. *Materials Letters* 57, 818–821.
- Derenne, S., Largeau, C.**, 2001. A review of some important families of refractory macromolecules: composition, origin and fate in soils and sediments. *Soil Science* 166: 833-847.
- Diacono, M., Montemurro, F.**, 2010. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 401–422.
- Dinesh, R., Srinivasan, V., Hamza, S., Manjusha, A.**, 2010. Short-term incorporation of organic manures and biofertilizers influences biochemical and microbial characteristics of soils under an annual crop [Turmeric (*Curcuma longa L.*)]. *Bioresource Technology* 101, 4697–4702.
- Dorado, J., Zancada, M.C., Almendros, G., López-Fando, C.**, 2003. Changes in soil properties and humic substances after long-term amendments with manure and crop residues in dryland farming system, *J. Plant Nutr. Soil Sc.* 166, 31–38.
- Dubus, I.G., Becquer, T.**, 2001. Phosphorus sorption and desorption in oxide rich Ferralsols of New Caledonia. *Aust. J. Soil Res.* 39, 403–414
- Duchaufour, P.**, 1965. *Précis de pédologie.*, Masson, 2ème éditions. 476p.
- Duxbury, J.M., Smith, M.S., Doran, J.W., Jordan, C., Szott, L., Vance, E.**, 1989. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients, in: Coleman, D.C., Oades, J.M., Uehara, G. (Eds.), *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*. University of Hawaii Press, Honolulu, pp. 33–67.
- E**
- Edmeades, D.C.**, 2003. The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: A review. *Nut. Cycl. Agroecosyst.* 66, 165–180.
- Eduah, J.O., Nartey, E.K., Abekoe, M.K., Breuning-Madsen, H., Andersen, M.N.**, 2019. Phosphorus retention and availability in three contrasting soils amended with rice husk and corn cob biochar at varying pyrolysis temperatures. *Geoderma* 341, 10–17.
- Eghball B., Ginting D., Gilley J.E.**, 2004. Residual effects of manure and compost applications on corn production and soil properties. *Agron. J.* 96, 442–447.
- F**
- Fageria, N.K., Moreira, A.**, 2011. The role of mineral nutrition on root growth of crop plants, in: *Advances in Agronomy*. Elsevier, pp. 251–331.
- Fageria, N.K., Baligar, V.C.**, 2008. Chapter 7 Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production, in: *Advances in Agronomy*. Elsevier, pp. 345–399.

- Fageria, N. K., Baligar V. C.,** 1997. Response of common bean, upland rice, corn, wheat, and soybean to soil fertility of an Oxisol. *Journal of Plant Nutrition* 20: 1279-1289.
- Fageria, N.K., Morais, O. P., Baligar, V. C., Wright, R.J.,** 1988. Response of rice cultivars to phosphorus supply on an Oxisol. *Fertilizer Research* 16: 195-206.
- Falinirina, M. V,** 2010. Valorisation agricole des apports organiques contenus dans les déchets urbains : Qualité des matières organiques et service écosystémique. Thèse de doctorat en sciences agronomiques. Université d'Antananarivo. 192 p.
- FAO,** 2019. The international Code of Conduct for the sustainable use and management of fertilizers. FAO.
- FAO,** 2015. L'Agroécologie pour la sécurité alimentaire et la nutrition. Compte-rendu du Symposium international de la FAO. 18-19 septembre 2014, Rome, Italie 114.
- FAO,** 2014. World reference base for soil resources 2014: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. FAO, Rome.
- FAO, PAM,** 2017. Rapport Spécial: Mission FAO/PAM d'Évaluation des récoltes et de la sécurité alimentaire à Madagascar 78.
- FAO, ITPS,** 2015. État des ressources en sols du monde - Résumé technique 92.
- FAOSTAT** database, 2018. Available at <http://faostat.fao.org/>.
- Fardeau, J.C.,** 1996. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. *Fert. Res.* 45:91-00.
- Fardeau, J.C.,** 1993. Le phosphore assimilable des sols: sa représentation par un modèle fonctionnel à plusieurs compartiments. *Agronomie* 13, 317–331.
- Fardeau, J.C.,** 1993. Le phosphore biodisponible du sol. Un système pluricompartimental à structure mamellaire. *Agronomie* 1 :1-13.
- Fardeau, J.C.,** 1981. Cinétiques de dilution isotopique et phosphore assimilable des sols. Thèse de Doctorat d'Etat. Université Pierre et Marie Curie, Paris 6.
- Fardeau J.C., Morel C., Boniface R.,** 1991. Cinétiques de transfert des ions P du sol vers la solution du sol : paramètres caractéristiques. *Agronomie* 11 :787-797.
- Fardeau J.C., Morel C., Boniface R.,** 1988. Phosphore assimilable des sols. Quelle méthode choisir en analyse de routine. *Agronomie*, 8 : 577-584.
- Fearnside, P.M.,** 2000. Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. *Climatic Change* 46:115–158.
- Ferreras, L., Gomez, E., Toresani, S., Firpo, I., Rotondo, R.,** 2006. Effect of organic amendments on some physical, chemical and biological properties in a horticultural soil. *Bioresource Technology* 97, 635–640.
- Filho, A. C. D. A. C., Crusciol, C. A. C., Nascente, A. S., Mauad, M., Garcia, R. A.,** 2017. Influence of potassium levels on root growth and nutrient uptake of upland rice cultivars. *Revista Caatinga* 30: 32 44.
- Fortun, A., Fortun, C., Ortega, C.,** 1989, Effect of farmyard manure and its humic fractions on the aggregate stability of a sandy-loam soil. *J. Soil Sci.* 40 , 293-298
- Foy, C.D.,** 1988. Plant adaptation to acid, aluminium-toxic soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 19, 959–987

Frelat R, et al. 2016. Drivers of household food availability in sub-Saharan Africa based on big data from small farms. *Proc Natl Acad Sci USA* 113(2):458–463

Frossard, E., Fardeau, J.C., Brossard, M., Morel, J.L., 1994. Soil isotopically exchangeable phosphorus: a comparison between E and L values. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:846-851

Frossard, E., Brossard, M., Feller, C., Rouiller, J., 1992. Pouvoir fixateur vis-à-vis des ions phosphate de sols tropicaux à argile 1:1. *Canadian Journal of Soil Science* 72: 135-43.

G

Gamon, J.A., Peñuela, J., Field, C.B., 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41: 35-44

Gao, G., Chang, C., 1996. Changes in CEC and particle size distribution of soils associated with long-term annual applications of cattle feedlot manure. *Soil Sci.* 161, 115–120.

Gentile, R., Vanlauwe, B., Chivenge, P., Six, J., 2011. Trade-offs between the short- and long-term effects of residue quality on soil C and N dynamics. *Plant Soil* 338, 159–169.

Gentile, R., Vanlauwe, B., van Kessel, C., Six, J., 2009. Managing N availability and losses by combining fertilizer-N with different quality residues in Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 131, 308–314.

Gérard, F., 2016. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils — A myth revisited. *Geoderma* 262, 213–226.

Giardina, C.P., Sanford, R.L., Dockersmith, I.C., Jaramillo, V.J., 2000. The effects of slash burning on ecosystem nutrients during the land preparation phase of shifting cultivation. *Plant Soil* 220:247-260

Gilani, S.S., Bahmanyar, M.A., 2008. Impact of organic amendments with and without mineral fertilizers on soil microbial respiration. *J Appl Sci* 8, 642–647

Giller, K.E., Cadisch, G., Mugwira, L.M., 1998. Potential benefits from interactions between mineral and organic nutrient sources, in: Waddington SR, et al (Eds.), *Soil fertility research for maize-based farming systems in Malawi and Zimbabwe*. Soil Fertility Network and CIMMYT-Zimbabwe, Harare, pp. 155–158.

Giller, K.E., Cadisch, G., 1995. Future benefits from biological nitrogen fixation: An ecological approach to agriculture. *Plant Soil* 174, 255-277.

Goedert, W.J., 1983. Management of the Cerrado soils of Brazil: A review. *Journal of Soil Science* 34, 405–428.

Gregorich, E.G., Carter, M.R., Angers, D.A., Monreal, CM., Ellert, B.H., 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science* 74: 367-385.

Guppy, C.N., Menzies, N.W., Moody, P.W., Blamey, F.P.C., 2005. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. *Soil Res.* 43, 189.

H

Hamon, R.E., Bertrand I., McLaughlin, M.J., 2002. Use and abuse of isotopic exchange data in soil chemistry. *Aust. J. Soil Res.* 40, 1371-1381.

Harper, S.M., Edwards, D.G., Kerven, G.L., Asher, C.J., 1995. Effects of organic acid fractions extracted from *Eucalyptus camaldulensis* leaves on root elongation of maize (*Zea mays*) in the presence and absence of aluminium. *Plant Soil* 171: 189–192.

- Harper, J. E.**, 1994. Nitrogen metabolism, in: Peterson, G. A. (Eds.), *Physiology and Determination of Crop Yield*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, pp. 285–302.
- Hartl, W., Putz B., Erhart E.**, 2003. Influence of rates and timing of biowaste compost application on rye yield and soil nitrate levels, *Eur. J. Soil Biol.* 39, 129–139.
- Haynes, R.J., Mokolobate, M.S.**, 2001. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved 17.
- Haynes, R.J., Naidu, R.**, 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review.
- He Z., Yang X., Kahn B.A., Storrella P.J., Calvert D.V.**, 2001. Plant nutrition benefits of phosphorus, potassium, calcium, magnesium, and micronutrients from compost utilization, in: Storrella, P.J., Kahn, B.A. (Eds.), *Compost utilization in horticultural cropping systems*. CRC Press LLC, pp. 307–317.
- Heal, O.W., Anderson J.W, Swift M.J.**, 1997. Plant litter quality and decomposition: An historical overview, in Cadisch, G., Giller, K.E. (Eds.), *Driven by nature: Plant litter quality and decomposition*. CAB Int., Wallingford, England, pp. 3-45.
- Herencia, J.F., Ruiz J.C., Melero S., Garcia Galavís P., Maqueda C.**, 2008. A short-term comparison of organic v. conventional agriculture in a silty loam soil using two organic amendments. *J Agric Sci* 146:677–687.
- Hiemstra, T., Antelo, J., Rahnemaie, R., van Riemsdijk, W.H.**, 2010. Nanoparticles in natural systems I: The effective reactive surface area of the natural oxide fraction in field samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74, 41–58
- Hinsinger, P.**, 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review 23.
- Hoffland, E., Findenegg, G.R., Nelemans, J.A.**, 1989. Solubilization of rock phosphate by rape. II. Local root exudation of organic acids as a response to P-starvation. *Plant and Soil* 113:161-165.
- Hue, N.V.**, 1992. Correcting soil acidity of a highly weathered Ultisol with chicken manure and sewage sludge. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 23, 241–264.
- Hue, N.V., Craddock, G.R., Adams, F.**, 1986. Effect of organic acids on aluminum toxicity in subsoils. *Soil Science Society of America Journal* 50, 28–34.

I

- Ichida, J.M., Krizova, L., LeFevre, C.A., Keener, H.M., Elwell, D.L., Burt, E.H.**, 2001. Bacterial inoculum enhances keratin degradation and biofilm formation in poultry compost. *Journal of Microbiological Methods* 47, 199–208.
- INSTAT**, 2013. Enquête nationale sur le suivi des objectifs du millénaire pour le développement à Madagascar. Objectif 01. 209p.
- INSTAT**, 2020. Résultats globaux du recensement général de la population et de l'habitation de 2018 de Madagascar (RGPH-3) ; 192p.
- Iyamuremye, F., Dick, R.P.**, 1996. Organic amendments and phosphorus sorption by soils 47.

J

- Jaillard, B., Deleporte, P., Loreau, M., Violle, C.**, 2018a. A combinatorial analysis using observational data identifies species that govern ecosystem functioning. *PLOS ONE* 13, e0201135.

Jaillard, B., Richon, C., Deleporte, P., Loreau, M., Violle, C., 2018b. An a posteriori species clustering for quantifying the effects of species interactions on ecosystem functioning. *Methods in Ecology and Evolution* 9, 704–715.

Janssen, B.H., Guiking F.C.T., van der Eijk D., Smaling E.M.A., Wolf J., van Reuler H., 1990. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma* 46 (4): 299-318.

K

Khanna, P.K., Raison, R.J., Falkiner, R.A., 1994. Chemical properties of ash derived from Eucalyptus litter and its effects on forest soils. *Forest Ecology and Management* 66, 107–125.

Kibblewhite, M.G., Ritz, K., Swift, M.J., 2008. Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363, 685–701.

Kihara, J., Nziguheba, G., Zingore, S., Coulibaly, A., Esilaba, A., Kabambe, V., Njoroge, S., Palm, C., Huising, J., 2016. Understanding variability in crop response to fertilizer and amendments in sub-Saharan Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 229, 1–12.

Kochian, L.V., Hoekenga, O.A., Piñeros, M.A., 2004. How do plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorus efficiency. *Annual Review of Plant Biology* 55, 459–493.

Koné, B., Amadji G. L., Igué A. M., Ogunbayo A., 2009. Rainfed upland rice production on a derived savannah soil in West Africa. *JAPS* 3 (1):156–62.

Koyama, S., Katagiri, T., Minamikawa, K., Kato, M., Hayashi, H., 2016. Effects of rice husk charcoal application on rice yield, methane emission, and soil carbon sequestration in andosol paddy soil. *Japan Agric. Res. Q: JARQ* 50, 319–327

Kucey, R.MN., Janzen, H.H., Legget, H.W., 1989. Microbially mediated increases in plantavailable phosphorus. *Advances in Agronomy*, 42, 199 – 228.

Kumar, K., Goh, K.M., 2000. Crop residues and management practices: effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield, and nitrogen recover. *Advances in Agronomy* 68 : 197-319.

L

Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304, 1623–1627.

Lal, R., 2014. Soil conservation and ecosystem services. *International Soil and Water Conservation Research* 2, 36–47.

Langenheder, S., Bulling, M.T., Solan, M., Prosser, J.I., 2010. Bacterial biodiversity-ecosystem functioning relations are modified by environmental complexity. *PLoS ONE* 5, e10834.

Larney F.J., Angers, D.A., 2012. The role of organic amendments in soil reclamation: A review. *Can. J. Soil Sci.* 92: 19-38.

Lashermes, G., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Thuriès, L., Chaussod, R., Guillotin, M.L., Linères, M., Mary, B., Metzger, L., Morvan, T., 2009. Typology of exogenous organic matters based on chemical and biochemical composition to predict potential nitrogen mineralization. *Bioresource Technology*.

Lavelle, P., Barros, E., Blanchart, E., 2001. SOM management in the tropics: Why feeding the soil macrofauna? *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 61:53-61

- Lazcano, C., Gómez-Brandón, M., Revilla, P., Domínguez, J.,** 2013. Short-term effects of organic and inorganic fertilizers on soil microbial community structure and function: A field study with sweet corn. *Biol Fertil Soils* 49, 723–733.
- Leroy, B.L.M.; Herath, H.M.S.K.; Sleutel, S.; De Neve, S.; Gabriels, D.; Reheul, D.; Moens, M.,** 2008a. The quality of exogenous organic matter: Short-term effects on soil physical properties and soil organic matter fractions. *Soil Use Manag.*, 24, 139–147.
- Leroy, B.L.M., Schmidt, O., Van den Bossche, A., Reheul, D., Moens, M.,** 2008b. Earthworm population dynamics as influenced by the quality of exogenous organic matter. *Pedobiologia* 52: 139150.
- Lichtfouse, E.** (Ed.), 2017. *Sustainable Agriculture Reviews, Sustainable Agriculture Reviews.* Springer International Publishing, Cham.
- Liu, Z.; Chen, X.; Jing, Y.; Li, Q.; Zhang, J.; Huang, Q.,** 2014. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil. *Catena*, 123, 45–51.
- Loveland, P. Webb, J.,** 2003. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. *Soil and Tillage Research* 70, 1-18.
- Lynch, J.M., Bragg, E.,** 1985, Microorganisms and soil aggregate stability. *Advances in Soil Science*, 2, 133-171
- M**
- Ma, J.F.,** 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Sci. Plant Nutr.* 50, 11–18.
- Mafongoya, P.L., Barak, P., Reed, J.D.,** 2000. Carbon, nitrogen and phosphorus mineralization of tree leaves and manure. *Biology and Fertility of Soils* 30, 298–305.
- Magdoff, F., Weil, R.,** 2004. Soil organic matter management strategies, in: Magdoff, F., Weil, R. (Eds.), *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture: Advances in Agroecology.* CRC Press, pp.
- Mandal, B., Majumder, B., Bandyopadhyay, P.K., Hazra, G.C., Gangopadhyay, A., Samantaray, R.N., Mishra, A.K., Chaudhury, J., Saha, M.N., Kundu, S.,** 2007. The potential of cropping systems and soil amendments for carbon sequestration in soils under long-term experiments in subtropical India, *Global Change Biol.* 13, 357–369.
- Margenot, A.J., Singh, B.R., Rao I.M., Sommer R.,** 2017. Phosphorus fertilization and management in soils of sub-saharan Africa, in Lal R. (Ed.), *Soil Phosphorus.* CRC Press, Boca Raton, pp. 151-208.
- Marschner, P, Kandeler, E, Marschner, B.,** 2003. Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment. *Soil Biology and Biochemistry* 35:453–461
- Materechera, S.A., Mkhabela, T.S.,** 2002. The effectiveness of lime, chicken manure and leaf litter ash in ameliorating acidity in a soil previously under black wattle (*Acacia mearnsii*) plantation. *Bioresource Technology* 85, 9–16.
- MEA,** Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis.* Island Press, Washington, DC.
- Meng, L., Ding, W., Cai, Z.,** 2005. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N₂O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil, *Soil Biol. Biochem.* 37, 2037–2045.

- Messiga, A.J., Ziadi, N., Mollier, A., Parent, L.-E., Schneider, A., Morel, C., 2015.** Process-based mass-balance modeling of soil phosphorus availability: Testing different scenarios in a long-term maize monoculture. *Geoderma* 243–244, 41–49
- Miller, J., Beasley, B., Drury, C., Larney, F., Hao, X.Y., 2016.** Influence of long-term application of composted or stockpiled feedlot manure with straw or wood chips on soil cation exchange capacity. *Compos. Sci. Util.* 24, 54–60
- Miller, A.J., Cramer, M.D., 2004.** Root nitrogen acquisition and assimilation. *Plant Soil* 274 :1-36.
- Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, 2015.** Plan directeur de la recherche sur l'agriculture et la sécurité alimentaire – 2015-2019. MESupReS, Antananarivo.
- Minten, B., 2006.** Riz et pauvreté à Madagascar. Africa Region Working Paper 102.
- Minten, B., Randrianarisoa J.C., Barrett C. B., 2007.** Productivity in Malagasy rice systems: Wealth-differentiated constraints and priorities. *Agricultural Economics* 37: 225–37.
- Mokolobate, M., Haynes, R., 2002.** Comparative liming effect of four organic residues applied to an acid soil. *Biology and Fertility of Soils* 35, 79–85.
- Morel, C., 2007.** La phosphore dans l'environnement: bilan des connaissances sur l'impacts, les transferts et la gestion environnementale. *Océan. Doc. Océan.* 33–1/2, 51–74
- Morel, C., 2002.** Caractérisation de la phytodisponibilité du phosphore du sol par la modélisation du transfert des ions phosphates entre le sol et la solution (Mémoire D'HDR) INPL Nancy. 80p.
- Morel, C., 2001.** The effects of soil solution P and time on the transfer of phosphate ions in soil from the Imphos European network, in: Actes Editions, The Effect of Phosphate Fertilizer Management Strategies on Soil Phosphorus Status and Crop Yields in Some European Countries. Rabat, Maroc, pp. 103-122.
- Morel, C., Plénet, D., Mollier, A., 2021.** Calibration of maize phosphorus status by plant-available soil P assessed by common and process-based approaches. Is it soil-specific or not? *European Journal of Agronomy* 122, 126174.
- Morel, C., Ziadi, N., Messiga, A., Bélanger, G., Denoroy, P., Jeangros, B., Jouany, C., Fardeau, J.-C., Mollier, A., Parent, L.-E., 2014.** Modeling of phosphorus dynamics in contrasting agroecosystems using long-term field experiments. *Can. J. Soil Sci.* 94, 377–387
- Morel, C., Butler, F., Castillon, P., Champolivier, L., Denoroy, P., Duval, R., Hanocq, D., Kouassi, A.S., Kvarnström, M.E., Messiga, A.J., 2011.** Gestion à long terme de la dynamique du phosphore dans les sols cultivés. 10èmes Rencontres Fertil. Raison. L'analyse Terre GEMAS COMIFER Reims. 12p
- Morel, C., Tunney, H., Plénet, D., Pellerin, S., 2000.** Transfer of phosphate ion between soil and solution. *Perspectives in soil testing. Journal of Environmental Quality*, 29 :50-59.
- Morel, C., Plenchette, C., 1994.** Is the isotopically exchangeable P of a loamy soil the available P to growing roots. *Plant Soil* 158:287-297.
- Morel, C., Plenchette, C., Fardeau, J.C., 1992.** La fertilisation phosphatée raisonnée de la culture de blé. *Agronomie* 12 :565-579.
- Morel, C., Fardeau, J.C., 1991.** Phosphorus bioavailability of fertilizers: a predictive laboratory method for its evaluation. *Fertilizer Research*, 28 : 1-9.
- Morel, C., Fardeau, J.C., 1990.** Agronomical evaluation of phosphate fertilizer as a nutrient source of phosphorus for crops: isotopic procedure. *Fertilizer Research*, 24: 115-122.

Mori, T., Lu, X., Aoyagi, R., Mo, J., 2018. Reconsidering the phosphorus limitation of soil microbial activity in tropical forests. *Functional Ecology* 32, 1145–1154.

Morvan, T., Nicolardot, B., Péan, L., 2006. Biochemical composition and kinetics of C and N mineralization of animal wastes: a typological approach. *Biol Fertil Soils* 42, 513–522.

N

Naramabuye, F.X., Haynes, R.J., 2006. Effect of organic amendments on soil pH and Al solubility and use of laboratory indices to predict their liming effect: *Soil Science* 171, 754–763.

Némery, J., Garnier, J., Morel, C., 2005. Phosphorus budget in the Marne Watershed (France): urban vs. diffuse sources, dissolved vs. particulate forms. *Biogeochemistry* 72, 35–66.

Nicolardot, B., Recous, S., Mary, B., 2001. Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: A simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues 21.

Nishigaki, T., Tsujimoto, Y., Rinasoa, S., Rakotoson, T., Andriamananjara, A., Razafimbelo, T., 2018. Phosphorus uptake of rice plants is affected by phosphorus forms and physicochemical properties of tropical weathered soils. *Plant and Soil*.

Njoroge, S., Schut, A.G.T., Giller, K.E., Zingore, S., 2017. Strong spatial-temporal patterns in maize yield response to nutrient additions in African smallholder farms. *Field Crops Research* 214, 321–330.

Nobile, C.M., Bravin, M.N., Becquer, T., Paillat, J.-M., 2020. Phosphorus sorption and availability in an andosol after a decade of organic or mineral fertilizer applications: Importance of pH and organic carbon modifications in soil as compared to phosphorus accumulation. *Chemosphere* 239, 124709.

Nobile, C.M., Bravin, M.N., Tillard, E., Becquer, T., Paillat, J.-M., 2018. Phosphorus sorption capacity and availability along a toposequence of agricultural soils: effects of soil type and a decade of fertilizer applications. *Soil Use Manage* 34, 461–471.

Nziguheba, G., Merckx, R., Palm, C.A., Mutuo, P., 2002. Combining *Tithonia diversifolia* and fertilizers for maize production in phosphorus deficient soil in Kenya. *Agrofor. Syst.* 55, 165–174.

Nziguheba, G., Merckx, R., Palm, C.A., Rao, M.R., 2000. Organic residues affect phosphorus availability and maize yields in a Nitisol of Western Kenya. *Biol. Fertil. Soils* 32, 328–339.

O

Oades, J.M., Waters, A. G., 1991, Aggregate hierarchy in soils, *Aust. J. Soil Res.*, 29, 815-828

Oberson, A., Joner, E.J., 2005. Microbial turnover of phosphorus in soil, in: Turner, B.L., Frossard, E., Baldwin, D.S. (Eds.), *Organic phosphorus in the environment*. CABI, Wallingford, pp. 133–164.

Oberson, A., Friesen, D.K., Tiessen, H., Morel, C., Stahel, W., 1999. Phosphorus status and cycling in native savannah and improved pastures on an acid low-P Colombian Oxisol. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 55 :77-88.

Okalebo, R.J., Gathua, K.W., Woomer, P.L., (2nd Eds.), 2002. *Laboratory methods of soil and plant analysis: A working manual* 131. Nairobi, Sacred Africa.

Olsen, S.R., Cole C. V., Watanabe F.S., Dean L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate, Circular No 939. USDA, Washington DC, USA: United State Department of Agriculture.

P

- Padwick, G.W.**, 1983. Fifty years of experimental agriculture II. The maintenance of soil fertility in tropical Africa: A review. *Exp. Agric.* 19:293-310.
- Palm, C.A., Gachengo, C.N., Delve, R.J., Cadisch, G., Giller, K.E.**, 2001a. Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic resource database. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 83, 27–42.
- Palm, C.A., Giller, K.E., Mafongoya, P.L., Swift, M.J.**, 2001b. Management of organic matter in the tropics: translating theory into practice, in: Martius, C., Tiessen, H., Vlek, P.L.G. (Eds.), *Managing Organic Matter in Tropical Soils: Scope and Limitations*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 63–75.
- Palm, C.A., Sanchez, P.A.**, 1991. Nitrogen release from the leaves of some tropical legumes as affected by their lignin and polyphenolic contents. *Soil Biology and Biochemistry* 23, 83–88.
- Parfitt, R.L.**, 1978. Anion adsorption by soil and soil materials. *Advances in Agronomy* 30, 1-50
- Parfitt, R.L.**, 1980. Chemical properties of variable charge soils, in: Theng, B.K.G. (Eds.), *Soils with variable charge*. New Zealand Soc. Soil Sci., New Zealand, pp. 167-194.
- Parkin, T.B., Doran, J.W., Franco-Vizcaino, E.**, 1996. Field and laboratory tests of soil respiration, in: Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds.), *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special Publication No. 49, pp. 231–245.
- Parnaudeau, V., Nicolardot, B., Pagès, J.**, 2004. Relevance of Organic Matter Fractions as Predictors of Wastewater Sludge Mineralization in Soil. *J. Environ. Qual.* 33, 1885–1894.
- Parr, J.F., Papendick, R.I.**, 1978. Factors affecting the decomposition of crop residues by microorganisms, in: Oschwald, W.R. (Ed.), *Crop Residue Management Systems*. Am. Soc. Agron., Madison, WI, pp. 101- 129.
- Pascual, J.A., Hernandez, T., Garcia, C., Ayuso, M.**, 1998. Enzymatic activities in an arid soil amended with urban organic wastes: laboratory experiment. *Bioresour. Technol.* 64, 131–138.
- Penot, E., Domas, R., Andriamalala, H., Hyac, P., Dupin, B., Durand, C.**, 2011. Rôle et place du riz pluvial dans les exploitations agricoles à Madagascar. Le cas du lac Alaotra et du Vakinankaratra. 31.
- Pimentel, D., Allen, J., Beers, A., Guinand, L., Linder, R., McLaughlin, P., Meer, B., Musonda, D., Perdue, D., Poisson, S., Siebert, S., Stoner, K., Salazar, R., Hawkins, A.**, 1987. World Agriculture and Soil Erosion. *BioScience* 37, 277–283.
- Plan National de Développement (PND) 2015-2019**, 2015. 105 p.

R

- R Core Team**, 2015. R: A Language and Environment for Statistical Computing
- Rabeharisoa, L.R.**, 2004. Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar. (Thèse de doctorat d'état en sciences naturelles). Université d'Antananarivo.185p.
- Rabeharisoa, L., Razanakoto, O.R., Razafimanantsoa, M.-P., Rakotoson, T., Amery, F., Smolders, E.**, 2012. Larger bioavailability of soil phosphorus for irrigated rice compared with rainfed rice in Madagascar: results from a soil and plant survey. *Soil Use and Management* 28, 448–456.

- 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., Razafimahafaly, A.H.D., Rabenjarisoa, M.B., Rabary, B., Dusserre, J., Becquer, T.**, 2016. Improving the fertility of tropical acid soils: Liming versus biochar application? A long term comparison in the highlands of Madagascar. *Field Crops Research* 199, 99–108.
- Raboin, L.-M., Randriambololona, T., Radanielina, T., Ramanantsoanirina, A., Ahmadi, N., Dusserre, J.**, 2014. Upland rice varieties for smallholder farming in the cold conditions in Madagascar's tropical highlands. *Field Crops Research* 169, 11–20.
- Raboin, L.-M., Ramanantsoanirina, A., Dzido, J.-L., Frouin, J., Radanielina, T., Tharreau, D., Dusserre, J., Ahmadi, N.**, 2013. Upland rice varieties for the highlands of Madagascar: Review of a 25-year-long breeding program. *Cahiers Agricultures* 450–458.
- Rahantalalao, H.R.**, 2019. Déterminants physico-chimiques de la phytodisponibilité du phosphore dans les sols malgaches. (Thèse de doctorat en sciences agronomiques). Université d'Antananarivo. 190p.
- Raharinosy, R.V.**, 1979. Etude de la dynamique du phosphore dans quelques sols ferrallitiques des Hauts Plateaux de Madagascar : Application à des essais de fertilisation. Thèse de Doctorat ès Pédologie et aménagement des sols. Université Pierre et Marie Curie de Paris.
- 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
- Rakotomalala, R.**, 2005. TANAGRA: Un logiciel gratuit pour l'enseignement et la recherche, in Actes de EGC'2005, RNTI-E-3, vol. 2. In.
- Rakotoson, T., Rabeharisoa, L., Smolders, E.**, 2016. Effects of soil flooding and organic matter addition on plant accessible phosphorus in a tropical paddy soil: an isotope dilution study. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 179, 765–774
- Rakotoson, T., Amery, F., Rabeharisoa, L., Smolders, E.**, 2014. Soil flooding and rice straw addition can increase isotopic exchangeable phosphorus in P-deficient tropical soils. *Soil Use and Management* 30, 189–197.
- Rakotoson, T., Dusserre, J., Letourmy, P., Ramonta, I.R., Cao, T.-V., Ramanantsoanirina, A., Roumet, P., Ahmadi, N., Raboin, L.-M.**, 2017. Genetic variability of nitrogen use efficiency in rainfed upland rice. *Field Crops Research* 213, 194–203.
- Ramaroson, V.H., Becquer, T., Sá, S.O., Razafimahatratra, H., Delarivière, J.L., Blavet, D., Vendrame, P.R.S., Rabeharisoa, L., Rakotondrazafy, A.F.M.**, 2018. Mineralogical analysis of ferrallitic soils in Madagascar using NIR spectroscopy. *CATENA*.
- Raminoarison, M., Razafimbelo, T., Rakotoson, T., Becquer, T., Blanchart, E., Trap, J.**, 2020. Multiple-nutrient limitation of upland rainfed rice in ferralsols: a greenhouse nutrient-omission trial. *Journal of Plant Nutrition* 43, 270–284.
- Randriamanantsoa, L., Frossard, E., Oberson, A., Bünemann, E.K.**, 2015. Gross organic phosphorus mineralization rates can be assessed in a Ferralsol using an isotopic dilution method. *Geoderma* 257–258, 86–93.
- Randriamanantsoa, L., Morel, C., Rabeharisoa, L., Douzet, J.-M., Jansa, J., Frossard, E.**, 2013. Can the isotopic exchange kinetic method be used in soils with a very low water extractable phosphate content and a high sorbing capacity for phosphate ions? *Geoderma* 200–201, 120–129.

- Ranoarisoa, M.P., Morel, C., Andriamananjara, A., Jourdan, C., Bernard, L., Becquer, T., Rabeharisoa, L., Rahajaharilaza, K., Plassard, C., Blanchart, E., Trap, J., 2018.** Effects of a bacterivorous nematode on rice 32 P uptake and root architecture in a high P-sorbing ferrallitic soil. *Soil Biology and Biochemistry* 122, 39–49.
- Ratsiatosika, H.O., 2018.** Vers de terre et services écosystémiques en riziculture pluviale à Madagascar. Connaissances des processus et propositions d'innovations agricoles (Thèse de doctorat en sciences agronomiques). Université d'Antananarivo. 193p.
- Reardon, T., 1995.** Links Between Rural Poverty and the Environment in Developing Countries: Asset Categories and Investment Poverty 13.
- Recous, S., Robin, D., Darwis, D., Mary, B., 1995.** Soil inorganic N availability: effect on maize residue decomposition. *Soil Biol. Biochem.* 27, 1529–1538.
- Regelink, I.C., Weng, L., Lair, G.J., Comans, R.N.J., 2015.** Adsorption of phosphate and organic matter on metal (hydr)oxides in arable and forest soil: a mechanistic modelling study. *Eur. J. Soil Sci.* 66, 867-875.
- Renck, A., Lehmann, J., 2004.** Rapid water flow and transport of inorganic and organic nitrogen in a highly aggregated tropical soil. *Soil Sci* 169:330–341.
- Rillig, M.C., Mummey, D.L., 2006.** Mycorrhizas and soil structure. *New Phytol.*, 171, 41–53.
- Robert, M., 1996.** Le sol: interface dans l'environnement, ressource pour le développement, in Masson (Eds.), 3e cycle et recherche, Collection Sciences de l'environnement.
- Roederer, P., 1971.** Les sols de Madagascar. ORSTOM. 56 p.
- Ros, M., Klammer, S., Knapp, B., Aichberger, K., Insam, H., 2006.** Long term effects of compost amendment of soil on functional and structural diversity and microbial activity. *Soil Use Manag* 22:209–218
- S**
- Saha, S., Mina, B.L., Gopinath, K.A., Kundu, S., Gupta, H.S., 2008.** Relative changes in phosphatase activities as influenced by source and application rate of organic composts in field crops. *Bioresour Technol* 99:1750–1757
- Sahrawat, K. L., Jones M. P., Diatta S., Sika M., 2003.** Long-term phosphorus fertilizer uptake, efficiency and recovering by upland rice on Ultisol. *Commun Soil Sci Plan.* 34(7–8): 999–1011.
- Saito, K., E. Vandamme, J.-M. Johnson, A. Tanaka, K. Senthilkumar, I. Dieng, I. Akakpo, F. Gbaguidi, Z. Segda, I. Bassoro, et al. 2019.** Yield-limiting macronutrients for rice in sub-Saharan Africa. *Geoderma* 338: 546-54.
- Sanchez, P.A., Shepherd, K.D., Soule, M.J., Place, F.M., Buresh, R.J., Izac, A.-M.N., Mkwunye, A.U., Kwesiga, F.R., Ndiritu, C.G. & Woomer, P., 1997.** Soil fertility replenishment in Africa: an investment in natural resource capital, in: Buresh, R.J., Sanchez, P.A., Calhoun, F. Replenishing Soil Fertility in Africa. SSSA, Madison, WI, pp. 1–46.
- Sanginga, N., Woomer, P. L. (Eds.), 2009.** Integrated Soil Fertility Management in Africa: Principles, Practices and Developmental Process. *Tropical Soil Biology and Fertility*, Institute of the International Centre for Tropical Agriculture, Nairobi.
- Savant, N. K., Synder G. H., Datnoff L. E., 1997.** Silicon management and sustainable rice production. *Adv. Agron.* 58, 151–199.
- Saviozzi, A., Biasci, A., Riffaldi, R., Levi-Minzi, R., 1999.** Long-term effects of farmyard manure and sewage sludge on some soil biochemical characteristics, *Biol. Fert. Soils* 30, 100–106.

- Ségalen, P.**, 1966. Altération des minéraux primaires, synthèse des minéraux secondaires au cours de la ferrallitisation. Les sols ferrallitiques. Cahier ORSTOM sér. Pédol. 4 (4): 5-13.
- Sester, M., Raveloson, H., Tharreau, D., Becquer, T.**, 2019. Difference in blast development in upland rice grown on an Andosol vs a Ferralsol. *Crop Protection* 115, 40–46.
- Shen, P., Xu, M., Zhang, H., Yang, X., Huang, S., Zhang, S. & He, X.**, 2014. Long-term response of soil Olsen P and organic C to the depletion or addition of chemical and organic fertilizers. *Catena*, 118, 20–27.
- Silva-Perez, V., Molero, G., Serbin, S.P., Condon, A.G., Reynolds, M.P., Furbank, R.T., Evans, J.R.**, 2018. Hyperspectral reflectance as a tool to measure biochemical and physiological traits in wheat. *J Exp Bot* 69, 483–496.
- Simpson, R.J., Oberson, A., Culvenor, R.A., Ryan, M.H., Veneklaas, E.J., Lambers, H., Lynch, J.P., Ryan, P.R., Delhaize, E., Smith, F.A., Smith, S.E., Harvey, P.R., Richardson, A.E.**, 2011. Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems. *Plant Soil* 349, 89–120.
- Singh, R., Srivastava, P., Singh, P., Sharma, A.K., Singh, H., Raghubanshi, A.S.**, 2019. Impact of rice-husk ash on the soil biophysical and agronomic parameters of wheat crop under a dry tropical ecosystem. *Ecological Indicators* 105, 505–515.
- Six, J.; Paustian, K.**, 2014. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biol. Biochem.*, 68, A4–A9.
- Sartain, J.B., Kamprath, E.J.**, 1977. Effect of soil Al saturation on nutrient concentration of soybean tops, roots and nodules. *Agron J* 69: 843–845.
- Staunton, S., Leprince, F.**, 1996. Effect of pH and some organic anions on the solubility of soil phosphate: implications for P bioavailability. *Eur. J. Soil Sci.* 47 :231-239.
- Steiner, C., Teixeira, W.G., Lehmann, J., Nehls, T., de Macêdo, J.L.V., Blum, W.E.H., Zech, W.**, 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant Soil* 291, 275–290.
- Steven, R., Garrity, Lee A., Vierling, Keith, B.**, 2010. A simple filtered photodiode instrument for continuous measurement of narrow band NDVI and PRI over vegetated canopies, *Agricultural and Forest Meteorology* 150 (2010) 489–496.
- Stevenson, F.J., Vance, G.F.**, 1989. Naturally occurring aluminium – organic complexes, in: Sposito, G. (Ed.), *The Environmental Chemistry of Aluminium*. CRC Press, Boca Raton, pp. 117–146.
- Stroia, C., Morel, C., Jouany, C.**, 2011. Nitrogen Fertilization Effects on Grassland Soil Acidification: Consequences on Diffusive Phosphorus Ions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75, 1, 112-120.
- Stroia, C., Jouany, C., Morel, C.**, 2007. Effect of pooling soil samples on the diffusive dynamics of phosphate ionic species. *Soil Science* 172, 614–622.
- Sumner, M.E., Farina, M.P.W.**, 1986. Phosphorus interactions with other nutrients and lime in field cropping systems. *Advances in Soil Science* 5, 201–236
- Sunderlin, W.D., Angelsen, A., Belcher, B., Burgers, P., Nasi, R., Santoso, L., Wunder, S.**, 2005. Livelihoods, forests, and conservation in developing countries: An Overview. *World Development* 33, 1383–1402.
- Swift, M.J., Heal, O.W., Anderson, J.M.**, 1979. *Decomposition in terrestrial ecosystems. Studies in ecology.* Univ. of California Press, Berkeley.

T

- Team R**, 2016. RStudio: Integrated Development for R
- Tejada, M., Gonzalez, J.L., García-Martínez, A.M., Parrado, J.**, 2008. Application of a green manure and green manure composted with beet vinasse on soil restoration: Effects on soil properties, *Bioresource Technol.* 99: 4949–4957
- Tiessen, H., Cuevas, E., Chacon, P.**, 1994. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature* 371, 783–785.
- Tilman, D.**, 2001. Diversity and Productivity in a Long-Term Grassland Experiment. *Science* 294, 843–845.
- Tittarelli, F., Petruzzelli, G., Pezzarossa, B., Civilini, M., Benedetti, A., Sequi, P.**, 2007. Quality and agronomic use of compost, in: Diaz, L.F., de Bertoldi, M., Bidlingmaier, W., Stentiford, E. (Eds.), *Compost science and technology, Waste management series 8*. Elsevier Ltd., pp. 119–145, ISBN-13: 978-0-08-043960-0
- Tittonell P., Giller K.E.**, 2013. When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *Field Crops Research* 143:76–90.
- Toor, G.S., Hunger, S., Peak, J.D., Sims, J.T. & Sparks, D.L.**, 2006. Advances in the characterization of phosphorus in organic wastes: environmental and agronomic applications. *Advances in Agronomy*, 89, 1–72.
- Truong, B., Beunard, P., Diekola, K., Pichot, J.**, 1982. Caractérisation et comparaison des phosphates naturels de Madagascar en vue de leur utilisation directe en agriculture. *L'Agron. Trop.* 37: 9-16.
- Tsujimoto, Y., Rakotoson, T., Tanaka, A., & Saito, K.**, 2019. Challenges and opportunities for improving N use efficiency for rice production in sub-Saharan Africa. *Plant Production Science*, 22(4), 413–427.
- Tsujimoto, Y., Muranaka S., Saito K., Asai H.**, 2014. Limited Si-nutrient status of rice plants in relation to plant-available Si of soils, nitrogen fertilizer application, and rice-growing environments across Sub-Saharan Africa. *Field Crops Research* 155: 1-9.
- Tucker, C.J.**, 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8: 127-150.
- U**
- Urta, Alkorta, Garbisu**, 2019. Potential Benefits and Risks for Soil Health Derived From the Use of Organic Amendments in Agriculture. *Agronomy* 9, 542.
- V**
- van Ittersum, M. K., Van Bussel, L. G., Wolf, J., Grassini, P., Van Wart, J., Guilpart, N., ... Yang, H.**, 2016. Can sub-Saharan Africa feed itself? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(52), 14964–14969
- Van Kauwenbergh, S.J., Williams, L.B., McClellan, G.H.** (Eds.), 1991. The fertilizer mineral resources of East and southeast Africa. Special issue. *Fert. Res.* 30:123-296
- Van Soest, P.J.**, 1963, Use of detergents in the analysis of fibrous feeds I: preparation of fiber residues of low nitrogen content. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.*, 46, 825-835
- Van Straaten, P.**, 2002. *Rocks for crops: agrominerals of sub-Saharan Africa*. ICRAF; University of Guelph, Nairobi, Kenya : Guelph, Canada.
- van Veldhoven, P.P., Mannaerts, G.P.**, 1987. Inorganic and organic phosphate measurements in the nanomolar range. *Analytical Biochemistry* 161, 45–48.

- Van Wambeke, A.**, 1974. Management Properties of Ferralsols, Rome.
- Van-Camp, L., Bujarrabal, B., Gentile, A.-R., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Olazabal, C., Selvaradjou, S.-K.**, 2004. Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection, EUR 21319 EN/3, 872 p., Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg
- Vanlauwe, B., Coyne, D., Gockowski, J., Hauser, S., Huising, J., Masso, C., Nziguheba, G., Schut, M., Van Asten, P.**, 2014a. Sustainable intensification and the African smallholder farmer. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 8, 15–22.
- Vanlauwe, B., Wendt, J., Giller, K.E., Corbeels, M., Gerard, B., Nolte, C.**, 2014b. A fourth principle is required to define Conservation Agriculture in sub-Saharan Africa: The appropriate use of fertilizer to enhance crop productivity. *Field Crops Research* 155, 10–13.
- Vanlauwe, B., Bationo, A., Chianu, J., Giller, K.E., Merckx, R., Mkwunye, U., Ohiokpehai, O., Pypers, P., Tabo, R., Shepherd, K.D., Smaling, E.M.A., Wooster, P.L., Sanginga, N.**, 2010. Integrated soil fertility management: Operational definition and consequences for implementation and dissemination 39, 8.
- Vanlauwe, B., Giller, K.**, 2006. Popular myths around soil fertility management in sub-Saharan Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 116, 34–46.
- Vanlauwe, B., Gachengo, C., Shepherd, K., Barrios, E., Cadisch, G., Palm, C.A.**, 2005. Laboratory Validation of a Resource Quality-Based Conceptual Framework for Organic Matter Management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 1135–1145.
- Vanlauwe B., Diels J., Aihou K., Iwuofor E.N.O., Lyasse O., Sanginga N., Merckx R.**, 2002. Direct interactions between N fertilizer and organic matter: evidence from trials with ¹⁵N-labelled fertilizer, in : Vanlauwe, B., Diels, J., Sanginga, N., Merckx, R. (Eds.), *Integrated plant nutrient management in Sub-Saharan Africa*. CAB International, Wallingford, pp. 173–184.
- Vanlauwe, B., Wendt, J., Diels, J.**, 2001. Combined Application of Organic Matter and Fertilizer, in: Tian, G., Ishida, F., Keatinge, D., Carsky, R., Wendt, J. (Eds.), *SSSA Special Publications*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, pp. 247–279.
- Velasquez, E., Lavelle, P., Andrade, M.**, 2007. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology and Biochemistry* 39, 3066–3080.
- Vendrame, P.R.S., Rabeharisoa, L., Rakotondrazafy, A.F.M.**, 2018. Mineralogical analysis of ferrallitic soils in Madagascar using NIR spectroscopy. *Catena* 168: 102-109.
- von Uexküll, H.R., Mutert E.**, 1995. Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant and Soil* 171: 1-15.
- W**
- Wang, M., Gao, L., Dong, S., Sun, Y., Shen, Q., Guo, S.**, 2017. Role of silicon on plant-pathogen interactions. *Front. Plant Sci.* 8, 701
- Wezel A., Casagrande M., Celette F., Vian J.-F., Ferrer A., Peigné J.**, 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 1-20
- Whalen, J.K., Chang, C., Clayton, G.W., Carefoot, J.P.**, 2000. Cattle Manure Amendments Can Increase the pH of Acid Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 962–966.
- Wong, M.T.F., Nortcliff, S., Swift, R.S.**, 1998. Method for determining the acid ameliorating capacity of plant residue compost, urban waste compost, farmyard manure, and peat applied to tropical soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 29, 2927–2937.

World Bank, 2007. World development report 2008: agriculture for development. Washington, D.C.: World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/5990>.

World Bank, 2015. Madagascar - Diagnostic systématique de pays. Washington, D.C. : World Bank Group.
<http://documents.worldbank.org/curated/en/130511468185962850/MadagascarDiagnostic-systématique-de-pays>

WFP, MAEP, FAO, 2019. Rapport spécial : Évaluation de la production agricole et De la sécurité alimentaire à Madagascar. 77pp

X

Xiao, H. Y., Liu C. Q., 2002. Sources of nitrogen and sulfur in wet deposition at Guiyang, Southwest China. Atmospheric Environment 36: 5121–30.

Z

Zapata F., Roy, R.N., 2004. Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable. Bulletin 13 engrais et nutrition végétale. A joint publication of the FAO Land and Water development division and the International Atomic Energy Agency.

Zebarth, B.J., Neilsen, G.H., Hogue, E., Neilsen, D., 1999. Influence of organic waste amendments on selected soil physical and chemical properties. Can. J. Soil Sci., 79, 501–504.

Zemek, O., Frossard, E., Scopel, E., Oberson, A., 2018. The contribution of *Stylosanthes guianensis* to the nitrogen cycle in a low input legume-rice rotation under conservation agriculture. Plant Soil 425, 553–576.

Zhang, Z., Liu Q., Song H., Rong X., Ismail A. M., 2011. Responses of Contrasting Rice (*Oryza Sativa L.*) Genotypes to salt stress as affected by nutrient concentrations. Agricultural Sciences in China 10 (2): 195-206

Zoccola, M., Aluigi, A., Tonin, C., 2009. Characterisation of keratin biomass from butchery and wool industry wastes. Journal of Molecular Structure 938, 35–40.

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Origine et description de 17 matières fertilisantes organiques et/ou minérales disponibles des Hautes Terres de Madagascar	i
Annexe 2 : Cumulative carbon mineralization rates of the 19 organic and mineral materials measured during 150 days of incubation (g C-CO ₂ g ⁻¹ C applied).....	iiiµ
Annexe 3 : Valeurs expérimentales (symboles) et ajustées (lignes) de la quantité d'ions orthophosphates diffusibles (Pr) à l'interface solide-solution en fonction de la durée de transfert (t= 3, 30 et 300 minutes) et de leur concentration dans la solution du sol (Cp) des sols fertilisés par des matières fertilisantes disponibles sur les Hautes Terres de Madagascar.	iv
Annexe 4 : Pairwise comparison of the parameter (v, w, p) setting of the Freundlich kinetic function for the control soil and the fertilization treatments	viii
Annexe 5 : Liste des assemblages testés en serre.....	ix
Annexe 6 : Caractéristiques des matières fertilisantes organiques et minérales utilisées dans les expériences d'assemblage.....	i
Annexe 7 : Résultats de la typologie des matières fertilisantes à l'aide du modèle combinatoire	ii
Annexe 8 : Statistiques descriptives de la performance des matières seules ou en assemblage sur la biomasse aérienne. Les figurés en rouge indiquent la performance des matières seules.....	vi
Annexe 9 : Liste des assemblages testés au champ.....	vii
Annexe 10 : Démarche pour la modélisation des effets d'interaction et de composition par analyse combinatoire	viii
Annexe 11: Boîtes à moustaches des variables mesurées	ix
Annexe 12 : Effets d'interaction et de composition sur la performance des assemblages.....	x
Annexe 13 : Résultats de la classification en cinq groupes des matières fertilisantes sur le rendement en grains	xi
Annexe 14 : Récapitulatif des effets induits par les matières sur la performance des assemblages	xii

Annexe 1 : Origine et description de 17 matières fertilisantes organiques et/ou minérales disponibles des Hautes Terres de Madagascar

Abréviation	Classe	Type	Norme	Description	Fabricant
CB	Engrais composés PK	Cendres végétales		Balle de riz (glume et glumelle des paddy obtenues après décorticage) brûlée à l'air libre	Producteur de l'Itasy
CE	Engrais composés PK	Cendres végétales	NF U42-001	Cendre des branches d' <i>Eucalyptus sp.</i>	Producteur de l'Itasy
VCV	Amendements organiques	Composts de matières végétales et animales	NF U44-051	Lombricompostage pendant 45 jours de mélange de: fumier de bovin, sol, paille de riz et de légumineuses (<i>Melia azedarach</i> principalement), espèces de vers de terre utilisées: <i>Eisenia foetida</i> et <i>Eisenia andrei</i> (espèces importées)	Producteur du Vakinankaratra
VCT	Amendements organiques	Composts de matières végétales et animales	NF U44-051	Lombricompostage de mélange de : fumier de bovin et divers produits végétaux, espèce de vers de terre utilisée : <i>Eisenia foetida</i>	Association TATA
Tar	Amendements organiques	Composts de matières végétales et animales		Levain bactérien fixé sur un support végétal biologique, certifié bio par Ecocert. Connu commercialement sous le nom de Taroka	
ComT	Amendements organiques	Composts alimentaires et /ou issus des produits ménagers fermentescibles		Compostage naturel des déchets fermentescibles de la décharge solide d'Andralanitra	Association AKAMASOA
ComM	Amendements organiques	Composts alimentaires et /ou issus des produits ménagers fermentescibles	NF U44-051	Compostage naturel des déchets fermentescibles de la décharge solide de Mahajanga	Société Madacompost Producteur de l'Itasy
FumI	Amendements organiques	Fumiers	NF U44-051	Fermentation des déjections de bovins (excréments + urine) collectées sur des résidus végétaux principalement constitués de paille de riz et préparées dans un parc rudimentaire	

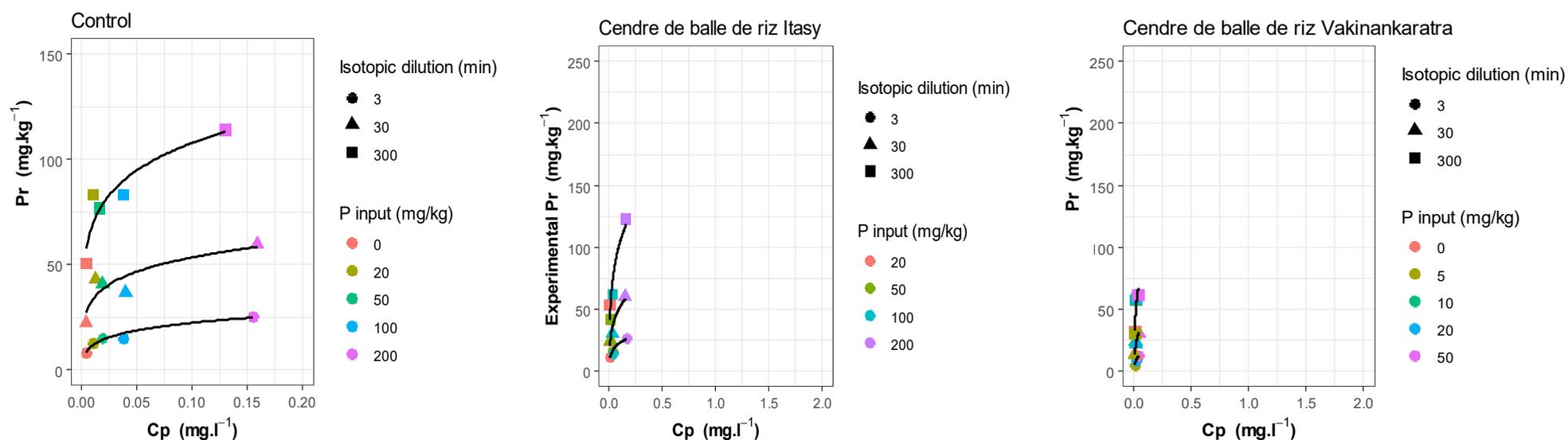
FumV	Amendements organiques	Fumiers	NF U44-051	Fermentation de déjections (fèces + urines) de bovins collectées sur des litières végétales constituées principalement par de la paille de riz. Le produit est préparé et stocké dans un endroit clos (étable, récipient pour la récupération du produit, ...).	Producteur du Vakinankaratra
PP	Amendements organiques	Déjections animales sans litières	NF U44-051	Mélange non fermenté de terre et de fèces de bovins (sans apport de litières), récupéré dans un parc extérieur traditionnel (sans construction spécifique) et stocké à ciel ouvert	Producteur du Vakinankaratra
FieC	Engrais NP entièrement d'origine animale	Guano de chauve-souris	NF U42-001	Produit formé par l'accumulation et le vieillissement naturels d'excréments de chauves-souris. Gisement dans le Sud de Madagascar	Société Guanomad
FieV	Engrais d'origine animale	Fientes de volailles déshydratées	NF U42-001	Produit desséché obtenu par l'accumulation et dessiccation d'excréments de volailles pour la production de poulets de chair commerciaux	Producteur de l'Itasy
CZ	Engrais organiques azotés	Corne broyée	NF U42-001	Produit obtenu par concassage et broyage des cornes de zébu de différents diamètres: farine, semoule, copeaux	Société Madacompost
FarC	Engrais organiques azotés	Farine de crustacés	NF U42-001	Produit obtenu par broyage fin des carapaces de crabe	Société Madacompost
Dol	Engrais apportant du Ca, du Mg, du Na et/ou du S	Dolomie	NF U42-001	Produit d'origine naturelle contenant essentiellement du carbonate double de Ca et de Mg	Société Prochimad
Hyp	Engrais phosphatés	Roche phosphatée + sol volcanique		Produit organo-minéral obtenu à partir du mélange de roche apatitique micronisée et de sol noir volcanique. Connu commercialement sous le nom de Hyperfos	Société Prochimad
NPK	Engrais tertiaires en N, P et K	Engrais de synthèse	NF U42-001		Société Prochimad

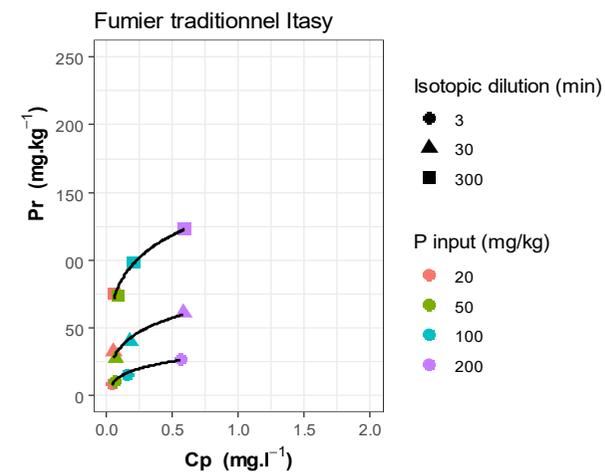
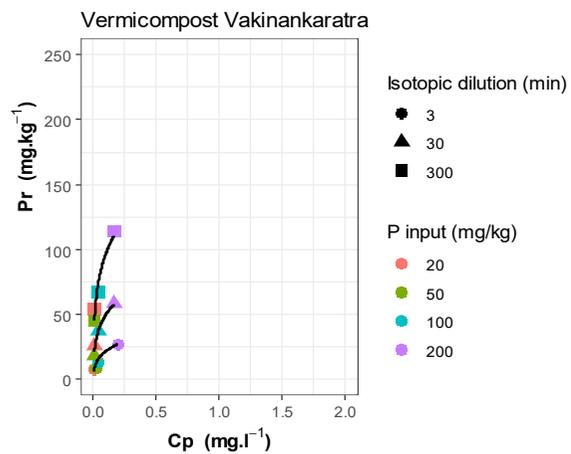
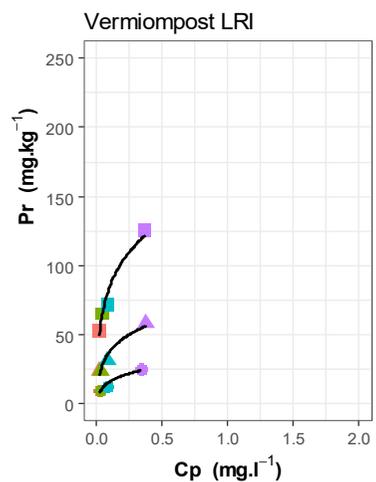
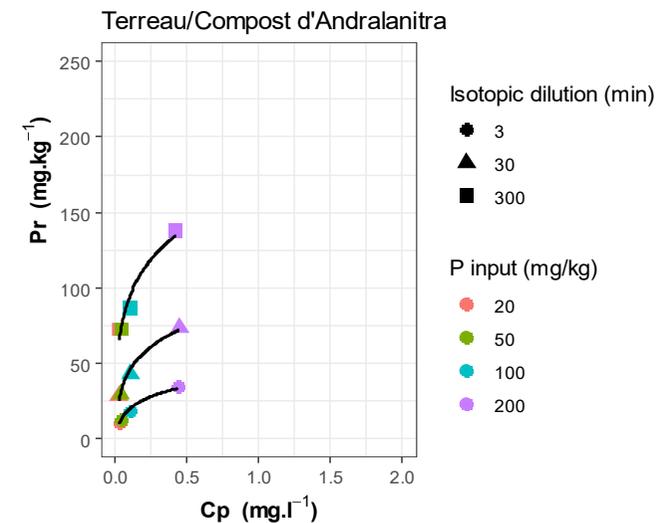
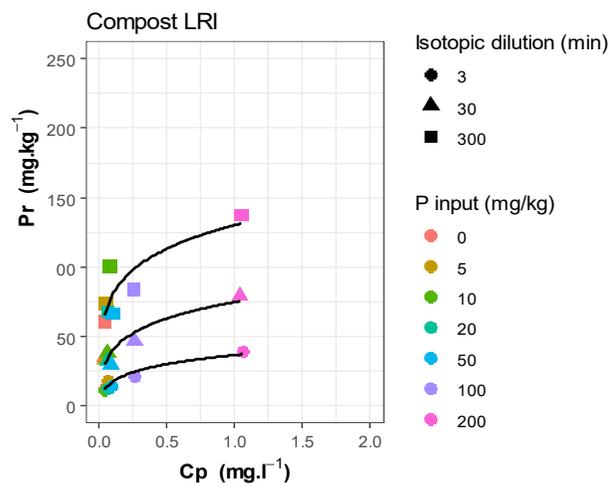
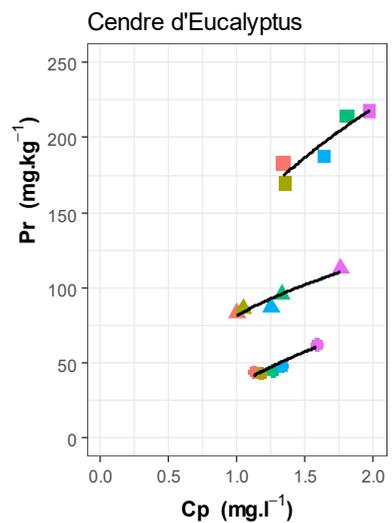
Annexe 2 : Cumulative carbon mineralization rates of the 19 organic and mineral materials measured during 150 days of incubation (g C-CO₂ g⁻¹ C applied).

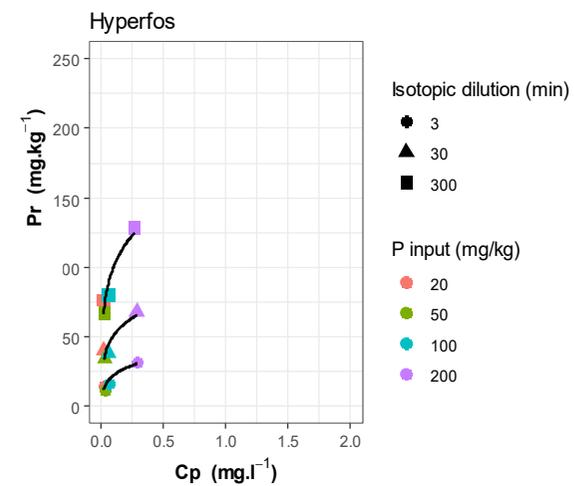
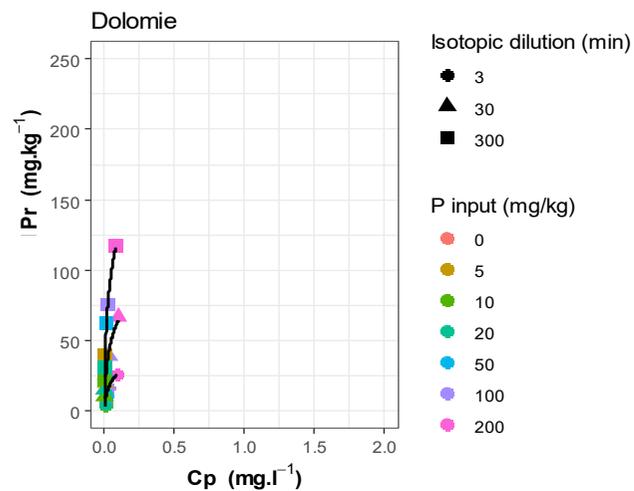
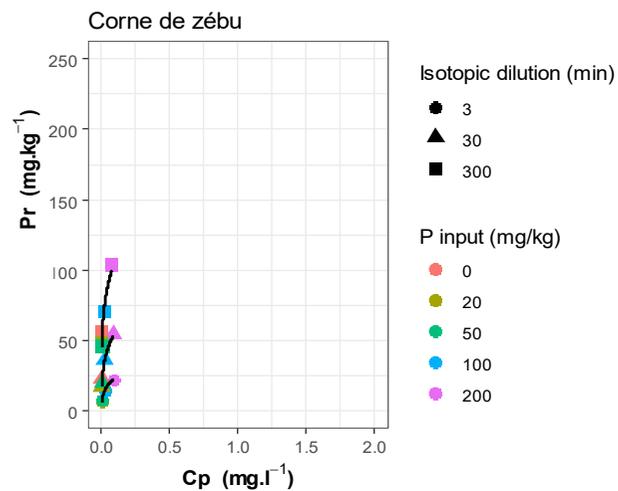
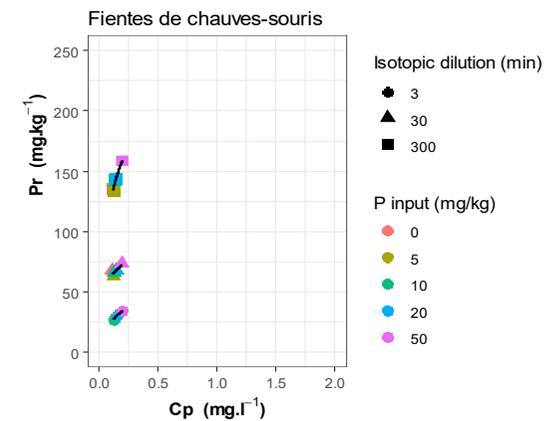
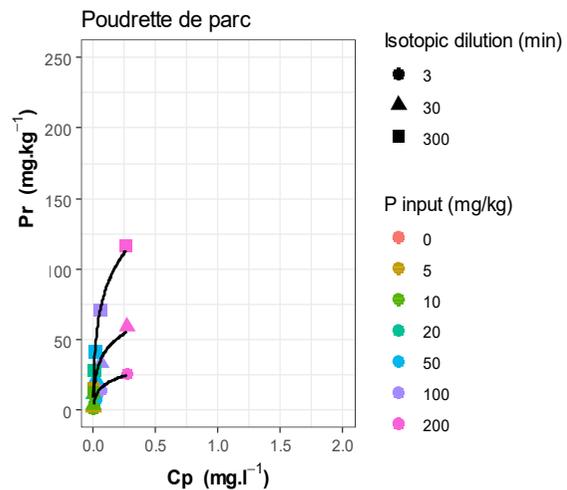
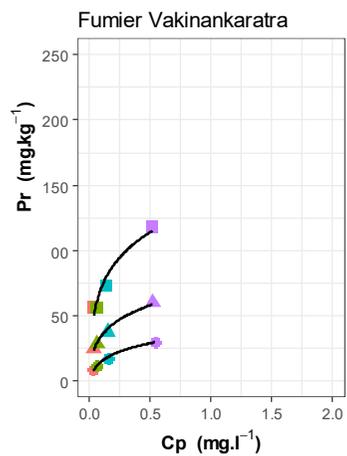
	0	1	3	7	9	14	21	34	47	56	70	95	150
AshH	0	0,14	0,34	0,68	0,88	1,23	1,62	2,07	2,51	2,86	3,36	4,29	4,88
AshS	0	3,76	9,09	17,97	23,25	33,13	43,86	56,06	69,82	81,56	100,92	127,81	149,09
AshE	0	2,93	5,32	8,60	10,27	12,73	14,81	17,46	20,72	23,36	26,34	30,11	32,14
ComL	0	0,06	0,10	0,17	0,20	0,26	0,33	0,41	0,48	0,55	0,63	0,77	0,87
VCL	0	0,04	0,09	0,15	0,19	0,26	0,34	0,43	0,53	0,60	0,70	0,88	0,99
VCV	0	0,04	0,09	0,17	0,21	0,30	0,40	0,52	0,65	0,75	0,88	1,09	1,21
VCT	0	0,03	0,06	0,12	0,15	0,21	0,27	0,35	0,43	0,49	0,58	0,73	0,83
ComM	0	0,13	0,21	0,31	0,37	0,47	0,57	0,70	0,84	0,95	1,13	1,40	1,58
ComT	0	0,11	0,23	0,41	0,51	0,71	0,91	1,18	1,50	1,76	2,01	2,61	2,93
Tar	0	0,25	0,45	0,74	0,90	1,19	1,51	1,92	2,41	2,81	3,50	4,24	4,83
ManI	0	0,03	0,06	0,11	0,14	0,19	0,24	0,31	0,38	0,43	0,50	0,61	0,68
ManV1	0	0,04	0,08	0,12	0,16	0,22	0,29	0,38	0,47	0,54	0,63	0,77	0,84
ManV2	0	0,03	0,07	0,12	0,16	0,22	0,30	0,41	0,51	0,59	0,69	0,86	0,98
PP	0	0,04	0,09	0,17	0,21	0,30	0,40	0,52	0,64	0,73	0,86	1,08	1,22
DroG	0	0,20	0,48	0,91	1,12	1,54	1,98	2,45	2,96	3,34	3,98	4,93	5,50
DroP	0	0,14	0,32	0,52	0,60	0,73	0,85	0,96	1,08	1,17	1,28	1,43	1,52
ZH	0	0,02	0,03	0,07	0,08	0,12	0,16	0,21	0,27	0,32	0,38	0,49	0,55
Dol	0	0,55	0,95	1,39	1,60	1,94	2,29	2,68	3,10	3,46	3,92	4,58	4,96
Hyp	0	1,93	4,50	8,93	11,61	16,52	21,72	28,16	35,40	41,31	49,47	62,46	70,32

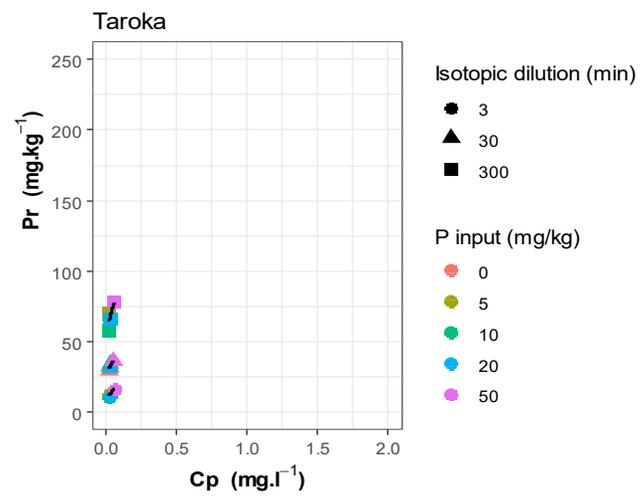
Annexe 3 : Valeurs expérimentales (symboles) et ajustées (lignes) de la quantité d'ions orthophosphates diffusibles (Pr) à l'interface solide-solution en fonction de la durée de transfert ($t = 3, 30$ et 300 minutes) et de leur concentration dans la solution du sol (C_p) des sols fertilisés par des matières fertilisantes disponibles sur les Hautes Terres de Madagascar.

L'ajustement statistique a été réalisé avec la fonction cinétique de Freundlich ($Pr = vC_p w t^p$, avec Pr bornée par valeur limite). La gamme des valeurs de C_p a été obtenue en apportant différentes doses de P-KH₂PO₄ et attendu une durée de sorption d'environ 40h avant de mesurer les cinétiques de dilution isotopique et les valeurs de C_p .









Annexe 5 : Liste des assemblages testés en serre

CB	FumV. CZ. Tar	VCT. CB. CE	FumV. FarC. FieV	CZ. FarC. Hyp
CE	FumV. VCV. Tar	VCT. CB. FieV	FumV. FarC. FieC	CZ. FarC. NPK
ComM	PP. CB. FieV	VCT. Dol. FieV	FumV. FarC. Hyp	CZ. CB. CE
ComT	FumI. VCT. PP	VCT. FarC. CE	FumV. FarC. NPK	CZ. CB. FieV
CZ	PP. CB. FieC	VCT. Dol. FieC	FumV. CB. CE	CZ. CB. FieC
Dol	FumV. CZ. VCT	VCT. FarC. Hyp	FumV. CB. FieV	CZ. CB. Hyp
FarC	FumV. CZ. ComT	VCT. FarC. NPK	FumV. CB. FieC	CZ. CB. NPK
FieC	ComM. Tar. PP	VCT. CB. Hyp	FumV. CB. Hyp	VCV. Dol. CE
FieV	ComM. VCV. Tar	VCT. CB. FieC	FumV. CB. NPK	VCV. Dol. FieV
FumI	PP. FarC. FieV	VCV. CB. NPK	Tar. Dol. FieV	VCV. Dol. FieC
FumV	PP. FarC. FieC	VCT. Dol. CE	Tar. Dol. FieC	VCV. Dol. Hyp
Hyp	ComM. Dol. CE	VCT. CB. NPK	Tar. Dol. Hyp	VCV. Dol. NPK
NPK	ComM. Dol. FieV	ComT. Dol. CE	Tar. FarC. FieV	VCV. FarC. CE
PP	FumV. CZ. VCV	VCT. FarC. FieC	Tar. FarC. FieC	VCV. FarC. FieV
Tar	FumI. ComT. PP	VCT. FarC. FieV	Tar. CB. FieV	
VCT	FumI. ComM. Tar	VCT. Dol. NPK	Tar. CB. FieC	
VCV	FumI. ComM. VCT	VCT. Dol. Hyp	PP. Dol. FieV	
FumI. Dol. CE	ComM. Dol. FieC	ComT. Dol. FieV	PP. Dol. FieC	
FumI. Dol. FieV	ComM. Dol. Hyp	ComT. Dol. FieC	PP. Dol. Hyp	
FumI. Dol. FieC	ComM. Dol. NPK	ComT. Dol. Hyp		
FumI. Dol. Hyp	ComM. FarC. CE	ComT. Dol. NPK		
FumI. Dol. NPK	ComM. FarC. FieV	ComT. FarC. CE		
FumI. FarC. CE	ComM. FarC. FieC	ComT. FarC. FieV		
FumI. FarC. FieV	ComM. FarC. Hyp	ComT. FarC. FieC		
FumI. FarC. FieC	ComM. FarC. NPK	ComT. FarC. Hyp		
FumI. FarC. Hyp	ComM. CB. CE	ComT. FarC. NPK		
FumI. FarC. NPK	ComM. CB. FieV	ComT. CB. CE		
FumI. CB. CE	ComM. CB. FieC	ComT. CB. FieV		
FumI. CB. FieV	ComM. CB. Hyp	ComT. CB. FieC		
FumI. CB. FieC	ComM. CB. NPK	ComT. CB. Hyp		
FumI. CB. Hyp	CZ. Dol. CE	ComT. CB. NPK		
FumI. CB. NPK	CZ. Dol. FieV	VCV. CB. FieC		
FumV. Dol. CE	CZ. Dol. FieC	VCV. CB. Hyp		
FumV. Dol. FieV	CZ. Dol. Hyp	VCV. FarC. FieC		
FumV. Dol. FieC	CZ. Dol. NPK	VCV. FarC. Hyp		
FumV. Dol. Hyp	CZ. FarC. CE	VCV. FarC. NPK		
FumV. Dol. NPK	CZ. FarC. FieV	VCV. CB. CE		
FumV. FarC. CE	CZ. FarC. FieC	VCV. CB. FieV		

Annexe 6 : Caractéristiques des matières fertilisantes organiques et minérales utilisées dans les expériences d'assemblage

	MS	Cendre	C	N	P	S	CN	K	Ca	Mg	pH _{eau}
	g kg ⁻¹										
CB	980	915,3	31,7	1,90	1,20	0,9	164,9	6,9	1,6	0,8	7,7
CE	980	901,7	63,5	0,50	39,10	1,0	1322,5	84,5	84,4	22,1	11,2
CP	980	951,10	1,2	0,26	1,31	0,6	4,5	6,3	1,1	0,8	9,79
ComM	840	722,5	166,2	13,60	4,70	1,1	122,5	5,3	44,0	9,1	8,1
ComT	940	800,1	112,9	6,00	3,70	2,0	188,8	2,6	9,0	1,9	7,8
VCL	950	484,6	217,0	12,40	3,90	2,0	175,0	3,9	27,7	3,0	8,2
VCT	460	514,90	231,3	19,99	3,75	3,0	11,6	17,1	7,6	3,8	8,10
VCV	950	698,1	143,9	12,20	1,80		118,0	3,2	5,0	2,4	7,2
Tar	760	846	71,5	4,10	3,80	0,1	174,5	4,8	28,3	2,9	8
FumI	360	477,3	243,5	16,50	3,50		147,4	36,8	6,7	3,0	9,1
FumV	500	464,5	195,3	15,10	2,90		129,5	19,9	10,7	3,3	8,4
PP	930	659,1	140,5	10,30	1,60	1,5	136,1	6,9	3,6	2,6	8,7
FieC	810	783,6	44,6	12,60	68,50	45,9	35,5	2,2	61,7	4,4	6,4
FieV	440	594,4	196,1	25,70	25,50	0,0	76,3	21,5	103,3	7,0	8,7
CZ	890	76,8	460,4	155,00	1,20	31,1	29,7	0,5	3,4	0,4	5,9
Dol	990	980,80	101,5	0,02	0,02		5341,4	0,1	191,3	73,4	9,31
FarC	780	624,80	121,6	11,33	11,99		10,7	3,4	115,0	13,9	7,50
Hyp	880	958,5	3,4	0,40	82,90	0,2	91,4	0,3	79,2	1,7	7,9
Lis	460	63,64	270,2	25,58	15,43		10,6	8,8	14,9	16,9	7,18

Annexe 7 : Résultats de la typologie des matières fertilisantes à l'aide du modèle combinatoire

Tableau 23 : Sur les variables de croissance

	BA	BR	Sh/R	BT	Hauteur	Nb feuilles
R²	0,85	0,54	0,47	0,59	0,73	0,65
E	0,69	0,31	0,20	0,42	0,61	0,39
E/R²	82%	57%	41%	71%	83%	61%
Nombre de groupes formés	4	3	3	3	3	3
a	{ CZ }	{ FumV }	{ CZ, Tar }	{ CZ }	{ CZ, FumV }	{ CZ }
b	{ FumV, FumI }	{ FarC, FumI, FieV, Hyp, ComM, NPK, PP, Tar, VCT, VCV }	{ Dol, FieV, FumV, Hyp, NPK, VCV }	{ FumV }	{ CE, FarC, FieV, FieC, Tar, VCT }	{ CB, Dol, Hyp, ComM, VCT, ComT }
c	{ FarC, Hyp, ComM, NPK, VCT }	{ CB, CE, CZ, Dol, FieV, ComT }	{ CB, CE, FarC, FumI, FieC, ComM, PP, VCT, ComT }	{ CB, CE, Dol, FarC, FieV, FumI, FieC, Hyp, ComM, NPK, PP, Tar, VCT, Ter, VCV }	{ CB, Dol, FumI, Hyp, ComM, NPK, PP, ComT, VCV }	{ CE, FarC, FieV, FumI, FumV, FieC, NPK, PP, Tar, VCV }
d	{ CB, CE, Dol, FieV, FieC, PP, Tar, ComT, VCV }					
3 motifs d'assemblage à forte performance	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)
3 motifs d'assemblage à faible performance	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)

Tableau 24 : Sur l'activité photosynthétique

	NDVI	PRI	SPAD
R²	0,93	0,71	0,87
E	0,86	0,55	0,82
E/R²	92%	78%	94%
Nombre de groupes formés	5	4	3
a	{ ComM, VCT, ComT, VCV }	{ FumV, FumI }	{ CZ }
b	{ CZ }	{ CZ, Hyp }	{ FieC, ComM, ComT, VCV }
c	{ CB, FumV, FumI, FieC, Tar }	{ CB, CE, FieC, VCT, VCV }	{ CB, CE, Dol, FarC, FieV, FumV, FumI, Hyp, NPK, PP, Tar, VCT }
d	{ FarC, FieV }	{ Dol, FarC, FieV, ComM, NPK, PP, Tar, ComT }	
e	{ CE, Dol, Hyp, NPK, PP }		
3 motifs d'assemblage à forte performance	bd (1) be (3) bde (4)	bc (5) bd (12) bcd (12)	abc (5) ac (14)
3 motifs d'assemblage à faible performance	cde (11) de (2) c (3)	acd (14) ad (10) ac (3)	bc (65) c (43)

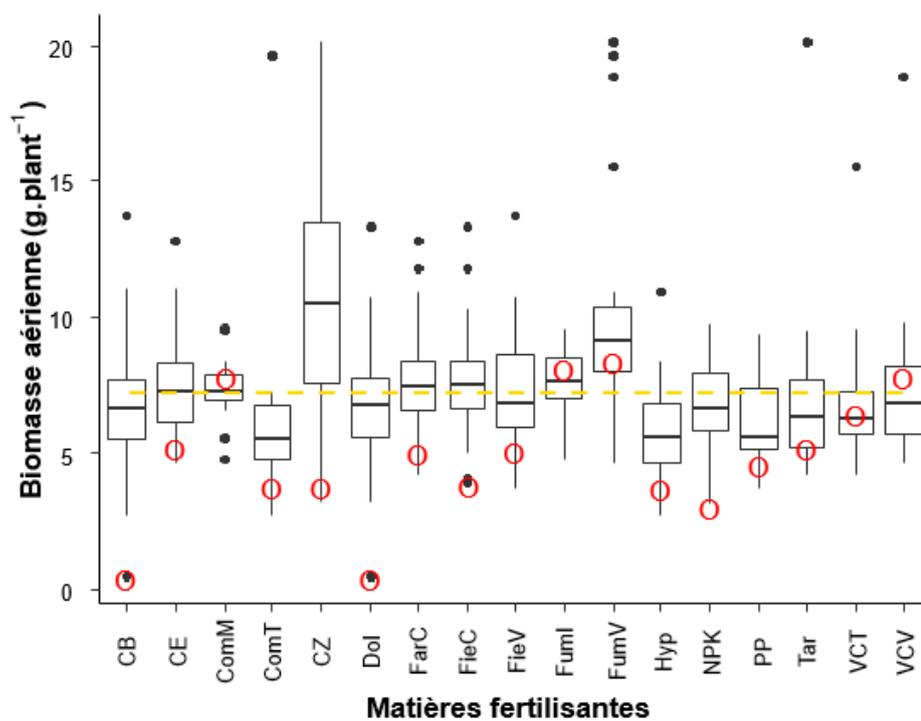
Tableau 25 : Sur les quantités en nutriments contenus dans la biomasse aérienne

	Sh_C	Sh_N	Sh_P	Sh_Ca	Sh_Mg	Sh_K
R²	0,96	0,90	0,83	0,84	0,69	0,68
E	0,87	0,56	0,72	0,57	0,56	0,41
E/R²	91%	63%	88%	68%	82%	60%
Nombre de groupes formés	4	4	4	5	3	3
a	{ CZ }	{ CZ }	{ FumV, FumI }	{ CZ, ComM }	{ CZ }	{ CZ }
b	{ Dol, Hyp, ComM, NPK, VCV }	{ FumV, Hyp, FarC, NPK, Tar }	{ Hyp, NPK }	{ FarC, Hyp, NPK, ComT }	{ Fie, ComT }	{ CE, FumV, FumI, ComM, PP, Tar }
c	{ FarC, Fie, FumV }	{ Dol, Fie, ComM, PP }	{ FarC, Fie, FieC, ComM, PP }	{ FieC, VCT }	{ CB, CE, Dol, FarC, FumV, FumI, FieC, Hyp, ComM, NPK, PP, Tar, VCT, VCV }	{ CB, Dol, FarC, Fie, FieC, Hyp, NPK, VCT, ComT, VCV }
d	{ CB, CE, FumI, FieC, PP, Tar, VCT, ComT }	{ CB, FumI, VCV, CE, FieC, VCT, ComT }	{ CB, CE, CZ, Dol, Tar, VCT, ComT, VCV }	{ Fie, FumV }		
e				{ CB, CE, Dol, FumI, PP, Tar, VCV }		
3 motifs d'assemblage à forte performance	acd (5) ad (2) ac (1)	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)
3 motifs d'assemblage à faible performance	cd (23) bd (38) d (10)	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 26 : : Sur les quantités en nutriments contenus dans la biomasse racinaire

	R C	R N	R P	R Ca	R Mg	R K
R²	0,52	0,92	0,24	0,77	0,72	0,60
E	0,27	0,75	0,09	0,48	0,59	0,29
E/R²	51%	82%	38%	62%	81%	47%
Nombre de groupes formés	3	5	2	5	3	4
a	{ FumV }	{ CZ }	{ FumV }	{ CZ, Fie, ComM }	{ FumV }	{ FumV, FumI, VCV }
b	{ CE, CZ, FarC, Fie }	{ CB, CE, FumV, Tar }	{ CB, CE, CZ, Dol, FarC, Fie, FumI, FieC, Hyp, ComM, NPK, PP, Tar, VCT, ComT, VCV }	{ FarC, VCT }	{ CE, FarC, Fie, VCT }	{ CE, Dol, Fie, ComT }
c	{ CB, Dol, FumI, FieC, Hyp, ComM, NPK, PP, Tar, VCT, ComT, VCV }	{ FarC, Fie, NPK }		{ Dol, VCV }	{ CB, CZ, Dol, FumI, FieC, Hyp, ComM, NPK, PP, Tar, ComT, VCV }	{ CB, FieC, ComM, VCT }
d		{ Dol, ComT, VCV }		{ CE, FumV, FieC }		{ CZ, FarC, Hyp, NPK, PP, Tar }
e		{ FumI, FieC, Hyp, ComM, PP, VCT }		{ CB, FumI, Hyp, NPK, PP, Tar, ComT }		
3 motifs d'assemblage à forte performance	abc(11) b (2) ab (2)	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)
3 motifs d'assemblage à faible performance	bc (66) ac (7) c (42)	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)

Annexe 8 : Statistiques descriptives de la performance des matières seules ou en assemblage sur la biomasse aérienne. Les figurés en rouge indiquent la performance des matières seules.



Annexe 9 : Liste des assemblages testés au champ

CB	ComT. Dol. FieC	FarC. FieC. NPK	PP. Dol. CE	VCV. CB. NPK
CB. FieC. Hyp	ComT. Dol. FieV	FarC. FieV. FieC	PP. Dol. FieC	VCV. ComT. PP
CB. FieC. Lis	ComT. Dol. Hyp	farC. FieV. Hyp	PP. Dol. FieV	VCV. ComT. Tar
CB. FieC. NPK	ComT. Dol. Lis	FarC. FieV. NPK	PP. Dol. Hyp	VCV. Dol. CE
CB. FieV. FieC	ComT. Dol. NPK	FarC. Hyp. Lis	PP. Dol. Lis	VCV. Dol. FieC
CB. FieV. Hyp	ComT. FarC. CE	FarC. Hyp. NPK	PP. Dol. NPK	VCV. Dol. FieV
CB. FieV. NPK	ComT. FarC. FieC	FarC. NPK. Lis	PP. FarC. CE	VCV. Dol. Hyp
CB. Hyp. Lis	ComT. FarC. FieV	FieC	PP. FarC. FieC	VCV. Dol. Lis
CB. Hyp. NPK	ComT. FarC. Hyp	FieV	PP. FarC. FieV	VCV. Dol. NPK
CB. NPK. Lis	ComT. FarC. Lis	FumI	PP. FarC. Hyp	VCV. FarC. CE
CE	ComT. FarC. NPK	FumI. CB. CE	PP. FarC. Lis	VCV. FarC. FieC
CE. FieC. Hyp	ComT. Tar. PP	FumI. CB. FieC	PP. FarC. NPK	VCV. FarC. FieV
CE. FieV. FieC	CZ	FumI. CB. FieV	Tar	VCV. FarC. Hyp
CE. FieV. Hyp	CZ. CB. CE	FumI. CB. Hyp	Tar. CB. CE	VCV. FarC. Lis
CE. FieV. NPK	CZ. CB. FieC	FumI. CB. Lis	Tar. CB. FieC	VCV. FarC. NPK
CE. Hyp. NPK	CZ. CB. FieV	FumI. CB. NPK	Tar. CB. FieV	VCV. Tar. PP
CE. NPK. Lis	CZ. CB. Hyp	FumI. ComM. ComT	Tar. CB. Hyp	VCV. VCT. ComT
ComM	CZ. CB. Lis	FumI. ComM. CZ	Tar. CB. Lis	VCV. VCT. PP
ComM. CB. CE	CZ. CB. NPK	FumI. ComM. NPK	Tar. CB. NPK	VCV. VCT. Tar
ComM. CB. FieC	CZ. ComT. PP	FumI. ComM. PP	Tar. Dol. CE	
ComM. CB. FieV	CZ. ComT. Tar	FumI. ComM. Tar	Tar. Dol. FieC	
ComM. CB. Hyp	CZ. Dol. CE	FumI. ComM. VCV	Tar. Dol. FieV	
ComM. CB. Lis	CZ. Dol. FieC	FumI. ComT. PP	Tar. Dol. Hyp	
ComM. CB. NPK	CZ. Dol. FieV	FumI. ComT. Tar	Tar. Dol. Lis	
ComM. ComT. PP	CZ. Dol. Hyp	FumI. CZ. ComT	Tar. Dol. NPK	
ComM. ComT. Tar	CZ. Dol. Lis	FumI. CZ. PP	Tar. FarC. CE	
ComM. CZ. ComT	CZ. Dol. NPK	FumI. CZ. Tar	Tar. FarC. FieC	
ComM. CZ. PP	CZ. FarC. CE	FumI. CZ. VCT	Tar. FarC. FieV	
ComM. CZ. Tar	CZ. FarC. FieC	FumI. CZ. VCV	Tar. FarC. Hyp	
ComM. CZ. VCT	CZ. FarC. FieV	FumI. Dol. CE	Tar. FarC. Lis	
ComM. CZ. VCV	CZ. FarC. Hyp	FumI. Dol. FieC	Tar. FarC. NPK	
ComM. Dol. CE	CZ. FarC. Lis	FumI. Dol. FieV	VCT	
ComM. Dol. FieC	CZ. FarC. NPK	FumI. Dol. Hyp	VCT. CB. CE	
ComM. Dol. FieV	CZ. Tar. PP	FumI. Dol. Lis	VCT. CB. FieC	
ComM. Dol. Hyp	CZ. VCT. ComT	FumI. Dol. NPK	VCT. CB. FieV	
ComM. Dol. Lis	CZ. VCT. PP	FumI. FarC. CE	VCT. CB. Hyp	
ComM. Dol. NPK	CZ. VCT. Tar	FumI. FarC. FieC	VCT. CB. Lis	
ComM. FarC. CE	CZ. VCV. ComT	FumI. FarC. FieV	VCT. CB. NPK	
ComM. FarC. FieC	CZ. VCV. PP	FumI. farC. Hyp	VCT. ComT. PP	
ComM. FarC. FieV	CZ. VCV. Tar	FumI. FarC. Lis	VCT. ComT. Tar	
ComM. FarC. Hyp	CZ. VCV. VCT	FumI. FarC. NPK	VCT. Dol. CE	
ComM. FarC. Lis	Dol	FumI. Tar. PP	VCT. Dol. FieC	
ComM. FarC. NPK	Dol. CB. CE	FumI. VCT. ComT	VCT. Dol. FieV	
ComM. Tar. PP	Dol. CE. FieC	FumI. VCT. PP	VCT. Dol. Hyp	
ComM. VCT. ComT	Dol. CE. FieV	FumI. VCT. Tar	VCT. Dol. Lis	
ComM. VCT. PP	Dol. FarC. CE	FumI. VCV. ComT	VCT. Dol. NPK	
ComM. VCT. Tar	Dol. FieC. Hyp	FumI. VCV. PP	VCT. FarC. CE	
ComM. VCV. ComT	Dol. FieC. Lis	FumI. VCV. Tar	VCT. FarC. FieC	
ComM. VCV. PP	Dol. FieC. NPK	FumI. VCV. VCT	VCT. FarC. FieV	
ComM. VCV. Tar	Dol. FieV. FieC	Hyp	VCT. FarC. Hyp	
ComM. VCV. VCT	Dol. FieV. Hyp	Lis	VCT. FarC. Lis	
ComT	Dol. FieV. NPK	NPK	VCT. FarC. NPK	

ComT. CB. CE	Dol. Hyp. Lis	PP	VCT. Tar. PP
ComT. CB. FieC	Dol. Hyp. NPK	PP. CB. CE	VCV
ComT. CB. FieV	Dol. NPK. Lis	PP. CB. FieC	VCV. CB. CE
ComT. CB. Hyp	FarC	PP. CB. FieV	VCV. CB. FieC
ComT. CB. Lis	FarC. CB. CE	PP. CB. Hyp	VCV. CB. FieV
ComT. CB. NPK	FarC. FieC. Hyp	PP. CB. Lis	VCV. CB. Hyp
ComT. Dol. CE	FarC. FieC. Lis	PP. CB. NPK	VCV. CB. Lis

Annexe 10 : Démarche pour la modélisation des effets d'interaction et de composition par analyse combinatoire

Soit, $\alpha = \frac{F_{observée}}{F_{attendue}}$ $\beta = \frac{F_{attendue}}{F_{monoassemblage}}$

Et, A allant de 1 à n , le nombre d'assemblages testés,

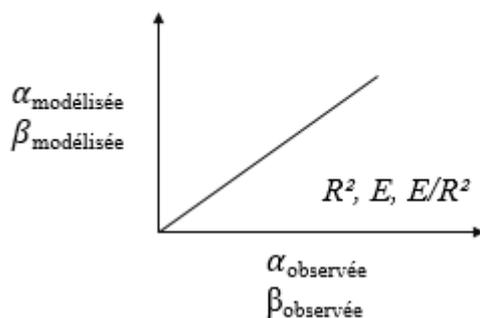
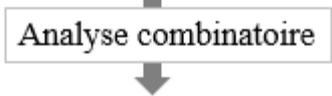
À chaque A_n correspond un α_n et β_n

$A_1 \leftrightarrow \alpha_1$ et β_1

$A_2 \leftrightarrow \alpha_2$ et β_2

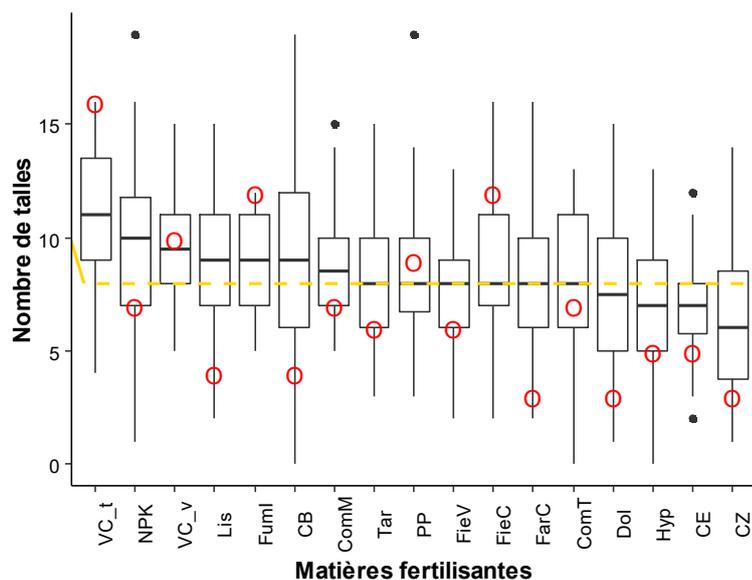
.....

$A_n \leftrightarrow \alpha_n$ et β_n



Annexe 11: Boîtes à moustaches des variables mesurées

(A)



(B)

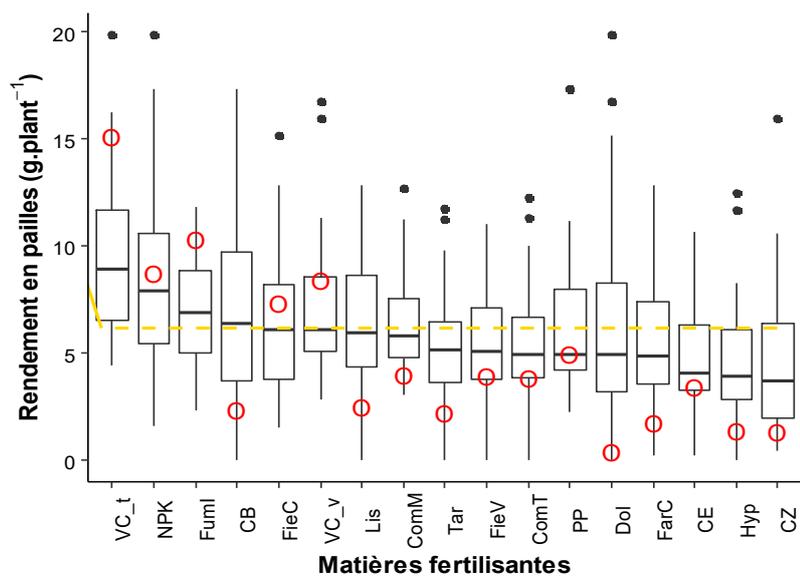


Figure 33 : Répartition de la performance des matières fertilisantes, (A) sur le nombre de talles et (B) sur le rendement en pailles, des matières seules et en assemblage. Les figurés en rouge représentent l'effet des matières seules. Les lignes discontinues verticales représentent la moyenne de tous les assemblages. Les matières fertilisantes apparaissent selon un ordre décroissant des médianes. L'identification des matières fertilisantes est donnée dans le Tableau 17

Annexe 12 : Effets d'interaction et de composition sur la performance des assemblages

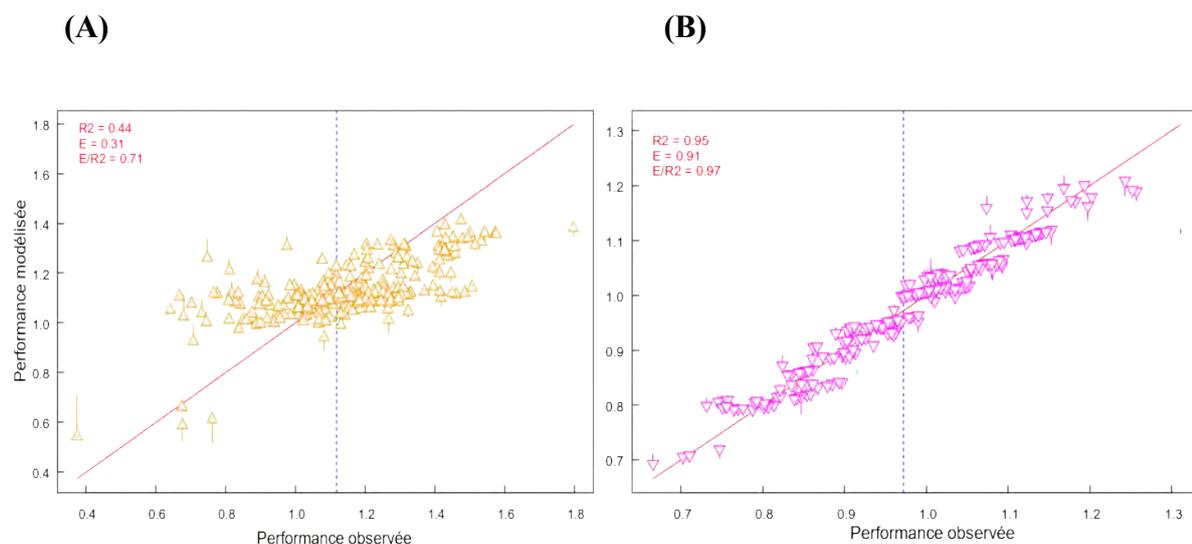


Figure 34 : Relation entre les performances observées et modélisées de la hauteur des plantes à la récolte, suivant une modélisation séparée (A) en effet d'interaction, et (B) en effet de composition.

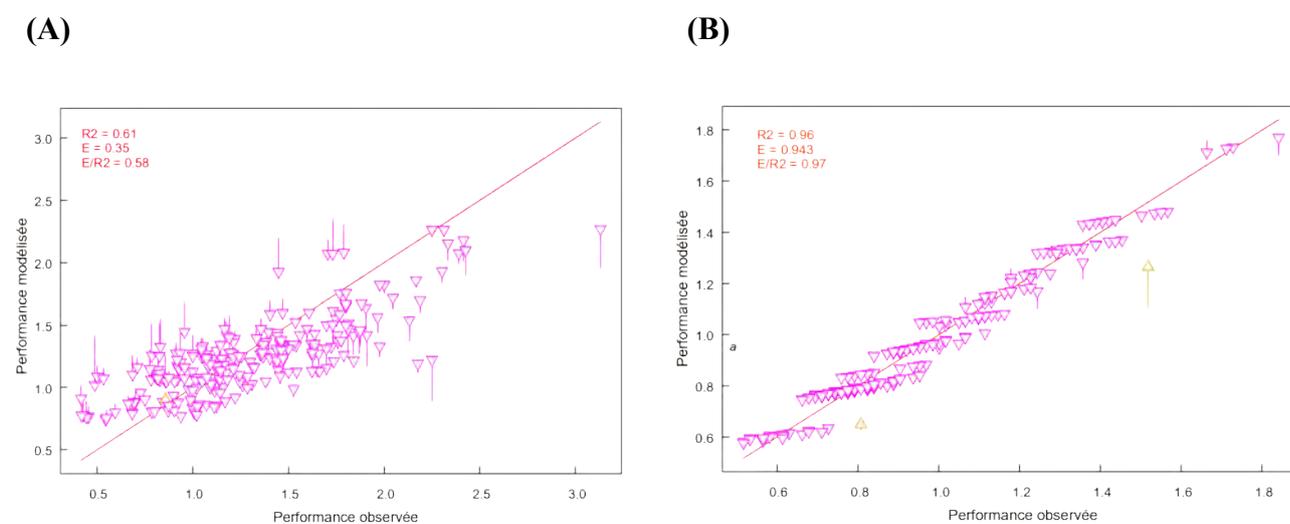


Figure 35 : Relation entre les performances observées et modélisées du nombre de talles fertiles, suivant une modélisation séparée (A) en effet d'interaction, et (B) en effet de composition.

Annexe 13 : Résultats de la classification en cinq groupes des matières fertilisantes sur le rendement en grains

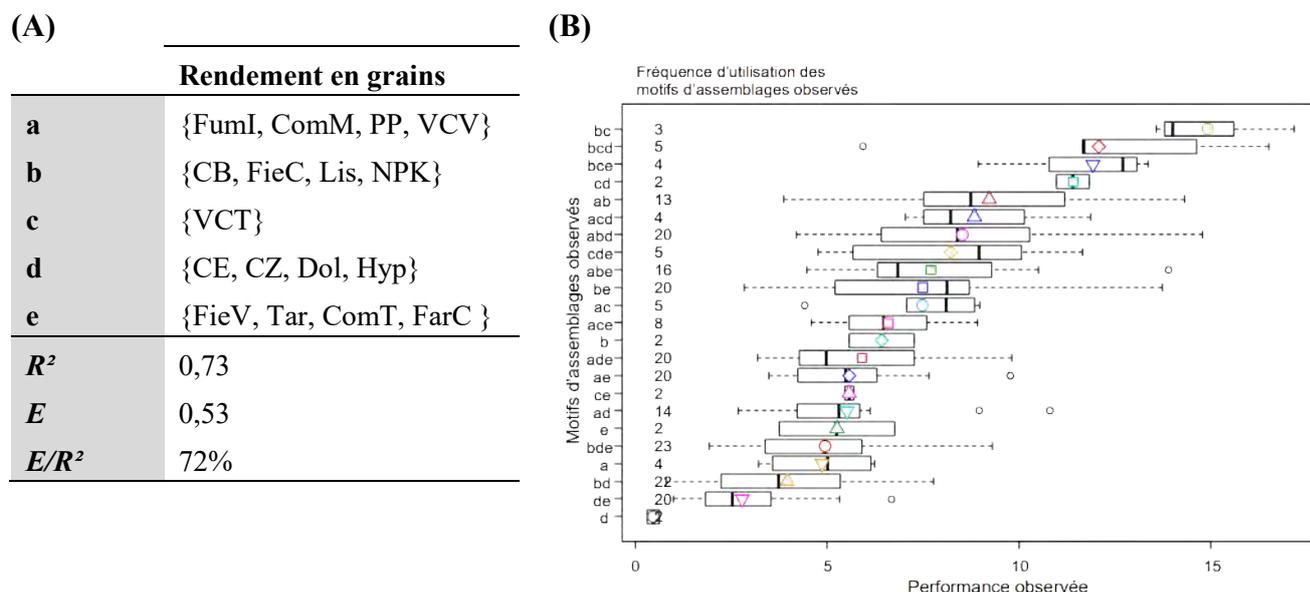


Figure 36 : Résultats de la classification a posteriori en cinq groupes des matières fertilisantes sur le rendement en grains, (A) caractéristique des groupes fonctionnels formés et (B) boîtes à moustaches des performances observées rassemblées par motifs d'assemblage.

Tableau i : Analyse de la variance des performances des assemblages expliquées par les groupes et les interactions entre les groupes sur le rendement en grains

Groupes	Ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	p value	median.diff
a	1	2,97	2,97	14,79	0 ***	0,22
b	1	12,02	12,02	59,92	0 ***	0,43
c	1	24,8	24,8	123,58	0 ***	0,86
d	1	0,71	0,71	3,52	0,06	-0,1
e	1	0	0	0,02	0,89	-0,01
a:c	1	7,82	7,8	39	0 ***	0,59
a:d	1	3,15	3,15	15,69	0 ***	-0,04
c:d	1	1,34	1,34	6,68	0,01 *	0,41
c:e	1	1,35	1,35	6,75	0,01 **	0,34
b:c:d	1	1,01	1,01	5,05	0,03 *	0,5

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$. Les interactions sans effet significatif ne sont pas présentées dans le tableau. Groupe : le nom des groupes fonctionnels. Ddl : degré de liberté. median.diff : la médiane de l'intensité de l'effet induit, le signe donne le sens de l'effet, positif ou négatif.

Annexe 14 : Récapitulatif des effets induits par les matières sur la performance des assemblages

	Hauteur des plantes	Nombre de talles	Production en grains	Production en pailles
Matières à privilégier dans un assemblage	{VCT}, {FumI, FarC, FieC, Lis, NPK},	{VCT}, {FumI, VCV, ComM, ComT, Tar, PP}, {FarC, FieC, CB, NPK, Lis}	{VCT}, {FumI, ComM, PP, VCV}, {CB, FieC, Lis, NPK},	{VCT}, {FumI, VCV}, {CB, Dol, FieC, Lis, NPK},
Matières à éviter dans un assemblage	{CZ, ComT}		{CE, CZ, Dol, Hyp}	{CE, CZ, FarC, FieV, Hyp}
Matières à effet neutre dans un assemblage	{CB, CE, Dol, FieV, Hyp, ComM, PP, Tar, VCV}	{FieV, Hyp, CE, CZ, Dol}	{FieV, Tar, ComT, FarC}	{ComM, PP, Tar, ComT}

Les matières citées dans une même accolade appartiennent au même groupe. L'identification des matières fertilisantes sont données dans le Tableau 17.

Les effets positifs concomitants des matières {VCT}, {FumI}, {FieC}, {Lis} et {NPK} sur toutes les variables étudiées ont été détectés. D'un autre côté, la présence de {CZ}, et dès fois de {CE} et {Hyp} dans un assemblage tendent à diminuer sa capacité. Les autres matières peuvent ensuite avoir d'effet positif, négatif ou nul selon la variable considérée sans tendance très nette. Par exemple, {ComT} ne présente aucun effet significatif sur la hauteur des plantes, alors qu'elle figure parmi les matières à privilégier dans un assemblage pour favoriser la production de talles.