Numéro spécial
Définir et évaluer la qualité/santé des sols

Approche multicritère de pratiques de fertilisation du riz pluvial à Madagascar sur Ferralsol :

Santé du sol, performance agronomique et évaluation paysanne

E. Blanchart(1*), L. Bernard(1), M. Damoiseaux(1), T. Razafimbelo(2), O. Ratsiatosika(2), M. Razafindrakoto(2), S. Raharijaona(2), K. Razanamalala(2), D. Razafimahafaly(2), R. Randriamanantsoa(3), P. Salgado(4), S. Audouin(5a,b,c), A. Ripoche(6), P. Autfray(7), B. Muller(8) et J. Trap(1)

1) Eco&Sols, Univ Montpellier, IRD, INRAE, CIRAD, Institut Agro Montpellier, Montpellier, France
2) Laboratoire des Radio-Isotopes, Université d'Antananarivo, Antananarivo, Madagascar
3) FOFIFA, Antananarivo, Madagascar
4) Selmet, CIRAD, INRAE, Institut Agro Montpellier, Montpellier, France
5a) CIRAD, UMR INNOVATION, Antsirabe, Madagascar
5b) INNOVATION, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, Montpellier SupAgro, Montpellier, France
5c) Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA), SRR, Antsirabe, Madagascar
6) AIDA, CIRAD, Montpellier, France
7) AGAP, INRAe, CIRAD, Institut Agro Montpellier, Antananarivo, Madagascar

* Auteur correspondant : eric.blanchart@ird.fr

RÉSUMÉ

La transition agroécologique repose sur des principes écologiques et agronomiques, intégrant des considérations économiques et sociales. L'amélioration de la santé du sol constitue un enjeu majeur pour renforcer la durabilité et la résilience des agrosystèmes. Toutefois, quantifier cette amélioration reste complexe, et différentes méthodes sont proposées dans la littérature. Cette étude, menée sur les Hautes Terres de Madagascar dans le cadre d'un essai au champ, évalue l'effet de différentes pratiques de fertilisation du riz pluvial sur la santé du sol et sur la performance agronomique des systèmes. Une même approche a *posteriori* a été réalisée pour ces deux objets : une analyse statistique a permis de sélectionner les variables les plus discriminantes entre les traitements étudiés à partir d'un grand nombre de mesures initiales.

Comment citer cet article :
Blanchart E., Bernard L., Damoiseaux M., Razafimbelo T., Ratsiatosika O., Razafindrakoto M., Raharijaona S., Razanamalala K., Razafimahafaly D., Randriamanantsoa R., Salgado P., Audouin S., Ripoche A., Autfray P., Muller B. et Trap J., 2026 - Approche multicritère de pratiques de fertilisation du riz pluvial à Madagascar sur Ferralsol : santé du sol, performance agronomique et évaluation paysanne - Étude et Gestion des Sols, 33, 279-301

Reçu : juillet 2025 ; Accepté : novembre 2026

Cela a permis de construire un indicateur de santé du sol et un indicateur de performance agronomique. Parallèlement, un indicateur d'évaluation paysanne a été établi, reflétant l'appréciation par 40 agriculteurs de ces pratiques de fertilisation et de leurs effets sur la croissance du riz. La réunion de ces trois indicateurs dans une analyse multicritère permet d'apprécier la performance globale des pratiques de fertilisation et leur potentiel d'adoption par les agriculteurs.

Mots-clés
Indicateurs de santé du sol, fonctions écologiques du sol, restauration, fertilité, Hautes Terres de Madagascar, propriétés du sol

SUMMARY
MULTI-CRITERIA APPROACH TO RAINFED RICE FERTILIZATION PRACTICES IN MADAGASCAR ON FERRALSOL: Soil health, agronomic performance and farmer assessment

The agroecological transition is based on ecological and agronomic principles, while also integrating economic and social considerations. Improving soil health is a major challenge for enhancing the sustainability and resilience of agrosystems. However, quantifying this improvement in soil health remains complex, and various methods are proposed in the literature. This study, conducted in the Highlands of Madagascar as part of a field trial, evaluates the effect of different fertilization practices for rainfed rice on soil health and the agronomic performance of the systems. The same a posteriori approach was used for both of these aspects: a statistical analysis enabled the selection of the most discriminating variables between the treatments studied from a large number of initial measurements. This led to the development of a soil health indicator and an agronomic performance indicator. In parallel, an indicator based on farmer's assessment was developed, reflecting the assessment by 40 farmers of these fertilization practices and their effects on rice growth. Combining these three indicators in a multi-criteria analysis provides insights into the overall performance of fertilization practices and their potential for adoption by farmers.

Key-words
Soil health indicators, soil ecological functions, restoration, fertility, Madagascar Highlands, soil properties

RESUMEN
ENFOQUE MULTICRITERIO PARA LAS PRÁCTICAS DE FERTILIZACIÓN DEL ARROZ DE SECANO EN MADAGASCAR EN FERRALSOL: Salud del suelo, rendimiento agronómico y percepciónes de los agricultores

La transición agroecológica se basa en principios ecológicos y agronómicos, integrando también consideraciones económicas y sociales. Mejorar la salud del suelo es un reto importante para fortalecer la sostenibilidad y la resiliencia de los agrosistemas. Sin embargo, cuantificar esta mejora sigue siendo complejo, y en la literatura se proponen diferentes métodos. Este estudio, realizado en las Tierras Altas de Madagascar como parte de un ensayo de campo, evalúa el efecto de diferentes prácticas de fertilización para arroz de secano sobre la salud del suelo y el rendimiento agronómico de los sistemas. Se empleó el mismo enfoque a posteriori para ambos objetivos: un análisis estadístico permitió seleccionar las variables más discriminantes entre los tratamientos estudiados a partir de un gran número de mediciones iniciales. Esto permitió construir un indicador de salud del suelo y un indicador de rendimiento agronómico. Simultáneamente, se estableció un indicador de percepción de los agricultores, que refleja las valoraciones de 40 agricultores sobre estas prácticas de fertilización y sus efectos en el crecimiento del arroz. La combinación de estos tres indicadores en un análisis multicriterio permite evaluar el desempeño general de las prácticas de fertilización y su potencial de adopción por parte de los agricultores.

Palabras clave
Indicadores de salud del suelo, funciones ecológicas del suelo, restauración, fertilidad, tierras altas de Madagascar, propiedades del suelo

FINTINA
FANDALINANA MIFOTOTRA AMIN'NY FEPETRA MARO MOMBA NY FAMPIASANA ZEZIKA ENY AMIN'NY VARY AN-TANETY : Ny fahasalaman'ny tany, ny fahatsaran'ny vokatra, ary ny fahatsapan'ny tantsaha ny fampiasana zezika

Ny fironanana mankany amin'ny agroekolojia dia miorina amin'ny fanekena ny fitsipika ekolojika sy agronomika, ary mandray an-tanana ihany koa ny fitsipika ara-toekarena sy sosialy. Ny fanatsarana ny fahasalaman'ny tany dia fomba iray ifotoran'ny rafi-pambolena maharitra sy afaka miatrika amin'ny fiovan'ny toetr'andro. Sarotra ny mandrefy ny fanatsarana ny fahasalaman'ny

tany, ary misy fomba maro ahafahana manatanteraka izany araka ny voalazan'ny literatiora. Ity fikarohana ity, izay notanterahina tany amin'ny faritra afovoan-tany ao Madagasikara, ary mampiasa andrana voafehy, dia miezaka ny mandrefy ny vokatry ny fampiasana karazan-jezika maro eo amin'ny fambolena vary an-tanety, ary mijery ny vokatr' izany eo amin'ny hatsaran'ny vokatra sy ny fahasalaman'ny tany. Fomba fiasa mitovy izay miompana amin'ny fampitahana natao taorian'ny fanaovana andrana no nampiharina. Fanadihadiana statistika no nahafahana nifantina ireo maridrefy izay tena mampivoitra ny fahasamihafana eo amin'ny karazan-jezika, tamin' ny alalan'ny fanaovana refy maro isankarazany. Ny valim-pikarohana dia nahafahana nanasongadina maridrefy voatokana ho an'ny fahasalaman'ny tany ary maridrefy voatokana ho an'ny fahatsaran'ny vokatra. Nandritra ny fikarohana dia nisy ihany koa ny fametrahana maridrefy mahakasika ny fahatsapan'ny tantsaha ireo karazan-jezika ireo sy izay mety ho fifandraisan'izany amin'ny fomba fanirian'ny vary. Rehefa nofakafakaina sy nampandalovina masontsivana maro ireo maridrefy telo ireo dia ahafahana mahita taratra ny fahombiazan'ireo fampiasana karazan-jezika ireo ary koa ny mety fahazotoan'ny tantsaha hampiasa izany. Ny fampitahana ireo maridrefy telo ireo amin'ny alalan'ny fandalinana mifototra amin'ny fepetra maro dia ahafahana manombana ny fahombiazan'ireo fampiasana karazan-jezika ireo ary koa ny mety ho fahazotoan'ny tantsaha hampiasa izany.

Teny manan-danja
Maridrefy, fahasalaman'ny tany, fanarenana ny fahasalaman'ny tany, fahavokaran'ny tany, faritra afovoan-tany, toetry ny tany

1. INTRODUCTION

Dans le contexte actuel du réchauffement climatique, de l'insécurité alimentaire, de la surexploitation des ressources naturelles ainsi que de la perte drastique de la biodiversité, le modèle agroécologique suscite un intérêt croissant dans les politiques agricoles, les travaux de recherche et les mouvements paysans. Cette approche renforce l'importance des processus écologiques au sein des agrosystèmes, dans le but de renforcer la fourniture de services écosystémiques et de contribuer à l'amélioration du bien-être humain. Le développement de l'agroécologie repose sur un certain nombre de principes (FAO, 2019 ; HLPE, 2019), dont certains concernent directement le compartiment sol, désormais considéré comme un élément majeur à prendre en compte dans la transition agroécologique. Ces principes affectant le sol sont : la mobilisation de la biodiversité cultivée, la moindre utilisation d'intrants de synthèse, une meilleure efficience d'utilisation des ressources organiques et l'amélioration de la santé du sol. Dans cet article, la santé du sol est définie comme la capacité d'un sol à fournir des services écosystémiques (Lehmann *et al*., 2020). La transition vers l'agroécologie demeure néanmoins une démarche complexe et exigeante, nécessitant la co-construction de connaissances et de solutions innovantes avec une diversité d'acteurs - dont les agriculteurs - comme le promeuvent les principes mentionnés ci-dessus (FAO, 2019 ; HLPE, 2019). Ainsi, les nouvelles pratiques agroécologiques co-construites en étroite collaboration entre les acteurs de la recherche et les acteurs de l'agriculture, doivent couvrir une diversité de fonctions et d'objectifs portés par les différents acteurs : répondre aux besoins de producteurs variés, soutenir la production agricole et permettre une intensification des fonctions du sol (rassemblées ici sous le terme de santé du sol) pour assurer la résilience et la durabilité des systèmes de production.

Bien que l'intérêt de maintenir et renforcer les fonctions du sol pour la performance et la durabilité des systèmes agricoles soit largement reconnu (Brussaard *et al*., 2007 ; Barrios 2007 ; Altieri, 1999 ; de Deyn *et al*., 2004 ; Blanchart et Trap, 2020), il reste difficile d'établir des déterminants clairs du fonctionnement du sol et de comprendre les liens complexes entre biodiversité du sol, fonctions écologiques et services écosystémiques rendus par le sol (incluant la production agricole, la séquestration du carbone, etc.). Cette incertitude explique en partie pourquoi le sol et en particulier sa composante biotique ont globalement été négligés dans la conception des agrosystèmes. Comprendre cette complexité du fonctionnement du sol et sa réponse aux diverses pratiques agricoles constitue ainsi un objectif de recherche majeur pour le développement d'agroécosystèmes durables et résilients.

La caractérisation de la santé du sol a fait l'objet de très nombreux écrits au cours des dernières années, mobilisant des approches scientifiques variées selon les paramètres édaphiques étudiés (physiques, chimiques, biologiques), les échelles (temporelles et spatiales) mobilisées, et selon des modalités (Obriot *et al*., 2016, Bünemann *et al*., 2018 ; Lehmann *et al*., 2020 ; Bockstaller et Cousin, 2024). Il est possible de distinguer des approches purement expertes dans lesquelles les paramètres à mesurer sont définis *a priori*, ou plus statistiques dans lesquelles de nombreux paramètres sont mesurés afin d'en sélectionner *a posteriori* et de manière statistique, les plus discriminants. L'ensemble des paramètres mesurés, appelés « descripteurs », sont ensuite, dans la plupart des études, intégrés dans des indicateurs globaux de santé du sol.

L'agriculture des Hautes Terres malgaches est caractérisée par de nombreuses contraintes qui limitent fortement la productivité et la durabilité : faible fertilité des sols (Razafimbelo *et al*., 2022), très petites surfaces agricoles et pauvreté des exploitations

(75 % des exploitants vivent sous le seuil de pauvreté) (Mulangu *et al*., 2024), manque d'accès aux intrants et présence de nombreux bioagresseurs (Grislain *et al*., 2025), changement climatique qui occasionne notamment une modification du régime des pluies perturbant les calendriers agricoles (Randriamarolaza et Aguilar, 2023), etc. La fertilisation est principalement assurée par l'usage de fumier et de quelques autres matières organiques (ou issues de matières organiques comme les cendres de balles de riz), ainsi que d'engrais minéraux utilisés dans une bien moindre mesure et à très faibles doses. La gestion des adventices est essentiellement assurée par le labour et le sarclage, essentiellement manuels. En raison de la faiblesse des facteurs de production et de la difficulté d'accès à la biomasse organique dans un milieu à forte saturation foncière, les leviers d'action pour la fertilisation des sols par les agriculteurs malgaches sont restreints. L'intensification de la santé du sol constitue ainsi une voie d'amélioration des fonctions écologiques du sol nécessaires à la performance productive des agrosystèmes. Dans ce contexte, de nombreux travaux ont souligné les rôles majeurs joués par les organismes, en particulier les microorganismes libres et symbiotiques, les nématodes et les vers de terre sur le recyclage des nutriments, la croissance et la nutrition de la plante dans ces sols (Ranoarisoa *et al*., 2018 ; Razanamalala *et al*., 2018 ; Blanchart *et al*., 2020 ; Trap *et al*., 2021a ; Trap *et al*., 2021b ; Ratsiatosika *et al*., 2021 ; Razanamalala *et al*., 2023). Ces organismes étant majoritairement hétérotrophes, leur activité repose principalement sur les apports en matières organiques. Ces apports apparaissent donc nécessaires, non seulement parce qu'ils renferment les nutriments nécessaires à la croissance et au développement des plantes (Raminoarison *et al*., 2019 ; Raminoarison *et al*., 2024), mais aussi pour soutenir l'activité des acteurs biologiques capables de les rendre disponibles (Trap *et al*., 2024 ; Ratsiatosika *et al*., 2024).

La présente étude a été conduite à Madagascar, avec l'objectif de tester de nouvelles pratiques de fertilisation, qui puissent être plus performantes vis-à-vis de la restauration de la santé du sol et plus performantes également vis-à-vis de la croissance et de la production agricole. Nous avons également cherché à savoir si ces pratiques seraient également acceptables par les agriculteurs de la région. C'est pourquoi nous avons associé des agriculteurs à cette étude afin qu'ils fassent part de leur évaluation d'une part sur les matières fertilisantes utilisées dans l'étude, et d'autre part sur l'effet de ces pratiques sur le développement du riz pluvial, culture testée dans cette étude. Dans cette étude, nous avons suivi la santé du sol (également appelée ici "performance écologique") et la performance agronomique du riz pluvial pendant deux saisons culturales dans un essai expérimental visant à comparer les effets de 16 pratiques de fertilisation, également évaluées par les producteurs. L'ambition de ce travail est de **construire un indice multicritère de performance** mobilisant un indicateur de santé du sol, un indicateur de performance agronomique et un indicateur d'évaluation paysanne des pratiques de fertilisation testées sur le riz pluvial des Hautes Terres de Madagascar. Pour les indicateurs écologiques et agronomiques, de nombreux descripteurs ont été mesurés sur le sol et sur la plante cultivée, respectivement. Ces descripteurs ont ensuite fait l'objet d'une sélection, d'une hiérarchisation, d'une pondération et d'une agrégation sur la base d'une approche statistique inspirée de celle développée par Obriot *et al*. (2016). En parallèle, la perception par les agriculteurs des matières fertilisantes testées a été évaluée lors d'ateliers en salle puis, lors de visites sur l'essai pour évaluer l'effet des pratiques de fertilisation sur la croissance du riz, selon des indicateurs proposés par les agriculteurs eux-mêmes. De façon plus générale, la comparaison de différentes pratiques agricoles à l'aide d'un tel indicateur multicritère devrait permettre de mieux orienter les instituts techniques et les ONG dans la promotion des pratiques qui apparaissent comme écologiquement et agronomiquement les plus bénéfiques et qui semblent adaptées aux besoins et contraintes des paysans malgaches.

2. 2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Localisation de l'étude et contexte agricole

L'étude a été conduite sur deux saisons culturales (2017-18 et 2018-19), sur les Hautes Terres de Madagascar près de la commune d'Imerintsiatosika, à l'Est de la région Itasy, à une quarantaine de kilomètres d'Antananarivo, la capitale. L'altitude est de 1 300 m, les précipitations moyennes annuelles de 1 300 mm et la température moyenne annuelle de 18°C. Le climat présente deux saisons contrastées avec une saison chaude et pluvieuse de novembre à mars et une saison froide et sèche de juin à septembre. Les sols sont des Ferralsols désaturés et multidéficients (20 $gC.kg^{-1}$ de sol, 1,2 $gN.kg^{-1}$ de sol et 1,6 mg P $disp.kg^{-1}$ de sol par la méthode des résines échangeuses d'ions), caractérisés par un pH très bas (entre 4,5 et 5,2) et par la présence abondante d'oxydes de fer et d'aluminium. La texture est très fine (70 % d'argiles + limons fins). Les exploitations de la région sont de petite taille, entre 50 et 100 ares en moyenne, avec comme principales productions le riz de bas-fonds, le riz pluvial, des cultures maraîchères et des arbres fruitiers. Quelques animaux d'élevage sont également présents dans les exploitations (1 à 2 zébus et 1 à 2 porcs en moyenne par exploitation). Les bas-fonds étant saturés, la culture du riz pluvial tend à se développer sur les collines (pour plus de détails sur les exploitations des Hautes terres de Madagascar, se référer à Grislain *et al*. (2025)).

Tableau 1 : Description des différents traitements (pratiques SFR pour "Soil Function Restoration"). Plus de détails sur les traitements sont disponibles dans Raharijaona *et al.* (2023). Légende : MO Matières Organiques, FM Fertilisation Minérale, MM Matières minérales. Les SFR en bleu correspondent aux pratiques "témoins", les SFR en vert aux pratiques "paysannes" et les SFR en jaune aux pratiques "innovantes".

Table 1: *Description of the various treatments (SFR practices, standing for 'Soil Function Restoration'). Further details regarding these treatments can be found in Raharijaona et al. (2023). Legend: MO = Organic Matter, FM = Mineral Fertilization, MM = Mineral Materials. SFR practices in blue represent 'control' practices, those in green represent 'farmer' practices, and those in yellow represent 'innovative' practices.*

SFR	Constituants				Types	Pratique	Inoculation (vers de terre et mycorhizes)
SFR1	Poudrette de parc (3t MS/ha)				MO seule	Paysanne	non
SFR2	Fumier traditionnel (3t MS/ha)				MO seule	Paysanne	non
SFR3	Fumier traditionnel (3t MS/ha)	NPK 11-22-16 (40 kg/ha)			MO seule + FM	Paysanne	non
SFR4	Fumier traditionnel (6t MS/ha)				MO seule	Innovante	oui
SFR5	Fumier amélioré (6t MS/ha)				MO seule	Innovante	oui
SFR6	Compost (6t MS/ha)				MO seule	Innovante	oui
SFR7	Lombricompost (6t MS/ha)				MO seule	Innovante	oui
SFR8	NPK 11-22-16 (100 kg/ha)	Urée (100 kg/ha)			FM	Contrôle positif	non
SFR9	Fumier traditionnel (6t MS/ha)	Dolomie (500 kg/ha)			MO seule + MM	Innovante	oui
SFR10	Fumier traditionnel (6t MS/ha)	Cendres (500 kg/ha)			MO seule + MM	Innovante	oui
SFR11	Fumier traditionnel (6t MS/ha)	Hyperfos (500 kg/ha)			MO seule + MM	Innovante	oui
SFR12	Fumier traditionnel (2t MS/ha)	Compost (2t MS/ha)	Lombricompost (2t MS/ha)		MO mélange	Innovante	oui
SFR13	Fumier traditionnel (2t MS/ha)	Compost (2t MS/ha)	Lombricompost (2t MS/ha)	Cendres (500 kg/ha)	MO mélange + MM	Innovante	oui
SFR14	Fumier traditionnel (2t MS/ha)	Compost (t MS/ha)	Lombricompost (2t MS/ha)	Hyperfos (500 kg/ha)	MO mélange + MM	Innovante	oui
SFR15	Fumier traditionnel (2t MS/ha)	Compost (2t MS/ha)	Lombricompost (2t MS/ha)	Guano (500 kg/ha)	MO mélange + MM	Innovante	oui
SFR16	Aucune fertilisation				Rien	Contrôle négatif	non

2.2. Dispositif expérimental de l'essai

Le dispositif expérimental a été installé chez un agriculteur de la région d'Imerintsiatosika (Hautes Terres de l'Itasy) à partir d'un terrain sous savane herbacée, non cultivée depuis plus de 50 ans. Les chercheurs ont installé un dispositif avec 4 blocs complets randomisés incluant seize traitements répartis aléatoirement au sein des blocs. Dans chaque bloc, seize parcelles de 4 m × 4 m ont été définies (voir Raharijaona *et al*. (2023) pour plus de détails). La variété de riz (*Oryza sativa*) utilisée dans cet essai était Chhomrong Dhan, la plus utilisée par les agriculteurs de la zone car tolérante au froid et à la pyriculariose. Pour la saison culturale 2017-2018, le sol a été labouré manuellement sur une profondeur de 20 à 30 cm en octobre 2017. Le semis a ensuite été réalisé à une densité de 25 poquets de riz m^{-2}, soit 400 poquets par parcelle, en novembre 2017. Cinq à huit graines ont été placées dans chaque trou de poquet, avec les fertilisants. Pour la deuxième saison culturale (2018-2019), les mêmes opérations ont été réalisées sur les mêmes parcelles recevant les mêmes pratiques que l'année précédente. Les données présentées dans ce travail sont celles provenant de la deuxième saison culturale.

Les seize traitements portent le nom de SFR pour "*Soil Function Restoration*". Cinq catégories de fertilisation ont été comparés *(Tableau 1)* :

- Un témoin dit « négatif » car sans apport d'aucun fertilisant (SFR16) et censé donner de mauvais rendements de riz,
- Un témoin dit « positif » car avec apport de NPK et urée (SFR8) et censé donner de bons rendements de riz,
- Trois pratiques dites "paysannes" telles que mises en œuvre localement par les agriculteurs (SFR1-2-3),
- Onze pratiques dites "innovantes" caractérisées par des quantités plus importantes et par l'utilisation de matières organiques seules ou assemblées avec d'autres matières organiques ou des matières minérales. En deuxième année, en plus des fertilisants, des organismes clés dans la réalisation des fonctions écologiques du sol (mycorhizes et vers de terre) ont été inoculés sur ces onze pratiques (SFR4-5-6-7-9-10-11-12-13-14-15).

2.3. Caractérisation de la performance écologique du sol et de la performance agronomique

Pour évaluer la performance écologique du sol (santé du sol) et la performance agronomique (rendement agronomique, etc.), nous avons construit des indicateurs globaux basés sur un grand nombre de mesures (appelés ici descripteurs), respectivement sur le sol (jeu de données intitulé Axe Sol) et sur la plante (jeu de données intitulé Axe Plante). La construction des indicateurs globaux à partir des descripteurs nécessite quatre étapes : (i) la sélection des descripteurs, (ii) l'attribution d'un score de performance et la normalisation entre 0 et 1, (iii) la pondération, et enfin (iv) l'agrégation (Andrews *et al*., 2004 ; Li *et al*., 2007 ; OECD *et al*., 2008 ; Bastida *et al*., 2008 ; Fine *et al*., 2017 ; Bünemann *et al*., 2018 ; Rinot *et al*., 2019 ; Cousin *et al*., 2025). Les descripteurs peuvent être regroupés selon différentes fonctions pour faciliter l'interprétation (Obriot *et al.,* 2016). Chacune de ces étapes peut reposer sur une approche statistique, donc sans *a priori*, ou une approche à dire d'experts. De plus, différentes approches statistiques peuvent être sélectionnées. La méthode retenue dans cette étude résulte d'un travail réalisé par Damoiseaux (2020) qui a consisté à comparer différentes méthodes de construction des indicateurs globaux à partir d'un même jeu de données. Sans entrer dans le détail des résultats de cette comparaison entre différentes méthodes (qui sera publiée ultérieurement), ce travail nous a amenés à préférer une approche statistique plutôt qu'experte pour la sélection des variables et leur pondération. En effet, la perception des experts sur les variables les plus déterminantes dans un système particulier, à une échelle particulière, peut souffrir de biais cognitifs (Andrews *et al*., 2004). Dans notre étude, nous sommes partis d'un grand nombre de descripteurs mesurés (à la fois sur le sol et la plante) considérant l'importance des approches *a posteriori* pour faire ressortir les descripteurs les plus discriminants, et permettre *in fine* de mieux comprendre les différences entre pratiques (Fine *et al*., 2017).

Que ce soit pour les données "sol" et les données "plante", nous avons construit des jeux de données par fonction, cinq pour l'Axe Sol, cinq pour l'Axe Plante. L'approche par fonction a l'avantage d'être plus explicative. L'usage de l'analyse discriminante étape par étape, ou *Stepdisc*, dont la description est donnée ci-après, a également l'avantage d'éviter d'avoir à rechercher au préalable les variables très fortement corrélées pour les supprimer. En effet, la méthode ne sélectionnant à chaque étape que la variable qui améliore le plus le modèle, les variables très fortement corrélées à une variable déjà sélectionnée ne seront plus sélectionnées.

2.3.1. Indicateurs de performance des fonctions écologiques des sols

Pour caractériser la santé du sol, 82 descripteurs du sol, répartis en cinq fonctions, ont été mesurés. Certains descripteurs sont rattachés à deux fonctions. Cette répartition par fonction a été réalisée par les scientifiques du projet. Les descripteurs écologiques (E) du sol ont été mesurés en mars 2019 soit un mois avant la fin de la saison des pluies et de la récolte :

- Fonction E1 "Maintien de l'environnement physique" (10 descripteurs) : pH in situ, pH eau, humidité du sol (0-10 et 10-20 cm), densité apparente (0-10 et 10-20 cm), agrégats > 2 mm (0-10 et 10-20 cm), biomasse de vers de terre, biomasse d'ingénieurs du sol ;
- Fonction E2 "Dynamique du carbone" (28 descripteurs) : teneur et stock en C du sol (0-10 et 10-20 cm), "*permanganate*

oxidizable C" (PoxC), paramètres de respiration du sol en laboratoire (vitesses d'émission de CO_2 à 3, 7, 15, 21 et 28 jours, cumul de CO_2 émis à 3, 7, 15, 21 et 28 jours), biomasse des détritivores (macrofaune), abondance totale de nématodes, profils cataboliques microbiens par les Ecoplates Biolog™ (‘*Average Well Color Development*’ ou AWCD totale, AWCD pour les carbohydrates, AWCD pour les polymères, AWCD pour les acides carboxyliques et cétones), décomposition journalière du thé rouge et du thé vert en sachets, taux de décomposition totale du rooibos (‘thé rouge’) et du thé vert, données issues des *bait lamina* (activité alimentaire totale et journalière) ;

- Fonction E3 "Recyclage des nutriments" (14 descripteurs) : teneur et stock en azote totale (0-10 et 10-20 cm), teneur et stock en phosphore assimilable (par la méthode des résines échangeuses d'ions), phosphore microbien (après fumigation-incubation), densité de nématodes bactérivores, fongivores, omnivores et carnivores, "*nematode channel ratio*" NCR, activité microbienne en Ecoplates (AWCD amides et amines, AWCD acides aminés) ;
- Fonction E4 "Régulation des ravageurs" (8 descripteurs) : biomasse et densité de bioagresseurs (vers blancs, larves de Coléoptères Scarabéidés), indice de maturité des nématodes (IM), indice de nématodes phytoparasites (PP), ratio IM/PP, densité de nématodes phytoparasites, densité de genres de phytoparasites considérés comme principaux agresseurs, indice de structure des communautés de nématodes ;
- Fonction E5 "Maintien d’un haut niveau de biodiversité" (32 descripteurs) : données issues des échantillonnages TSBF de macrofaune [biomasse totale, biomasse de vers de terre, de fourmis, de cocons de vers de terre, densité totale, densité de *P. corethrurus* (vers de terre), biomasse et densité d'omnivores, de détritivores, de prédateurs, d'ingénieurs du sol, densité de cocons, densité de Coléoptères, nombre de taxons], données issues des captures par *pitfall traps* (biomasse de macrofaune, nombre d'individus, nombre de taxons), données issues de l'analyse de la nématofaune (abondance totale de nématodes, indice de maturité IM, abondance d'omnivores et de carnivores, NCR, richesse en taxons, indice d'enrichissement, indice de structure), données issues de l'analyse de l'activité microbienne sur Ecoplates (indice RF d'activité globale : diversité des substrats supportant la croissance de la communauté microbienne à un temps donné).

2.3.2. Indicateurs de performance des fonctions agronomiques

Pour mesurer cette performance, 54 descripteurs ont été mesurés, également répartis en cinq fonctions par les chercheurs. Certains descripteurs ont été mesurés à différents moments de la croissance du riz, beaucoup ont été mesurés à la récolte lorsque le rendement a été calculé sur un carré de rendement, et ses composantes sur 7 poquets.

- Fonction A1 "Croissance de la plante" (2 descripteurs) : hauteur du riz 1 mois et 2 mois après semis ;
- Fonction A2 "Biomasse de la plante" (4 descripteurs) : biomasse aérienne, biomasse racinaire, *shoot-root ratio*, hauteur à l'épiaison ;
- Fonction A3 "Rendement" (13 descripteurs) : mesures sur 7 poquets (hauteur, nombre de tiges, nombre de panicules, nombre de panicules blanches, poids des panicules, poids des tiges, poids des tiges+panicules, poids des grains, rendement en grains), mesures sur le carré de rendement (rendement en paille, rendement en grains, *harvest index*, pourcentage de grains pleins) ;
- Fonction A4 "Qualité des grains" (16 descripteurs) : mesures sur 7 poquets (teneur en carbone, phosphore total et azote total des grains, rapport C/N des grains, quantité de carbone, de phosphore et d'azote dans les grains, quantité de carbone, de phosphore et d'azote dans les grains+paille), mesures sur le carré de rendement (quantité de carbone, de phosphore et d'azote dans les grains, quantité de carbone, de phosphore et d'azote dans les grains+paille) ;
- Fonction A5 "Qualité des pailles" (25 descripteurs) : mesures sur 7 poquets (teneur en carbone, phosphore total et azote total des pailles, rapport C/N des pailles, quantité de carbone, de phosphore et d'azote dans les pailles, quantité de carbone, de phosphore et d'azote dans les grains+paille), mesures sur le carré de rendement (quantité de carbone, de phosphore et d'azote dans les pailles, quantité de carbone, de phosphore et d'azote dans les grains+paille), matière sèche en labo, matière sèche résiduelle estimée par SPIR, cendres totales, matières azotées totales, mesures van Soest (cellulose brute, Neutral Detergent Fiber NDF, Acid Detergent Fiber ADF, Acid Detergent Lignin ADL) estimées par SPIR, mesures SPAD (estimation de la teneur en chlorophylle).

2.3.3. Sélection des indicateurs

La sélection des indicateurs consiste à réduire le nombre de variables mesurées en un plus petit set de variables souvent appelé « minimum data set » (MDS). Les règles de décision permettent d'éliminer les variables qui (1) ne répondent pas au(x) facteur(s) à évaluer, (2) sont trop auto-corrélées entre-elles, et donneraient alors trop d'importance à une même information. Comme précédemment évoqué, nous avons opté pour une sélection sans *a priori* basée sur les réponses d'analyses statistiques des variables du jeu de données pour sélectionner les variables répondant le mieux aux facteurs à évaluer en mobilisant le *Stepdisc* (*Stepwise Discriminant Analysis*, logiciel Tanagra 1.4.2) qui est une méthode de sélection basée sur des analyses discriminantes répétées. Dans l'approche "*Forward*" du *Stepdisc* partant d'un ensemble vide, à

chaque étape, dans le modèle, la variable qui contribue le plus au pouvoir discriminant du modèle mesuré par le "lambda de Wilks" est intégrée. La sélection s'arrête lorsqu'aucune variable ne parvient à améliorer le modèle au seuil de probabilité de Fisher F choisi par l'utilisateur. Cette méthode est très aisée à utiliser, évite l'étape d'élimination des variables corrélées et génère des résultats simples à interpréter. Le *Stepdisc* a été utilisé sur chacun des jeux de données (JDD) correspondant aux cinq fonctions écologiques du sol (E1 à E5) et aux cinq fonctions agronomiques (A1 à A5), avec conservation des corrélations. C'est la méthode "*Forward*" du *Stepdisc* qui est ici utilisée et le seuil de significativité choisie est de 5 %.

2.3.4. Attribution d'un score de performance et normalisation

La seconde étape est l'attribution d'un score de performance pour chaque descripteur retenu dans le MDS permettant de définir le sens de la réponse de la variable. Trois types de fonctions-réponses se distinguent dans la littérature (Andrews *et al*., 2004) : (i) plus la valeur du descripteur est élevée pour une pratique donnée, plus sa performance est élevée (exemple : nombre de vers de terre) (fonction A, le plus, le mieux) ; inversement, (ii) plus la valeur du descripteur est élevée pour une pratique donnée et moins la performance de cette pratique est élevée (exemple : nématodes phytoparasites) (fonction B, le moins, le mieux) ; enfin, (iii) la performance de la pratique peut être maximale pour une variable lorsque sa valeur est comprise entre certaines valeurs, autour d'un optimum (exemple pH du sol) (fonction C, l'optimum, le mieux). Différentes méthodes d'attribution d'un score sont proposées dans la littérature (Andrews *et al*., 2002 ; Fernandes *et al*., 2011 ; Sharma *et al*., 2015 ; Fine *et al*., 2017). Cette étape nécessite de bien connaître les relations entre les indicateurs et les performances attendues par les pratiques. Dans notre étude, nous avons défini les scores pour chaque variable selon ces fonctions A, B ou C :

A. $$S_i = \frac{x - xmin}{xmax - xmin}$$

B. $$S_i = \frac{x - xmax}{xmin - xmax}$$

C. $$pour\ x < xopt : S_i = \frac{x - xmin}{xopt - xmin}$$

$$pour\ x > xopt : S_i = \frac{xopt - xmin}{x - xmin}$$

La majorité des variables écologiques sélectionnées sont affectées par les experts à une fonction de type « A », à l'exception de quatre variables qui reçoivent la fonction « B » : densité apparente 0-10 cm, densité de bioagresseurs (macrofaune), indice de nématodes phytoparasites (PP) et densité des nématodes phytophages et ravageurs, et deux variables qui reçoivent la fonction « C » (pH in situ et pH eau, avec un optimum à 6). De même, les variables agronomiques sélectionnées se voient attribuer une fonction de type « A », sauf six variables qui sont associées à une fonction de type « B » : nombre de panicules blanches, C/N des grains, C/N des pailles, cendres totales, cellulose brute, "acid detergent lignin" ADL. Enfin, les variables sont normalisées par transformation homothétique et cette étape de normalisation aboutit à des variables ayant toutes pour valeurs une note comprise entre 0 et 1.

2.3.5. Pondération et agrégation

La pondération est facultative. Dans notre étude, après comparaison des méthodes (Damoiseaux, 2020), nous avons choisi de ne pas pondérer les variables du MDS qui reçoivent donc toutes un facteur de pondération égal à 1. Concernant l'agrégation, nous avons agrégé les indicateurs par fonction de l'axe écologique d'une part et par fonction de l'axe agronomique d'autre part. Nous avons privilégié une agrégation par calcul de moyennes des scores des variables, plutôt que des médianes, car elle permet une interprétation plus instinctive et moins complexe des indicateurs (Damoiseaux, 2020). L'utilisation d'une moyenne arithmétique suppose une compensation entre les indicateurs, ce qui peut constituer une limite lorsque certains paramètres agissent comme des facteurs limitants de la santé du sol. Des approches multicritères hiérarchiques, telles que DEXi (Craheix *et al*., 2015) ou les arbres flous (Bockstaller et Angevin, 2026), permettant de mieux prendre en compte les situations de non-compensation entre critères, pourraient ainsi constituer une piste méthodologique pertinente pour de futurs travaux. La mise en œuvre de telles approches nécessite néanmoins un travail conceptuel préalable afin de définir les niveaux de compensation acceptables entre les dimensions de la santé du sol.

Les indicateurs permettent un classement des SFR selon leur performance, qu'elle soit agronomique ou écologique, ou une combinaison des deux.

2.4. Évaluation par les agriculteurs des pratiques de fertilisation

Vingt couples d'exploitants ont participé à ce travail lors de trois ateliers en salle et une évaluation au champ en constituant sept groupes de travail de cinq à six agriculteurs (2-3 homme/2-3 femmes). Le premier atelier piloté par l'équipe de recherche (10 personnes) a permis d'identifier collectivement et de pondérer les critères définis par les agriculteurs concernant le choix d'une fertilisation adaptée à la culture de riz pluvial. Les huit critères

sont mentionnés dans le *tableau 2* et leurs poids respectifs ont été attribués par la fréquence d'apparition de ce critère.

Chaque critère a ensuite été transformé en question évaluative (Q1) qui a été utilisée lors d'un deuxième atelier concernant leur perception *a priori* de chaque pratique de fertilisation, par simple observation des matières seules ou en mélanges, présentées dans des récipients. Cette évaluation s'est faite à partir des huit questions Q1 (Q1.1 à Q1.8) en donnant une note de 0 à 3 : 0 signifiant que la matière fertilisante est mal perçue par les agriculteurs pour chacun des critères, 3 montrant au contraire une très bonne perception de la matière fertilisante *(Tableau 2)*.

Un troisième atelier a permis d'identifier les critères visuels utilisés par les agriculteurs pour estimer la croissance et le développement du riz pluvial tout au long de son cycle. Les cinq critères sont mentionnés dans le *tableau 3*.

Chaque critère a ensuite été transformé en question évaluative qui a été utilisée lors d'une évaluation au champ utilisant ces cinq questions Q2 (Q2.1 à Q2.5) en donnant une note de 0 à 3 : 0 signifiant un effet nul, 3 montrant un effet maximal sur chaque critère du riz pluvial. Cette évaluation a été réalisée sur le site de l'expérimentation, en mars 2019, soit 1 mois avant la récolte ; elle a permis aux agriculteurs de noter les pratiques de fertilisation par rapport à leurs propres descripteurs agronomiques.

Pour construire l'indicateur global d'évaluation paysanne, la méthode adoptée est un peu différente de celle réalisée pour la santé du sol ou la performance agronomique étant donné que le

Tableau 2 : Liste des critères des agriculteurs pour évaluer *a priori* le choix des pratiques de fertilisation et décrire les qualités attendues d'un fertilisant pour le riz pluvial.

Table 2: *List of criteria used by farmers to evaluate, in advance, the choice of fertilization practices and to describe the qualities expected of a fertilizer for upland rice.*

Numéro de la question	Descripteur/Critère	Question posée
Q1.1	Accessibilité (facilité d'accès aux matières premières)	Est-ce que tous les fertilisants utilisés dans ce SFR sont faciles à obtenir/ trouver pour les appliquer au champ ?
Q1.2	Sol (amélioration durable du sol)	Pensez-vous que ce SFR va améliorer le sol dans la durée ?
Q1.3	Épandage (facilité d'épandage des matières fertilisantes)	Est-ce que ce fertilisant est facile à épandre au champ ?
Q1.4	Usage (efficacité de la pratique sur d'autres cultures)	Pensez-vous qu'il a aussi un effet bénéfique sur d'autres cultures que le riz ?
Q1.5	Bioagresseur (impact sur les bioagresseurs)	Le risque de contamination en bioagresseurs (insectes ravageurs, adventices et autres) est-il faible ?
Q1.6	Coût	Le coût d'achat ou de préparation est-il acceptable pour vous ?
Q1.7	Transport	Est-ce que les matières utilisées pour ce SFR sont faciles à transporter pour être amenées au champ ?
Q1.8	Riz (quantité nécessaire par rapport à l'efficacité sur la culture du riz pluvial)	Est-ce que l'utilisation d'une faible quantité permet d'obtenir des effets importants sur et le riz ?

Tableau 3 : Liste des critères identifiés par les agriculteurs pour évaluer au champ la performance agronomique du riz pluvial. Questions évaluatives posées aux agriculteurs concernant la performance agronomique des pratiques testées sur l'essai.

Table 3: *List of criteria identified by farmers for evaluating the agronomic performance of upland rice in the field. Evaluative questions posed to farmers regarding the agronomic performance of the practices tested in the trial.*

Numéro de la question	Descripteur/Critère	Question posée
Q2.1	Tige	L'épaisseur de la tige est-elle satisfaisante ?
Q2.2	Feuille	L'apparence des feuilles (largeur, longueur, courbure) est-elle satisfaisante ?
Q2.3	Couleur	La couleur de la plante est-elle satisfaisante ?
Q2.4	Nombre de talles	Le nombre de talles par plant et par poquet est-il suffisamment important ?
Q2.5	Hauteur de la plante	La hauteur de la plante est-elle satisfaisante ?

jeu de données est composé de variables qualitatives discrètes correspondant à des notes attribuées par les agriculteurs. De plus, le nombre limité de variables de départ rend le jeu de données directement exploitable et l'étape de sélection n'est pas nécessaire. La pondération et l'agrégation sont réalisées d'une seule et unique manière.

Le jeu de données regroupe donc pour chaque variable (Q1.1 à Q1.8 et Q2.1 à Q2.5), les notes *(N allant de 0 à 3)* des *j* agriculteurs enquêtés *(a)* pour chaque pratique SFR. Les notes sont ensuite pondérées par la fréquence d'apparition des descripteurs *(P)* lors du premier atelier. Finalement nous avons obtenu un indicateur d'évaluation pour chaque descripteur *(I)* :

$$I_{Q1} = (\mu_{a=1 \to j}(N_a))\ x\ P_{Q1}$$

et

$$I_{Q2} = (\mu_{a=1 \to j}(N_a))\ x\ P_{Q2}$$

Deux indicateurs d'évaluation paysanne des SFR ont été calculés : l'un sur les aspects socio-économiques (IP1, Q1.1 à Q1.8), l'autre sur les performances agronomiques du riz (IP2, Q2.1 à Q2.5) :

$$IP1 = \sum_{Q1=1}^{Q1=8} I_{Q1} \quad \text{et} \quad IP2 = \sum_{Q2=1}^{Q2=5} I_{Q2}$$

IP : indicateur d'évaluation
Q1 : Questions correspondant aux descripteurs socio-économiques des fertilisants
Q2 : Questions correspondant aux descripteurs de performance agronomique

L'indicateur global IP résulte de l'agrégation par la moyenne des résultats des IP1 et IP2 pour chaque pratique de fertilisation. Selon la valeur de ces indicateurs, nous avons pu établir un classement des pratiques : le classement PP1 est le classement des indices agrégés des questions Q1.1 à Q1.8 (évaluation socio-économique par les agriculteurs). De même, le classement PP2 est le classement agrégé des indices obtenus pour les questions Q2.1 à Q2.5 (évaluation agronomique par les agriculteurs). Le classement PP correspond au classement global de l'évaluation paysanne agrégé des classements PP1 et PP2.

2.5. Construction de l'indicateur global

L'indicateur global (IG) résulte de l'agrégation des indicateurs des trois axes : écologiques, agronomiques et évaluation paysanne. L'agrégation correspond à la moyenne des indicateurs de chaque SFR.

3. RÉSULTATS

3.1. Sélection des variables

Les étapes de sélection des variables écologiques par la méthode *Stepdisc*, appliquée à chacun des JDD "sol" construits pour chacune des fonctions écologiques du sol ont mené à la sélection de 13 descripteurs (sur 82 variables au départ) les plus pertinents ; cela représente un taux de sélection de 16 %. Ce taux de sélection varie selon les cinq fonctions écologiques :

- Fonction E1 "Maintien d'un environnement physico-chimique" (2 variables sur 10, taux de sélection 20 %) : pH in situ et pH_{eau},
- Fonction E2 "Dynamique du carbone" (2 variables sur 28, taux de sélection 7 %) : AWCD-des polymères et Taux de décomposition du thé rouge,
- Fonction E3 "Recyclage des nutriments" (2 variables sur 14, taux de sélection 14 %) : P microbien et Stock de P résine,
- Fonction E4 "Impact sur les ravageurs" (1 variable sur 8, taux de sélection 12,5 %) : indice de structure des nématodes,
- Fonction E5 "Maintien d'un haut niveau de biodiversité" (6 variables sur 32, taux de sélection 18,75 %) : biomasse des vers de terre, nombre de taxons (macrofaune), densité des prédateurs (macrofaune), abondance totale des nématodes, richesse taxonomique des nématodes, indice RF (*Ecoplates*).

Le *Stepdisc* permet une hiérarchisation des descripteurs selon leur pouvoir discriminant. En s'affranchissant des fonctions, on trouve l'ordre suivant du plus au moins discriminant : pH_{eau}, AWCD-polymères, stock de P résine, indice RF, pH in situ, abondance totale de nématodes, taux de décomposition du thé rouge, densité de prédateurs (macrofaune), nombre de taxons (macrofaune), biomasse de vers de terre, indice de structure des nématodes, P microbien, richesse taxonomique de nématodes.

Concernant les variables agronomiques, 33 sur 54 variables ont été sélectionnées (taux de sélection de 61 %) :

- Fonction A1 "Croissance de la plante" (taux de sélection 100 %, 2 variables sur 2) : Hauteur à 1 mois, hauteur à 2 mois,
- Fonction A2 "Biomasse de la plante" (taux de sélection 75 %, 3 variables sur 4) : Biomasse racinaire, *shoot/root ratio*, hauteur à l'épiaison,
- Fonction A3 "Rendement" (taux de sélection 31 %, 4 variables sur 13) : hauteur 7 poquets, rendement en paille sur le carré de rendement, rendement en grains sur le carré de rendement, *harvest index*,
- Fonction A4 "Qualité des grains" (taux de sélection 87,5 %, 14 variables sur 16) : teneur en carbone, teneur en azote, teneur en phosphore, rapport C/N, quantité de C pour 7 poquets, quantité de carbone pour le carré de rendement, quantité d'azote pour le carré de rendement, quantité de phosphore pour le carré de rendement, quantité de carbone

pailles+grains pour 7 poquets, quantité d'azote pailles+grains pour 7 poquets, quantité de phosphore pailles+grains pour 7 poquets, quantité de carbone pailles+grains pour le carré de rendement, quantité d'azote pailles+grains pour le carré de rendement, quantité de phosphore pailles+grains pour le carré de rendement,

- Fonction A5 "Qualité des pailles" (taux de sélection 40 %, 10 variables sur 25) : teneur en carbone, teneur en azote, teneur en phosphore, quantité de carbone pailles+grains pour 7 poquets, quantité d'azote pailles+grains pour 7 poquets, quantité de phosphore pailles+grains pour 7 poquets, quantité d'azote pailles+grains pour le carré de rendement, quantité de phosphore pailles+grains pour le carré de rendement, ADL (*Acid Detergent Lignin*) et SPAD (quantité de chlorophylle).

Le classement donne, par ordre décroissant d'importance pour expliquer les différences entre pratiques : les hauteurs du riz (à 1 mois, 2 mois, épiaison, récolte), puis un ensemble de paramètres donnant les teneurs en C, N et P des grains et des pailles+grains, à la fois pour le carré de rendement et pour les 7 poquets, puis le SPAD (classé 10e), le rendement en grains (14e), ADL (17e), le rendement en paille (22e), *harvest index* (27e), biomasse racinaire (29e), *shoot/root ratio* (31e).

3.2. Valeurs des indicateurs à la suite de l'étape d'agrégation des variables et classement des pratiques SFR

Les indicateurs "écologiques du sol" varient selon les fonctions considérées et les SFR (*Tableau 4* et *Figure 1)*.

Quelle que soit la fonction retenue, exceptée la fonction E4 "Impact sur les ravageurs", le SFR16 (sans fertilisation) apparaît comme celui favorisant le moins la santé du sol : ses scores sont particulièrement faibles au vu de ceux des autres SFR. Le SFR8 (fertilisation minérale seule) donne également des valeurs faibles, principalement sur les fonctions E1 et E4. Au vu de l'indicateur global "écologique", les SFR traditionnels 1 et 2 donnent également des valeurs faibles (0,53 et 0,55, les classant 13e et 14e), bien en-dessous des autres SFR (dits innovants). Pourtant, le SFR1 obtient la meilleure note pour la fonction E4 indiquant un effet très favorable sur les bioagresseurs.

Tableau 4 : Scores des indicateurs et classements (Class) des pratiques SFR selon les cinq fonctions écologiques et pour l'axe écologique. Les valeurs surlignées en rouge indiquent les SFR les moins bien classés tandis que celles en violet indiquent les SFR les mieux classés. Pour les codes couleur des SFR, se reporter au *Tableau 1.*

Table 4: *Indicator scores and rankings (Class) for SFR practices, categorized by the five ecological functions and for the ecological dimension as a whole. Values highlighted in red indicate the lowest-ranked SFR practices, while those in purple indicate the highest-ranked ones. For the color codes used for the SFR practices, please refer to Table 1.*

	Fonction E1 Maintien d'un environnement physico-chimique		Fonction E2 Dynamique du carbone		Fonction E3 Recyclage des nutriments		Fonction E4 Impact sur les ravageurs		Fonction E5 Maintien d'un haut niveau de biodiversité		Axe Ecologique	
	Score	Class	Score	Class	Score	Class	Score	Class	Score	Class	Score	Class
SFR1	0,34	14	0,21	15	0,35	14	1,00	1	0,50	14	0,55	13
SFR2	0,48	13	0,45	12	0,34	15	0,54	14	0,53	13	0,53	14
SFR3	0,52	12	0,49	11	0,55	12	0,98	5	0,65	11	0,72	12
SFR4	0,61	11	0,58	9	0,58	11	0,96	7	0,62	12	0,76	11
SFR5	0,84	4	0,53	10	0,54	13	0,80	12	0,82	6	0,81	10
SFR6	0,85	6	0,44	13	1,00	1	0,99	3	0,75	10	0,91	6
SFR7	0,78	8	0,65	6	0,66	7	0,86	11	0,79	8	0,85	9
SFR8	0,21	16	0,38	14	0,61	9	0,27	16	0,41	15	0,39	15
SFR9	1,00	1	1,00	1	0,61	8	0,88	9	0,85	5	1,00	1
SFR10	0,70	9	0,77	3	0,60	10	0,99	4	1,00	1	0,91	5
SFR11	0,74	10	0,85	2	0,83	3	0,78	13	0,95	2	0,92	4
SFR12	0,81	5	0,60	8	0,78	5	0,97	6	0,82	7	0,90	7
SFR13	0,82	3	0,65	7	0,82	4	0,86	10	0,77	9	0,88	8
SFR14	0,81	7	0,68	5	0,67	6	1,00	2	0,89	3	0,92	3
SFR15	0,82	2	0,70	4	0,90	2	0,88	8	0,86	4	0,93	2
SFR16	0,22	15	0,15	16	0,27	16	0,49	15	0,32	16	0,32	16

A l'inverse, les valeurs les plus élevées sont données pour le SFR9, largement au-dessus des autres SFR pour les fonctions E1 "maintien d'un environnement physico-chimique" et E2 "dynamique du carbone". Son score est en revanche plus faible pour la fonction E3 "Recyclage des nutriments". Il conserve malgré tout le meilleur score de l'axe écologique. Le SFR15 a de bons scores pour toutes les fonctions et il se classe 2e des SFR. Les autres SFR "innovants" donnent également de bons scores globaux, avec des valeurs plus ou moins élevées selon les fonctions. Certains améliorent les propriétés physico-chimiques (SFR5, SFR6, SFR12 à 15), d'autres plutôt la fonction "carbone" (SFR11) ou la fonction "nutriments" (SFR11, SFR13). La fonction E5 "Maintien d'un haut niveau de biodiversité" montre de fortes valeurs pour de nombreux SFR "innovants".

Concernant l'axe agronomique, les scores des SFR sont sensiblement différents des scores obtenus pour les fonctions et l'axe écologiques *(Tableau 5* et *Figure 1)*. Les trois SFR récoltant le meilleur score global sont les SFR15, SFR4 et SFR7. Comme pour l'axe écologique, les plus faibles sont les SFR16, SFR8 et SFR1. Les autres SFR, classés entre ces deux extrêmes, varient selon les fonctions considérées.

Les scores liés à l'évaluation paysanne sont présentés dans le *Tableau 6* et la *Figure 1.*

Concernant les aspects socio-économiques, les travaux en ateliers ont permis de dégager les principaux critères liés à l'usage des fertilisants avec un classement de ces critères prenant en compte le nombre de voix obtenus par les agriculteurs : effet sur le riz (Q1.8, 42 % des voix, indiquant que ce critère est celui qui compte le plus pour le choix d'un fertilisant), effet sur la qualité du sol (Q1.2, 20,9 %), facilité d'épandage (Q1.3, 9,9 %), régulation des bioagresseurs (Q1.5, 7,5 %), usage sur d'autres cultures (Q1.4, 5,9 %), coût (Q1.6, 5,7 %), accessibilité (Q1.1, 5,5 %), transport (Q1.7, 2,6 %). Le SFR16 n'ayant pas été fertilisé, obtient, de fait, une excellente note pour ce qui est de l'accessibilité (Q1.1), de la facilité d'épandage (Q1.3), du coût (Q1.6) et du transport (Q1.7). A l'inverse, son potentiel agronomique est nul pour ce qui est de son usage (Q1.4), de ses effets sur le sol (Q1.2), les bioagresseurs (Q1.5) ou le riz (Q1.8). Le SFR8 (avec NPK et urée) obtient un très bon score pour son accessibilité et son effet sur les bioagresseurs, et de très mauvais scores pour les autres critères, y compris l'effet sur le riz (classé 14e). A l'inverse les SFR12-13-14-15 donnent les meilleurs scores pour le PP1, malgré une mauvaise note sur le Q1.1 (accessibilité) et le Q1.6 (coût). Les indices d'évaluation agronomique de la performance du riz (PP2) reflètent à peu près les indices agronomiques mesurés par les scientifiques, donnant aux SFR4 et SFR7 les meilleurs scores. De façon

Tableau 5 : Scores des indicateurs et classements (Class) des pratiques SFR selon les cinq fonctions agronomiques et pour l'axe agronomique. Les valeurs surlignées en rouge indiquent les SFR les moins bien classés tandis que celles en violet indiquent les SFR les mieux classés. Pour les codes couleur des SFR, se reporter au *Tableau 1*.

Table 5: *Indicator scores and rankings (Class) for SFR practices, categorized by the five agronomic functions and the overall agronomic dimension. Values highlighted in red indicate the lowest-ranked SFR practices, while those in purple indicate the highest-ranked ones. For the color codes used for the SFR practices, please refer to Table 1.*

	Fonction A1 Croissance		Fonction A2 Biomasse		Fonction A3 Rendement		Fonction A4 Qualité des grains		Fonction A5 Qualité des pailles		Axe Agronomique	
	Sc	Cl	Sc	Cl	Sc	Cl	Sc	Cl	Sc	Cl	Sc	Cl
SFR1	0,51	14	0,62	14	0,53	14	0,47	15	0,58	16	0,57	14
SFR2	0,63	11	0,90	5	0,78	12	0,74	12	0,72	14	0,79	12
SFR3	0,63	12	0,87	9	0,79	11	0,79	9	0,74	13	0,80	11
SFR4	0,67	9	1,00	1	1,00	1	1,00	1	0,85	9	0,94	2
SFR5	0,57	13	0,79	12	0,88	6	0,88	5	0,97	2	0,84	10
SFR6	0,65	10	0,83	10	0,73	13	0,64	13	0,76	12	0,76	13
SFR7	0,97	2	0,89	6	0,89	5	0,83	8	0,80	10	0,93	3
SFR8	0,16	15	0,24	15	0,31	15	0,56	14	0,77	11	0,38	15
SFR9	0,68	8	0,88	8	0,90	4	0,94	3	0,91	6	0,89	6
SFR10	0,69	7	0,93	4	0,96	2	0,92	4	0,94	3	0,92	4
SFR11	0,70	6	0,99	2	0,85	8	0,77	10	0,89	7	0,87	7
SFR12	0,90	3	0,82	11	0,87	7	0,77	11	0,93	5	0,90	5
SFR13	0,72	5	0,89	7	0,84	10	0,84	7	0,87	8	0,86	9
SFR14	0,74	4	0,75	13	0,85	9	0,85	6	1,00	1	0,87	8
SFR15	1,00	1	0,94	3	0,91	3	0,95	2	0,94	4	1,00	1
SFR16	0,09	16	0,08	16	0,16	16	0,36	16	0,65	15	0,24	16

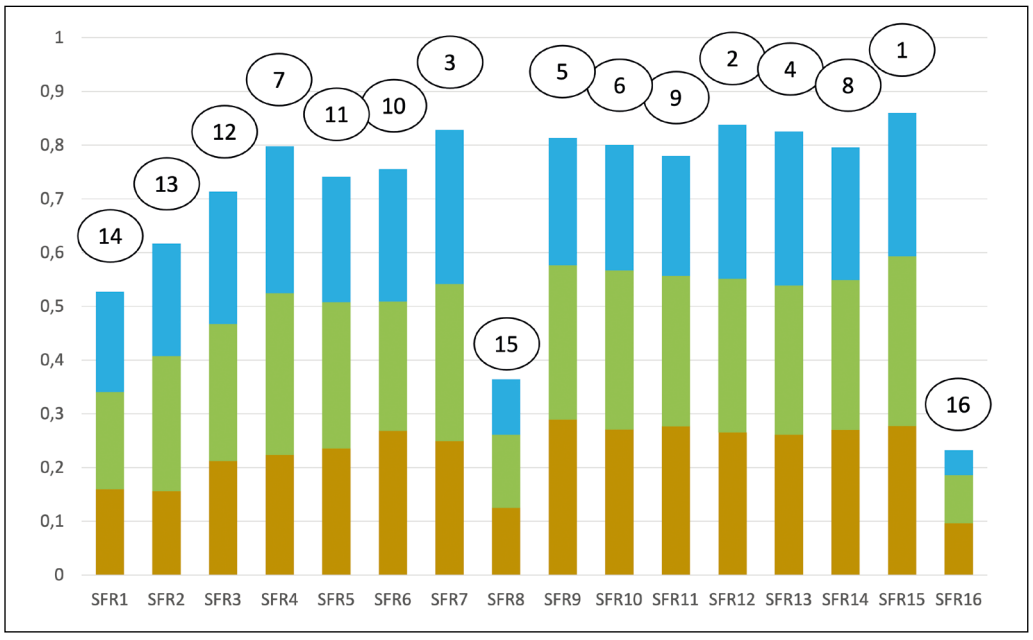
Tableau 6 : Classements des pratiques SFR selon leur évaluation par les agriculteurs, totale (PP), d'ordre socio-économique (PP1, *voir Tableau 2* pour les critères) et d'ordre agronomique (PP2, *voir Tableau 3* pour les critères). Les valeurs surlignées en rouge indiquent les SFR les moins bien classés tandis que celles en bleu indiquent les SFR les mieux classés. Pour les codes couleur des SFR, se reporter au *Tableau 1.*

Table 6: *Rankings of SFR practices based on farmers' evaluations: overall (PP), socio-economic (PP1; see Table 2 for criteria), and agronomic (PP2; see Table 3 for criteria). Values highlighted in red indicate the lowest-ranked SFR practices, while those in blue indicate the highest-ranked ones. For the color codes used for the SFR practices, please refer to Table 1.*

	Evaluation des pratiques (critères Q1)									Evaluation au champ (critères Q2)						
	Q1.1	Q1.2	Q1.3	Q1.4	Q1.5	Q1.6	Q1.7	Q1.8	PP1	Q2.1	Q2.2	Q2.3	Q2.4	Q2.5	PP2	PP
SFR1	4	10	10	14	15	2	2	15	14	12	14	6	13	14	14	14
SFR2	4	4	14	13	11	5	8	13	13	7	9	11	5	7	9	13
SFR3	3	13	10	8	14	9	10	5	8	10	6	6	9	11	7	8
SFR4	4	7	15	11	13	3	10	12	12	1	1	2	2	1	2	4
SFR5	9	7	16	3	9	4	16	9	9	12	8	4	7	12	8	10
SFR6	10	1	3	1	2	12	2	7	5	14	9	3	13	13	10	6
SFR7	12	9	13	7	10	16	15	6	10	2	2	1	1	2	1	1
SFR8	1	15	12	15	1	15	5	14	15	15	15	15	15	15	15	15
SFR9	8	6	9	4	8	7	7	8	6	7	9	13	9	8	11	9
SFR10	7	13	7	12	12	8	6	11	11	3	3	9	7	5	5	11
SFR11	11	3	5	8	7	6	14	10	7	7	12	14	12	8	13	12
SFR12	15	1	3	6	2	11	2	2	1	3	6	8	3	6	4	3
SFR13	12	5	2	2	6	13	8	4	3	5	3	4	4	3	3	2
SFR14	16	12	6	10	4	10	13	1	2	11	12	12	11	10	12	7
SFR15	14	11	7	5	4	13	10	3	4	6	5	9	5	3	6	5
SFR16	1	16	1	16	16	1	1	16	16	16	16	16	15	15	16	16

Figure 1 : Indicateur global de performance (histogrammes) et classement (chiffres) des différentes pratiques de fertilisation, intégrant la performance écologique liée à la santé du sol (en brun), la performance agronomique (en vert) et la perception paysanne (en bleu).

Figure 1: *Overall performance indicator (histograms) and ranking (numerical values) for various fertilization practices, incorporating ecological performance related to soil health (in brown), agronomic performance (in green), and farmers' perceptions (in blue).*



surprenante, le SFR15 n'apparaît que 6e sur l'axe PP2, alors qu'il était premier sur l'axe agronomique. Les SFR16, SFR8 et SFR1 donnent également de très mauvais scores et classements car le riz a très mal poussé sur ces parcelles.

Une combinaison de ces deux types de perceptions, pour obtenir l'indicateur de perception paysanne (PP), montre que le SFR7 (lombricompost) paraît le plus intéressant (malgré de mauvaises notes sur le coût du fertilisant et son transport), suivi des SFR13 et SFR12. Les SFR16, SFR8 et SFR1 sont les moins bien considérés.

3.3. Indicateurs globaux et relations entre performances agronomiques et écologiques

L'intégration de tous les indicateurs dans un indice global de performance montre des différences assez fortes entre les SFR *(Figure 1).* Les SFR16 (sans fertilisation) et SFR8 (fertilisation minérale) donnent des valeurs faibles, les classant derniers (respectivement 16e et 15e) de tous les SFR. Les SFR1-2-3 présentés comme SFR "paysans" montrent des valeurs intermédiaires, les classant 14e, 13e et 12e. Tous les autres SFR, dits "innovants" donnent des scores assez proches, de 0,74 pour le SFR5 (classé 11e) à 0,87 pour le SFR15 (classé 1er).

Il est particulièrement intéressant de noter la relation positive existant entre l'indicateur de santé du sol et l'indicateur de performance agronomique (Corrélation de rang de Spearman, Rho= 0,712, P= 0,001962, *Figure 2*).

Cette relation montre toutefois des disparités entre les pratiques qui s'écartent de la droite et participent peu à ce modèle : par exemple, le SFR4 obtient un bon classement sur l'axe agronomique (2e) mais assez mauvais (11e) sur l'axe "santé du sol". A l'inverse, le SFR6 est relativement bien classé sur l'axe "santé du sol" (6e) mais assez mal sur la performance agronomique (13e). Le SFR9 classé 1er en termes de "santé du sol" est seulement 6e concernant la performance agronomique.

Les scores des indicateurs des fonctions agronomiques sont tous corrélés positivement et significativement entre eux *(Tableau 7).*

En revanche, concernant les indicateurs des fonctions du sol, nous notons des corrélations significatives entre la plupart des fonctions, excepté pour la fonction E4 (ravageurs) non significativement corrélée aux fonctions E2 (carbone) et E3 (nutriments). Enfin, les indicateurs des fonctions agronomiques sont significativement corrélés aux fonctions E1, E2 et E5 des sols. La fonction E3 (nutriments) n'est pas corrélée aux fonctions A1 (hauteur), A2 (biomasse) et A3 (rendement). La fonction E4

Figure 2 : Relation entre les classements (rangs) des SFR vus par les indicateurs de performance agronomique et de santé du sol (le rang 1 indique le meilleur classement, le rang 16 le moins bon classement). Pour les codes couleur des SFR, se reporter au *Tableau 1.*

Figure 2: *Relationship between the rankings of the SFRs as determined by agronomic performance and soil health indicators (rank 1 indicates the best ranking, rank 16 the worst). For the color codes of the SFRs, refer to Table 1.*

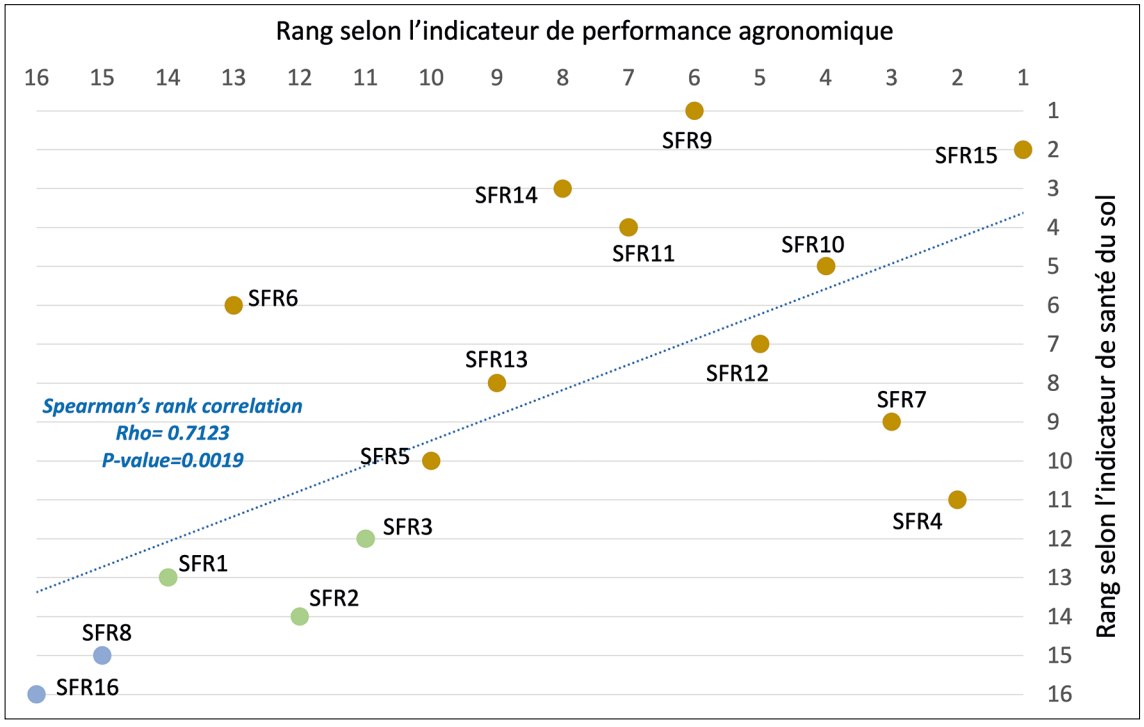


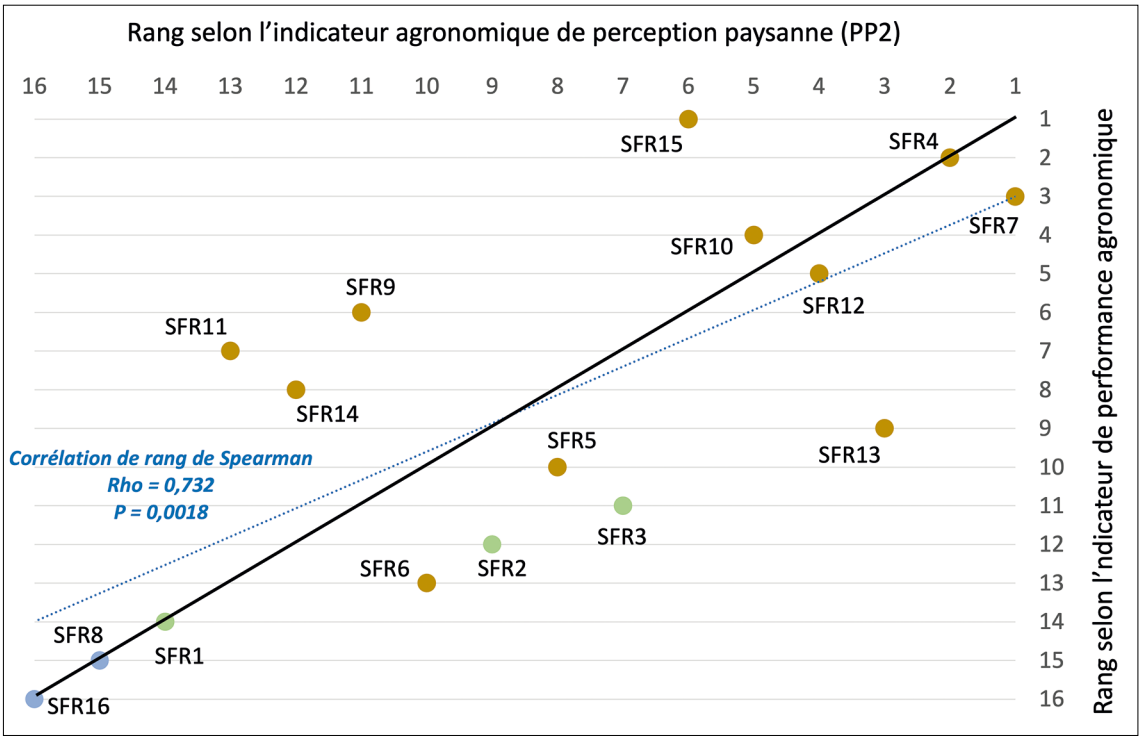
Tableau 7 : Matrice de corrélation (Pearson) entre les scores des indicateurs des fonctions du sol (E1 à E5) et des fonctions agronomiques (A1 à A5). Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0.05

Table 7: *Correlation matrix (Pearson) between the indicator scores for soil functions (E1 to E5) and agronomic functions (A1 to A5). Values in bold are significantly different from 0 at a significance level of alpha=0.05.*

Variables	E1	E2	E3	E4	E5	A1	A2	A3	A4	A5
E1	**1**	**0,79**	**0,67**	**0,62**	**0,87**	**0,74**	**0,81**	**0,75**	**0,76**	**0,83**
E2		**1**	**0,53**	0,38	**0,85**	**0,70**	**0,77**	**0,81**	**0,78**	**0,77**
E3			**1**	0,38	**0,64**	0,48	0,47	0,42	**0,54**	**0,54**
E4				**1**	**0,63**	**0,67**	**0,69**	0,49	0,32	**0,68**
E5					**1**	**0,75**	**0,82**	**0,74**	**0,82**	**0,84**
A1						**1**	**0,95**	**0,82**	**0,50**	**0,95**
A2							**1**	**0,92**	**0,69**	**0,99**
A3								**1**	**0,79**	**0,91**
A4									**1**	**0,69**
A5										**1**

Figure 3 : Relation entre les classements (rangs) des pratiques de fertilisation (SFR) vus par l'indicateur agronomique de perception paysanne (PP2) et l'indicateur de performance agronomique mesuré par les scientifiques (le rang 1 indique le meilleur classement, le rang 16 le moins bon classement). La courbe 1/1 est en noir foncé. Pour les codes couleur des SFR, se reporter au *Tableau 1.*

Figure 3: *Relationship between the rankings of fertilization practices (SFR)—as assessed by the agronomic indicator based on farmers' perceptions (PP2)—and the agronomic performance indicator as measured by scientists (rank 1 indicates the best ranking, rank 16 the worst). The 1:1 line is shown in dark black. For the color codes used for the SFR, please refer to Table 1.*



(ravageurs) n'est pas corrélée aux fonctions A3 (rendement) et A4 (qualité des grains).

Enfin, les indicateurs de performance agronomique, tels que mesurés par les scientifiques sont bien corrélés aux indicateurs de performance mesurés, sur le terrain, par les agriculteurs (PP2) si l'on en juge par les classements donnés aux différents SFR (Corrélation de rang de Spearman, Rho=0,7323, P=0,0018, *Figure 3*).

Pourtant certains SFR sont mieux classés par les agriculteurs que par les scientifiques, par exemple les SFR 2, 3, 13, alors que d'autres sont mieux classés par les scientifiques, par exemple les SFR 9, 11, 14 et 15.

3.4. Évolution des performances écologiques et agronomiques selon les apports en fertilisants

Les apports en éléments par les fertilisants montrent qu'une augmentation des apports permet à la fois une augmentation de la santé du sol *(Figure 4)* et de la performance agronomique du riz *(Figure 5)*. Ceci est vrai pour tous les éléments apportés C, N, P, K, Ca, Mg. Concernant la santé du sol, l'effet est particulièrement fort pour C (r^2= 0,79) puis Mg (r^2= 0,57) et K (r^2= 0,50). Concernant la performance agronomique, l'effet est particulièrement marqué pour C (r^2= 0,81) puis pour K (r^2= 0,57).

4. DISCUSSION

4.1. Variables sélectionnées

L'approche statistique par *Stepdisc* a permis de supprimer de nombreuses variables à partir des JDDs initiaux, qu'ils proviennent des mesures réalisées sur le sol ou sur la plante.

Concernant les variables du sol, la sélection a été particulièrement forte puisque seulement 16 % des variables ont été retenues. Le pH du sol est la variable qui discrimine le mieux les pratiques SFR. Cela rejoint de nombreux travaux indiquant le rôle majeur joué par le pH dans le fonctionnement des sols et la croissance des plantes. Dans les Ferralsols, l'acidité est un problème majeur entraînant une forte sorption du phosphore et des risques de toxicité aluminique pour les plantes. De nombreux travaux se sont ainsi penchés sur la résolution de cette contrainte (Raboin *et al*., 2016). Il est intéressant de noter que le stock de P résine arrive également en haut du classement des variables explicatives. Cela est probablement lié à l'augmentation du pH, ainsi qu'à des apports en P par certains fertilisants. Outre le pH et le P résine, deux variables liées à l'activité microbienne (mesurée par Ecoplates) sont en haut du classement : l'AWCD des polymères et l'indice RF. L'indique RF représente la richesse fonctionnelle de la communauté et correspond à la somme des substrats pour lesquels une activité microbienne est mesurée. Ces résultats suggèrent que les pratiques dites "innovantes" favorisent le rétablissement d'une communauté microbienne plus fonctionnelle, qui permet, plus spécifiquement, une décomposition plus rapide des polymères. D'autres variables ont fait l'objet d'une sélection, telle que la densité totale de nématodes qui renseigne sur la capacité de charge plus élevée pour les pratiques "innovantes', c'est-à-dire une plus grande quantité de ressources trophiques (bactéries et champignons) et/ou un environnement plus favorable (pH moins acide, nutriments plus disponibles). La vitesse de décomposition du thé rouge a également été sélectionnée, probablement liée au développement de microorganismes à capacités métaboliques plus larges. Trois descripteurs liés à la macrofaune du sol ont été retenus : la densité des prédateurs, le nombre de taxons et la biomasse de vers de terre. Comme pour les nématodes et les communautés microbiennes, certaines pratiques "innovantes' permettent une restauration de cette composante biotique du sol. L'augmentation de la diversité, des densités et des biomasses de la macrofaune peut expliquer le développement de certains prédateurs (araignées, chilopodes). Comme dans de nombreuses autres études, les vers de terre apparaissent comme des descripteurs pertinents pour expliquer les différences entre pratiques (Pérès *et al*., 2011 ; Batz *et al*., 2024). Les trois dernières variables retenues sont liées aux communautés microbiennes (P microbien) et aux nématodes (indice de structure et richesse taxonomique). Il est également intéressant de noter que certains descripteurs parfois présents dans la littérature n'ont pas été retenus par l'analyse : les mesures de respiration du sol, les teneurs en carbone et azote du sol, la densité de nématodes phytoparasites, l'agrégation du sol, la densité apparente, le nombre de cocons de vers de terre, les indices de maturité et d'enrichissement des nématodes, l'activité faunique mesurée par *Bait lamina*. Ces descripteurs ne sont pas discriminants après deux ans, en raison d'une absence d'évolution de ces paramètres (densité apparente, teneur en carbone du sol, agrégation) ou en raison d'une variabilité intra-traitement forte (nombre de cocons de vers de terre par exemple). Ces paramètres bien que non discriminants après deux ans le deviendront peut-être avec le temps, d'où la nécessité de suivre tous ces descripteurs dans le temps.

Concernant les descripteurs de performance agronomique, la sélection a été moins sévère et de nombreux descripteurs ont été retenus comme discriminants entre les pratiques. Certains paramètres répondent mieux aux différentes pratiques de fertilisation, comme la hauteur du riz et les teneurs en C, N et P des grains et des pailles. Le riz réagit ainsi rapidement aux différentes pratiques de fertilisation en termes de croissance et d'acquisition de nutriments. Le rendement est également un facteur discriminant entre les pratiques, et c'est aussi le cas pour certaines composantes du rendement. D'autres descripteurs n'ont pas été retenus par l'analyse comme le poids et le nombre

Figure 4 : Relation entre le score de l'indicateur écologique du sol et les quantités d'apports (en Kg/ha/an) en éléments par les fertilisants (C, N, P, K, Ca, Mg). Pour les codes couleur des SFR, se reporter au *Tableau 1.*

Figure 4: *Relationship between the soil ecological indicator score and the quantities of elements supplied (in kg/ha/year) via fertilizers (C, N, P, K, Ca, Mg). For the color codes used for the SFRs, please refer to Table 1.*

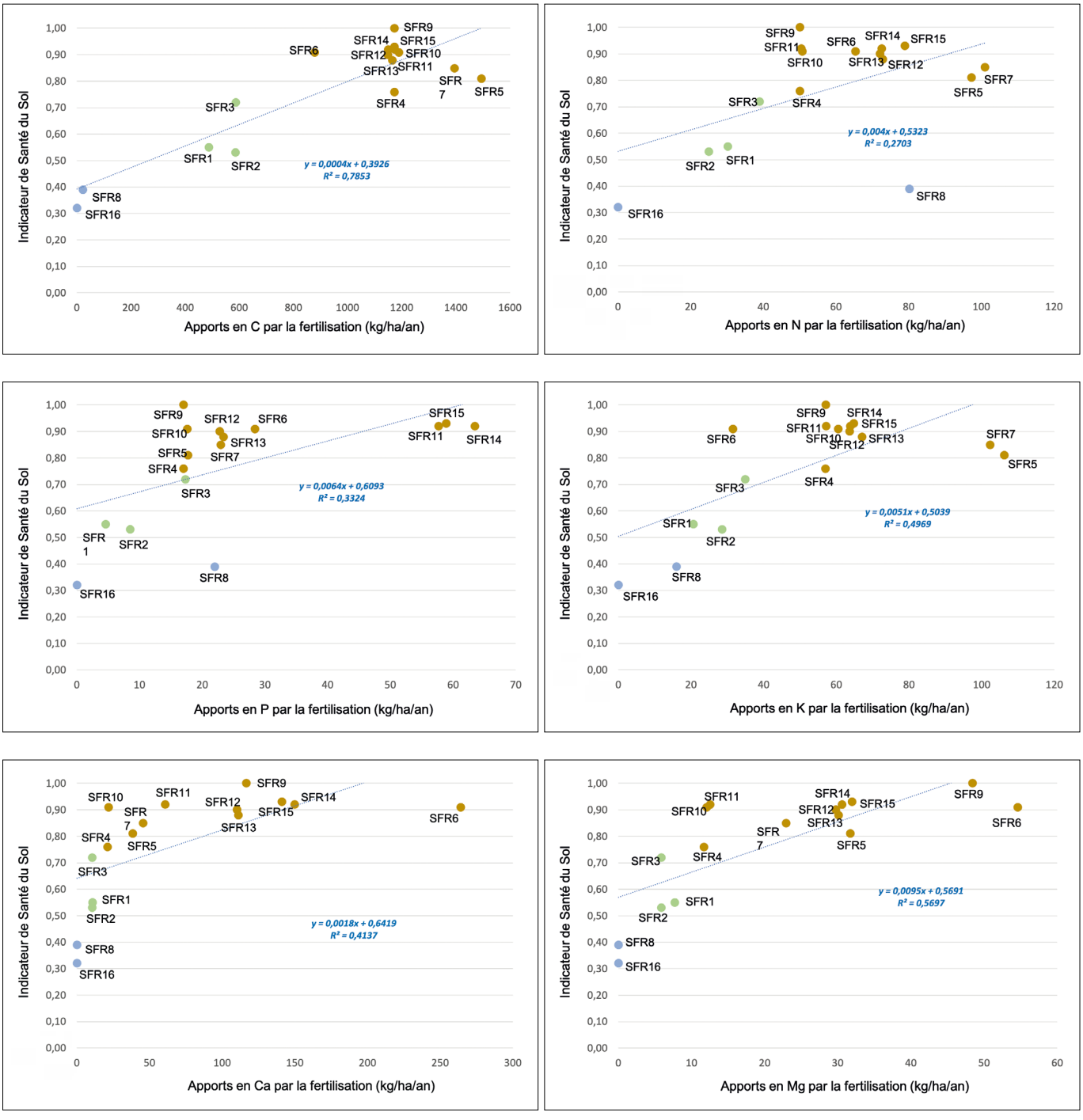
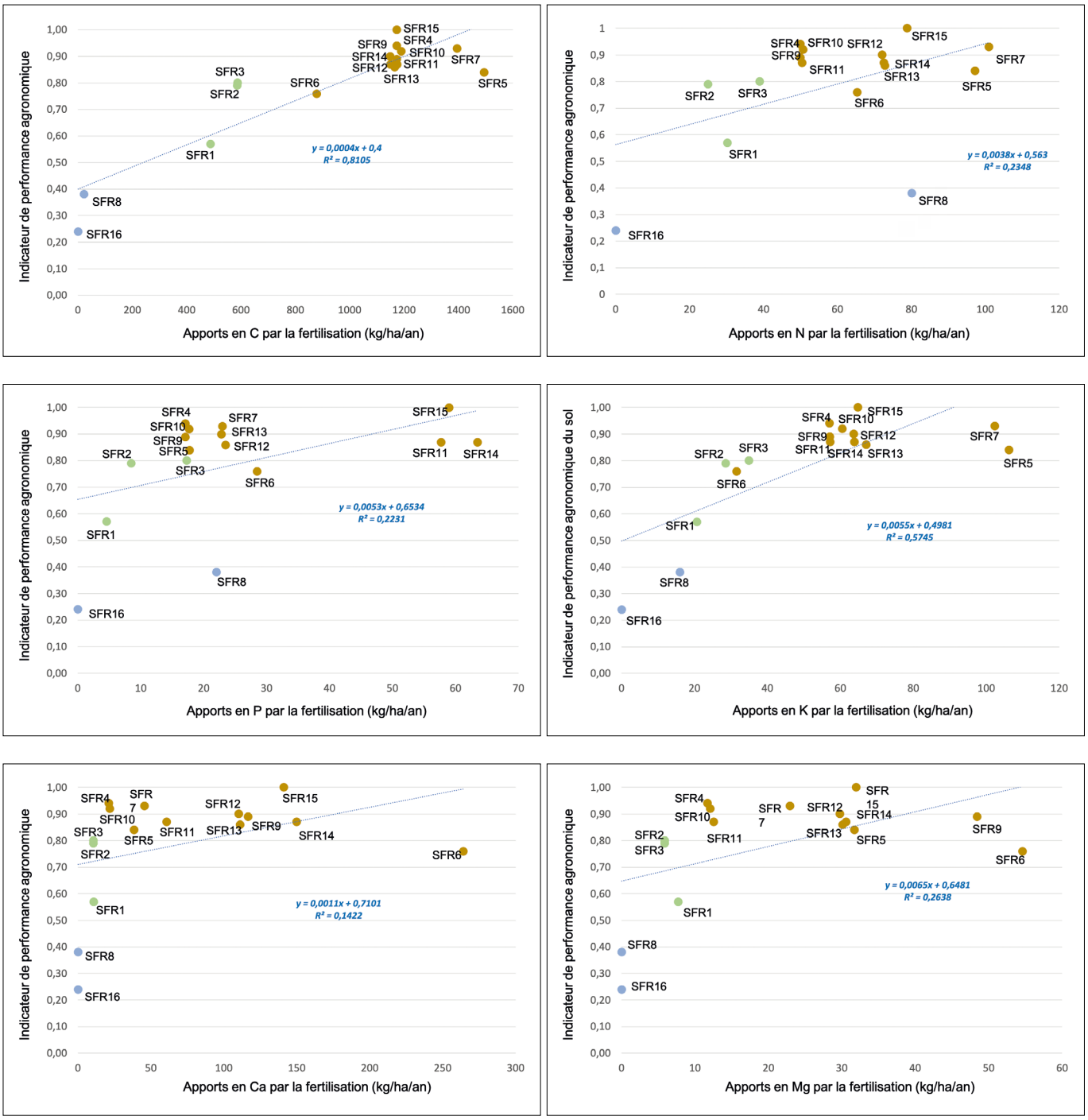


Figure 5 : Relation entre le score de l'indicateur de performance agronomique et les quantités d'apports en éléments par les fertilisants (C, N, P, K, Ca, Mg). Pour les codes couleur des SFR, se reporter au *Tableau 1.*

Figure 5: *Relationship between the agronomic performance indicator score and the quantities of elements supplied via fertilizers (C, N, P, K, Ca, Mg). For the color codes used for the SFRs, please refer to Table 1.*



de tiges et de panicules, ainsi que les éléments de caractérisation biochimique de la paille (fibres, cellulose, matières azotées, cendres totales). Ces résultats montrent que le riz réagit aux pratiques de fertilisation notamment via des augmentations de croissance (plus de C) et des acquisitions de nutriments N et P.

4.2. Performance écologique "santé du sol" selon les pratiques

L'indicateur global de santé du sol montre que les pratiques de fertilisation affectent différemment le fonctionnement du sol. Sans surprise, la pratique sans fertilisation (SFR16) arrive dernière du classement. L'absence d'apports au sol ne permet pas la restauration ni de la biodiversité ni des fonctions du sol. Ce traitement se classe systématiquement parmi les derniers pour l'ensemble des cinq fonctions du sol. De même, le SFR8 (avec fertilisation minérale seule), avant-dernier du classement, confirme également que l'absence d'apports carbonés se traduit par une absence de restauration de la santé du sol. Cette pratique conserve un pH acide, une très faible disponibilité du phosphore et des communautés et activités biologiques réduites. Ce SFR est dernier ou avant-dernier pour les cinq fonctions, excepté un classement moyen pour la fonction E3 "recyclage des nutriments". La restauration de la santé du sol apparaît plus élevée dès lors que des matières carbonées sont apportées au sol, notamment à des doses élevées. Ce constat est cohérent avec plusieurs travaux antérieurs montrant l'effet bénéfique des apports organiques pour soutenir l'activité biologique des sols (Lavelle *et al*., 2001). A de faibles doses d'apports, comme c'est le cas dans les SFR "paysans" 1, 2 et 3 (3 t/ha/an), la restauration de la santé du sol est réduite, quelle que soit la fonction écologique, exceptés des effets variés sur la fonction E4 "impact sur les ravageurs" pour lequel le SFR1 (poudrette de parc) a un très bon résultat, probablement car cette pratique pauvre en carbone et en nutriments, attire moins les ravageurs. Concernant les pratiques avec des apports élevés (6 t/ha/an), les pratiques les mieux classées sont celles qui associent des matières organiques (en mélange ou non) et des matières minérales. En effet, les SFR4 (fumier), SFR5 (fumier amélioré), SFR7 (lombricompost) se classent moins bien que les autres SFR innovants. Une exception est pour le SFR6 (compost) relativement bien classé surtout pour les fonctions E3 et E4. Combiner différentes matières fertilisantes permet, de fait, de combler les multiples carences nutritives des sols ferrallitiques (Raminoarison *et al*., 2019). La pratique la mieux classée sur l'indicateur global est le SFR9 (fumier + dolomie) qui permet notamment une restauration des fonctions E1 et E2. Cela est probablement lié à l'augmentation du pH du sol via l'apport de dolomie (Raminoarison *et al*., 2019 ; Trap *et al*., 2021b). L'apport du calcium et du magnésium de la dolomie permet une restauration de la santé du sol lorsqu'il est couplé à l'apport de carbone via le fumier *(Figure 4).* Le fumier mélangé avec des cendres ou de l'hyperfos (triple phosphate) ne donne pas de résultats aussi satisfaisants sur la santé du sol que lorsqu'il est mélangé avec de la dolomie. Bien que correctement classés sur l'indicateur global, ces SFRs ne permettent pas de restaurer la fonction E1, et donc d'améliorer la physico-chimie du sol, et notamment le pH. En revanche, ce sont les SFR qui améliorent le mieux la biodiversité du sol (fonction E5). Les mélanges d'un ensemble de matières organiques (fumier + compost + lombricompost) avec des matières minérales, montrent des effets contrastés selon la matière minérale avec laquelle ils sont mélangés, même si globalement, ces SFR présentent des classements élevés pour les fonctions E1 et E3. Ainsi, l'ajout de guano (SFR15) ou de l'hyperfos (SFR14) donne de meilleurs résultats globaux que l'absence d'ajout (SFR12) ou l'ajout de cendres (SFR13).

Les résultats de l'indicateur global montrent que celui-ci est guidé par les quantités apportées en éléments fertilisants. Les résultats montrent notamment la nécessité d'apporter des fertilisants carbonés à haute dose. Plus ces apports sont importants, meilleure est la restauration du sol. De plus, l'indicateur "santé du sol' est guidé par les apports en Mg, K, Ca, N et P, confirmant l'aspect multi-carencé de ces sols vis-à-vis de la plante, mais également vis-à-vis de la biodiversité et des fonctions écologiques du sol (Trap *et al*., 2024). La restauration de la santé des Ferralsols des Hautes Terres malgaches nécessitent ainsi des quantités élevées de fertilisants carbonés, associés préférentiellement à des apports minéraux, dans le but de lever l'ensemble des carences en nutriments et en carbone et de soutenir l'activité biologique.

4.3. Performance agronomique selon les pratiques

Les pratiques de fertilisation testées dans l'essai ont des conséquences différentes sur la performance agronomique du riz pluvial. Les résultats obtenus pour le SFR16 confirment qu'une absence totale de fertilisation limite la croissance du riz, et de fait empêche toute production agricole. Les indicateurs par fonction agronomique sont très faibles pour ce SFR et le classe en dernière position, excepté pour la fonction A5 "qualité des pailles'. Ce résultat confirme que les Ferralsols des Hautes terres de Madagascar sont multidéficients en de nombreux éléments et qu'une production agricole sans stratégie de fertilisation y est impossible (Raminoarison *et al*., 2019). Cependant, une fertilisation minérale, seule, ne règle pas le problème comme le montrent les résultats obtenus avec le SFR8 (100 kg/ha de NPK + 100 kg/ha d'urée) qui apparaissent étonnants et contre-intuitifs. Après avoir donné une production de riz très moyenne en première année de l'essai (données non montrées), le rendement a été très faible en deuxième année. Ceci peut s'expliquer, d'une part par l'acidification du sol par l'engrais minéral (le pH est faible dans ce SFR) qui peut limiter la disponibilité des nutriments, et notamment du phosphore ;

d'autre part par l'absence dans le NPK et l'urée des autres nutriments déficients de ces sols (Ca et Mg). D'un autre côté, des applications organiques à dose réduite (3 t/ha) ne permettent qu'une croissance relativement faible du riz, en raison des apports limités en nutriments. C'est notamment le cas de la poudrette de parc (SFR1) constituée d'un mélange de sol et de fumier de bovin. L'apport de fumier seul (SFR2) ou associé à du NPK (40 kg/ha) (SFR3) donne des scores faibles pour toutes les fonctions agronomiques. L'ajout d'engrais minéral à des quantités faibles de fumier apporte donc relativement peu de bénéfices si nous comparons les classements pour les différentes fonctions, alors que les apports de matières organiques à doses plus fortes (6 t/ha) engendrent une performance agronomique plus élevée, quelles que soient les matières apportées. Cela est vrai sauf pour le compost SFR6 et le fumier amélioré SFR5 qui sont mal classés sur l'ensemble des fonctions agronomiques. Pour tous les autres apports à 6 t/ha, les résultats sont bien meilleurs et sans effets très marqués des matières apportées seules, ou en mélanges, avec ou sans fertilisant minéral. Le lombricompost (SFR7) donne de très bons résultats agronomiques, seul ou dans les mélanges l'incluant. Dans les mélanges à base de fumier, l'apport de cendres apporte un léger avantage par rapport à l'apport d'hyperfos. Dans les mélanges basés sur l'assemblage de fumier, de compost et de lombricompost, l'apport de guano permet une meilleure performance agronomique que ceux avec apports de cendres ou d'hyperfos. Le guano de chauve-souris, utilisé à Madagascar, est connu pour ses propriétés fertilisantes via des apports en N, P, K, Ca et son pouvoir alcalinisant (Thi Sothearen *et al*., 2014). D'une façon générale, la performance agronomique augmente de façon linéaire avec les apports en C, soulignant ce besoin d'apporter plus de matières organiques pour favoriser la croissance, la nutrition et les rendements du riz pluvial. La performance est également liée aux apports en éléments nutritifs. C'est donc l'augmentation des apports organiques qui compte le plus, les apports en fertilisants minéraux n'ayant qu'une influence minime sur la performance globale. Notons toutefois qu'une faible fertilisation en Ca et en P permet d'atteindre rapidement une sorte de plateau dans la performance agronomique (excepté le SFR8 dans le cas du P). Une fois ces seuils atteints (environ 10 $kg.ha^{-1}$), une fertilisation supplémentaire n'a pas de conséquence notable sur la performance. Cela est intéressant notamment pour le P souvent perçu comme l'élément principalement limitant dans ces sols (Rabeharisoa *et al*., 2006).

4.4. Relation entre santé du sol et performance agronomique selon les pratiques

L'indicateur de santé du sol est corrélé à l'indicateur de performance agronomique *(Figure 2)*. Les deux indicateurs varient dans le même sens. Pourtant, dans la littérature, la santé du sol est rarement mise en relation avec des services mesurés (ici la production alimentaire) (Juhos *et al*., 2016 ; Xing *et al*., 2025). Une corrélation ne veut pas dire une relation de cause à effet qui reste à démontrer. On peut toutefois penser avec raison que restaurer le sol va influencer la croissance des plantes (Romero *et al*., 2024). Ceci est notamment vrai pour les propriétés chimiques et nutritives du sol qui jouent directement sur la biodisponibilité des nutriments et la nutrition des plantes. C'est pourquoi les fonctions agronomiques, toutes corrélées entre elles, sont significativement corrélées à la fonction E1 liée au pH du sol. La restauration du pH du sol est ainsi le gage d'une meilleure production de riz pluvial. Plus surprenante est l'absence de corrélation significative entre les fonctions agronomiques et la fonction E3 liée aux nutriments. Le stock de P résine et le P microbien qui caractérisent cette fonction E3, ne sont peut-être pas les proxys les plus pertinents de la biodisponibilité des nutriments. D'une part, il aurait été intéressant de mesurer les teneurs et stocks en Ca, Mg, K disponibles dans le sol qui semblent fortement influencer la production végétale et qui sont très limitants pour la croissance du riz pluvial dans ces mêmes sols (Raminoarison *et al*., 2019). D'autre part, en ce qui concerne le phosphore, d'autres métriques liées à la disponibilité du phosphore pourraient être envisagées (P Olsen, P rémanent). Enfin, la performance agronomique globale (vu à travers ses 5 fonctions) est significativement corrélée à la fonction E2 (dynamique du carbone) et à la fonction E5 (biodiversité du sol). Cette fonction E2 est principalement caractérisée, dans notre indicateur, par la capacité des organismes du sol (microorganismes notamment) à décomposer des substrats organiques complexes (principalement AWCD-polymères et thé rouge). Elle est donc le signe qu'une activité biologique renforcée par des pratiques de fertilisation adéquates peut impacter la production agricole, possiblement en améliorant le recyclage des nutriments, les rendant plus disponibles pour les plantes. La relation entre la fonction E5 et les fonctions agronomiques rejoint ce point. L'augmentation de la diversité, de la densité et de la biomasse des organismes du sol (nématofaune et macrofaune) est un signe d'une meilleure capacité du sol à supporter cette diversité et ces abondances. C'est également le signe d'un meilleur fonctionnement du sol qui affecte favorablement la production agricole et qui a possiblement comme base la stimulation des capacités microbiennes de décomposition des molécules polymérisées et complexes.

4.5 Relations entre santé du sol, performance agronomique et perception paysanne

Notre étude a montré la capacité de certaines fertilisations à améliorer à la fois la santé du sol et la performance agronomique. Cependant, la décision des agriculteurs à développer une stratégie de fertilisation dépend de divers facteurs socio-économiques. Leur préférence dans le choix des fertilisants s'exprime d'abord sur l'effet attendu sur le riz (Q1.8), puis ensuite, sur l'effet attendu sur le sol (Q1.2). Sur le premier critère (Q1.8), le classement par les agriculteurs a été meilleur pour les fertilisants à base d'un mélange de fumier, compost et lombricompost. Les agriculteurs ont une très bonne représentation de ces mélanges de matières qu'ils connaissent et apprécient. Concernant les matières seules, ils préfèrent le lombricompost et le compost au fumier, ce dernier étant jugé intéressant seulement s'il est combiné à d'autres matières (comme ils le font habituellement), c'est ce qu'on voit pour les SFR 3, 9, 10 et 11, mieux classés que les SFR 2 et 4 (fumier seul). Sur le second critère (Q1.2, amélioration du sol), il semble que les agriculteurs n'apprécient guère les pratiques avec engrais minéral (SFR 3, 10, 14 et 15). Par ailleurs, les agriculteurs, lors des échanges en ateliers, ont exprimé leur réticence vis-à-vis du NPK qu'ils jugent comme « brûlant le riz », « tassant le sol » et, pour certains, « attirant les insectes ravageurs » ; ils l'utilisent ainsi toujours en association avec des matières organiques et jamais seul. L'ensemble des critères socio-économiques (PP1) indique une perception très bonne des agriculteurs pour les assemblages à base de fumier, compost et lombricompost. Le lombricompost seul reçoit une faible note globale en raison de ses faibles scores obtenus pour les critères liés au coût (dernier au classement) et au transport (avant-dernier). Ceci s'explique par le fait que la plupart des agriculteurs de cette région ne produisent pas de lombricompost et y ont accès sous forme d'un produit commercial vendu à un prix relativement élevé qui limite son usage. Ce prix élevé pourrait paradoxalement expliquer également la très bonne perception qu'ils en ont. Grâce à la méthode d'évaluation mise en œuvre, il a donc été possible d'identifier un point de blocage et il sera donc possible d'y remédier. Ainsi, un accompagnement des agriculteurs à la fabrication de lombricompost prenant en compte les facteurs d'accès aux intrants, à la biomasse, aux coûts (y compris le temps de travail), et à la circulation (commercialisée, ou échangée) de ce fertilisant dans un réseau d'agriculteurs, devrait permettre d'augmenter la production locale de ce fertilisant qu'ils considèrent comme très performant. L'évaluation au champ des SFR reposant sur des critères agronomiques définis par les agriculteurs eux-mêmes a donc donné des résultats différents des précédents, mettant en avant le lombricompost et le fumier. Le classement des SFR fait par les agriculteurs enquêtés est cependant bien corrélé, positivement, à celui du classement établi par les chercheurs *(Figure 3).*

5. CONCLUSIONS

L'approche développée dans cette étude permet une comparaison fine entre des pratiques de fertilisation testées dans un essai au champ. Les scores obtenus pour chacun des indicateurs permettent une comparaison des traitements testés, que ce soit du point de vue de la santé du sol et de la performance agronomique, chacune analysée à travers cinq fonctions, et également du point de vue de l'évaluation que les agriculteurs ont des pratiques testées. Notre étude confirme l'intérêt d'aborder les indicateurs par fonction comme cela avait été réalisé par Obriot *et al.* en 2016. En effet, la construction de l'indicateur jusqu'à un niveau fonctionnel permet d'expliquer plus en détails les performances mesurées.

Dans la présente étude, les différents indicateurs des différentes fonctions n'ont pas été pondérés pour calculer l'indicateur final. Une pondération pourrait être envisagée. Par exemple, pour la performance agronomique, les fonctions "rendement" et "qualité des grains" paraissent d'un plus grand intérêt que les fonctions "croissance" ou "qualité des pailles" pour les agriculteurs. Néanmoins, la pondération introduit un avis expert que nous souhaitions faire intervenir le moins possible dans notre étude.

Aussi, il faudrait pouvoir réévaluer à plus long terme les pratiques à l'aide de la même méthodologie et vérifier si la pratique la plus performante évaluée ici est toujours la plus performante après plusieurs années. Cela permettrait également de savoir si les SFR améliorant le plus les fonctions écologiques du sol s'accompagnent de performances agronomiques élevées à plus long terme. En effet, nous savons que certains processus améliorant les fonctions écologiques bénéfiques à la production sont des processus qui mettent plusieurs années à évoluer : l'amélioration de la structure du sol par exemple ou du recyclage des nutriments ainsi que l'amélioration de la biodiversité et, surtout, la séquestration du carbone.

Les travaux réalisés avec les agriculteurs associés au projet, dans le cadre des ateliers, ont montré que le choix d'une pratique de fertilisation par les agriculteurs repose sur une perception multi-dimensionnelle associée aux fertilisants concernant les effets espérés sur la plante et le sol, à partir de l'état de leurs connaissances actuelles mais aussi d'un ensemble de contraintes sociotechniques intégrées liées à leur accès et leur usage (Audouin *et al*., 2025). Notre étude permet d'identifier des pistes de co-construction visant à explorer collectivement les différentes options techniques possibles, en limitant les risques de perte de récolte pour les agriculteurs et en générant de nouvelles connaissances utiles à toutes les parties prenantes, couvrant les dimensions de la santé du sol, de la performance agronomique et des besoins et intérêts des agriculteurs. D'un point de vue général, l'indicateur a permis de révéler la corrélation entre la performance agronomique et la santé du sol. Mais les meilleures pratiques pour ces deux performances ne correspondent pas exactement aux réalités exprimées par les agriculteurs. C'est

ainsi que le lombricompost qui donne de bons résultats sur le sol et la plante est peu utilisé par les agriculteurs en raison de son coût. L'un des objectifs de la recherche/développement sera d'accompagner les agriculteurs à développer cette technique en réduisant son coût et en facilitant son accès à un large réseau d'agriculteurs. Il faudra également étudier les modalités de son intégration dans des mélanges de matières comme cela semble attendu par les agriculteurs.

6. REMERCIEMENTS

L'étude a été réalisée dans le cadre du projet SECuRE "Soil ECological function REstoration to enhance agrosystem services in rainfed rice cropping systems in agroecological transition", financé par la Fondation Agropolis (Programme Investissements d'Avenir, ANR-10-LABX-0001-01) (contrat ID 1605-007). Les auteurs remercient Jean-Baptiste Rasolofomanana, agriculteur à Imerintsiatosika pour la mise à disposition du terrain sur lequel l'essai a été installé. Ils remercient également la Commune (mairie) d'Imerintsiatosika pour avoir permis cette étude. Le travail de Maurane Damoiseaux, alors élève-ingénieur à ESA Angers, a été supervisé par Dr. Mario Cannavacciuolo, à qui nous exprimons nos remerciements.

7. BIBLIOGRAPHIE

Altieri M.A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. In: Invertebrate biodiversity as bioindicators of sustainable landscapes, Paoletti G. (Ed.), Elsevier, Amsterdam, pp. 19-31. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50019-9.50005-4.

Andrews S.S., Karlen D.L., Mitchell J.P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. Agriculture, Ecosystems & Environment, 90, pp. 25-45. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8.

Andrews S.S., Karlen D.L., Cambardella C.A. (2004). The soil management assessment framework. Soil Science Society of America Journal ,68, pp. 1945-62. https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945.

Audouin S., Ndah H.T., Toillier A., Knierim A., Randrianarisona N., Andriamaniraka H., Mathé S. (2025). From technical advisory to innovation support services: coexistence and transition of support models in the agricultural sector in Madagascar, The Journal of Agricultural Education and Extension, DOI:10.1080/1389224X.2025.2461451

Barrios E. (2007). Soil biota, ecosystem services and land productivity. Ecological Economics, Special Section - Ecosystem Services and Agriculture, 64, pp. 269-85. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.004.

Bartz M.L.C., Dudas R.T., Demetrio W.C., Brown G.G. (2024). Earthworms as soil health indicators in no-tillage agroecosystems. European Journal of Soil Biology, 121, Article 103605. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103605

Bastida F., Zsolnay A., Hernández T., Garcia C. (2008). Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. Geoderma, 147, pp. 159-71. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007.

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, pp. 121-34.

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.

Bockstaller C., Angevin F. (2026) Comment agréger des indicateurs ? Un panorama des méthodes d'agrégation. Innovations Agronomiques, 2026, 115, pp.133-146. 10.17180/ciag-2026-vol115-art08.

Bockstaller C., Cousin I. (2024). Evaluer la qualité des sols à l'aide d'indicateurs : une revue. Innovations Agronomiques, 94, 414–430. https://doi.org/10.17180/CIAG-2024-VOL94-ART28.

Brussaard L., de Ruiter P.C., Brown G.G. (2007). Soil biodiversity for agricultural sustainability. Agriculture, Ecosystems & Environment, Biodiversity in agricultural landscapes: Investing without losing interest, 121, pp. 233-44. https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.013.

Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., de Deyn G., de Goede R., Fleskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., Van Groenigen J.W., Brussaard L. (2018). Soil quality – A critical review. Soil Biology and Biochemistry, 120, pp. 105-25. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030.

Cousin I. (coord.), Desrousseaux M. (coord.), Angers D., Augusto L., Ay J.S., Baysse-Lainé A., Branchu P., Brauman A., Chemidlin Prévost-Bouré N., Compagnone C., Gros R., Hermon C., Keller, C. Laroche B., Meulemans G., Montagne D., Pérès G., Saby N., Vaudour E., Villerd J., Violle C., Lelièvre V., de Mareschal S., Brichler M.C., Froger C., Itey J., Leenhardt S. (coord.) (2025). Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs. Rapport d'étude, INRAE (France), 780 pages. DOI 10.17180/qnpx-x742.

Craheix D., Bergez J.-E., Angevin F., Bockstaller C., Bohanec M., Colomb B., Doré T., Fortino G., Guichard L., Pelzer E., Messean A., Réau R., Sadok W. (2015). Guidelines to design models assessing agricultural sustainability, based upon feedbacks from the DEXi decision support system. Agronomy for Sustainable Development, 35(4), pp. 1431-1447. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0315-0

Damoiseaux M. (2020). Proposition d'indicateurs multicritères d'évaluation de performance de pratiques de restauration des fonctions écologiques des sols : le contexte de la riziculture pluviale des Hautes Terres de Madagascar. Mémoire de fin d'études, ESA Angers, 85 pages + annexes.

de Deyn G.B., Raaijmakers C.E., van der Putten W.H. (2004). Plant community development is affected by nutrients and soil biota. Journal of Ecology, 92, pp. 824-34. https://doi.org/10.1111/j.0022-0477.2004.00924.x.

FAO (2019). Les 10 éléments de l'agroécologie. Guider la transition vers des systèmes alimentaires et agricoles durables. www.fao.org/agroecology/fr, agroecology@fao.org

Fernandes J.C., Gamero C.A., Lança Rodrigues J.C., Mirás-Avalos J.M. (2011). Determination of the quality index of a Paleudult under sunflower culture and different management systems. Soil and Tillage Research, 112, pp. 167-74. https://doi.org/10.1016/j.still.2011.01.001.

Fine A.K., van Es H.M., Schindelbeck R.R. (2017). Statistics, scoring functions, and regional analysis of a comprehensive soil health database. Soil Science Society of America Journal, 81, pp. 589-601. https://doi.org/10.2136/sssaj2016.09.0286.

Grislain Q., Raharimalala S., Razafimahatratra H.M., Harenaniaina B.O., Raharison T., Randriamihary F. Sarobidy E.J., Muller B., Bélières J.F. (2025). Insertion des pratiques agroécologiques et performances dans les exploitations agricoles familiales des Hautes Terres des régions de Vakinankaratra et Itasy. Antananarivo : CIRAD, 165 p. https://doi.org/10.18167/agritrop/20360

HLPE (2019). Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security, Rome.

Juhos K., Szabó S., Ladányi M. (2016). Explore the influence of soil quality on crop yield using statistically-derived pedological indicators. Ecological Indicators, 63, pp. 366-373.

Lavelle P., Barros E., Blanchart E., Brown G., Desjardins T., Mariani L., Rossi J.P. (2001). SOM management in the tropics: Why feeding the soil macrofauna? Nutrient Cycling in Agroecosystems, 61, pp. 53-61.

Lehmann J., Bossio D.A., Kögel-Knabner I., Rillig M.C. (2020). The concept and future prospects of soil health. Nature Reviews Earth & Environment 1, 544–553 (2020). https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8

Li G., Chen J., Sun Z., Tan M. (2007). Establishing a minimum dataset for soil quality assessment based on soil properties and land-use changes. Acta Ecologica Sinica, 27, pp. 2715-2724. https://doi.org/10.1016/S1872-2032(07)60059-6.

Mulangu F.M., Silva O., Maria A. (2024) Navigating two decades of high poverty and charting a course for change in Madagascar: Poverty and equity assessment. Washington, D.C.: World Bank Group. http://documents.worldbank.org/curated/en/099021424172020915

Obriot F., Stauffer M., Goubard Y., Cheviron N., Pérès G., Eden M., Revallier A., Vieublé-Gonod L., Houot S. (2016). Multi-criteria indices to evaluate the effects of repeated organic amendment applications on soil and crop quality. Agriculture, Ecosystems & Environment, 232, pp. 165-78. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.004.

OECD, European Union, Joint Research Centre-European Commission (2008). Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide. OECD Publishing.

Pérès G., Vandenbulcke F., Guernion M., Hedde M., Beguiristain T., Douay F., Houot S., Piron D., Richard A., Bispo A., Grand C., Galsomies L., Cluzeau D. (2011). Earthworm indicators as tools for soil monitoring, characterization and risk assessment: An example from the national Bioindicator programme (France). Pedobiologia, 54(Supplement), S77-S87. https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2011.09.015

Rabeharisoa L., Morel C., Fardeau J.C. (2006). Phosphorus bioavailability in Ferralsol ''tanety'' of Madagascar determined by coupling both sorption and isotopic dilution experiments. In: Proceedings combating soil degradation to enhance food security in Africa. The role of nuclear techniques in developing improved soil, water and nutrient management practices. ICRAF, Nairobi.

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, pp. 99-108.

Raharijaona S.N.F., Blanchart E., Razafindrakoto M., Rafolisy T., Salgado P., Razafimbelo T., Autfray P., Ratsiatosika O., Bernard L., Trap J. (2023). Responses of soil nematodes to combined bio-organo-mineral fertilizers on upland rice cropping in the highlands of Madagascar. Proceedings of the Zoological Society, 76, pp. 224-240. doi: 10.1007/s12595-023-00470-9.

Raminoarison M., Razafimbelo T., Rakotoson T., Becquer T., Blanchart E., Trap J. (2019). Multiple-nutrient limitation of upland rainfed rice in Ferralsols: a greenhouse nutrient-omission trial. Journal of Plant Nutrition, 43, pp. 270-284. doi.org/10.1080/ 01904167.2019.1676906.

Raminoarison M., Jaillard B., Razafimbelo T., Rahajaharilaza K., Blanchart E., Trap J. (2024). Optimizing soil and plant functions: Combinatory design of fertilizing resources assemblage for rainfed rice in Madagascar. Experimental Agriculture, 60, e18, doi:10.1017/S0014479724000103.

Randriamarolaza L.Y.A., Aguilar E. (2023). Rainy season and crop calendars comparison between past (1950–2018) and future (2030–2100) in Madagascar. Meteorological Applications, 30, e2146. https://doi.org/10.1002/met.2146

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, pp. 39-49.

Ratsiatosika O., Blanchart E., Razafimbelo T., Razafindrakoto M., vom Brocke K., Cao-Hamadou T.V., Rakotomalala Andriamarosata J.M., Ramanantsoanirina A., Trap J. (2021). Does rice breeding affect the ability of plants to interact with earthworms in nutrient-depleted Ferralsols? Applied Soil Ecology, 163, 103958.

Ratsiatosika O., Trap J., Herinasandratra V., Razafimbelo T., Bernard L., Blanchart E. (2024). Earthworms enhance the performance of organic amendments in improving rice growth and nutrition in poor Ferralsols. Soil Biology and Biochemistry, 195, 109477.

Razafimbelo T., Albrecht A., BecquerT., Bernard L., Chevallier T., Erktan A., Chapuis-Lardy L., Trap J., Andriamananjara A., Rabenarivo M., Rafolisy T., Rakotoson T., Ramifehiarivo N., Razafindrakoto M., Blanchart E. (2022). Priorities for soil research and sustainable management in Madagascar. Geoderma Regional 29, e00518.

Razanamalala K., Fanomenzana A.R., Razafimbelo T., Chevallier T., Trap J., Blanchart E., Bernard L. (2018). The priming effect generated by stoichiometric decomposition vs nutrient mining in cultivated tropical soils: actors and drivers. Applied Soil Ecology, 126, pp. 21-33.

Razanamalala K., Razafimbelo T., Maron P.A., Ranjard L., Chemidlin-Prévost-Bouré N., Dequiedt S., Becquer T., Trap J., Blanchart E., Bernard L. (2023). Short-term PE generation processes in the soils of a farmer plots network in the Madagascar Highlands: actors and drivers. Microbiology Research, 14, pp. 1702–1719. https://doi.org/10.3390/microbiolres14040117.

Rinot O., Levy G.J., Steinberger Y., Svoray T., Eshel G. (2019). Soil health assessment: a critical review of current methodologies and a proposed new approach. Science of The Total Environment, 648, pp. 1484-1491. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.259.

Romero F., Labouyrie M., Orgiazzi A., Ballabio C., Panagos P., Jones A., Tedersoo L., Bahram M., Guerra C.A., Eisenhauer N., Tao D., Delgado-Baquerizo M., García-Palacios P., van der Heijden M.G.A. (2024). Soil health is associated with higher primary productivity across Europe. Nature Ecology & Evolution, 8(10), 1847-1855. https://doi.org/10.1038/s41559-024-02511-8

Sharma K.L., Sharma S.C., Bawa S.S., Singh S., Chandrika D.S., Sharma V., Khokhar A., Grace J.K., Rao Ch.S., Maruthi Sankar G.R., Ravindrachary G., Reddy K.S., Lal M., Kumar T.S., Rani K.U. (2015). Combined effect of tillage and organic fertilization on soil quality key indicators and indices in alluvial soils of Indo-Gangetic Plains under rainfed maize–wheat system. Archives of Agronomy and Soil Science, 61, pp. 313-327. https://doi.org/10.1080/03650340.2014.933319.

Thi Sothearen, Furey N.M., Jurgens J.A. (2014). Effect of bat guano on the growth of five economically important plant species. Journal of Tropical Agriculture, 52, pp. 169-173.

Trap J., Blanchart E., Ratsiatosika O., Razafindrakoto M., Becquer T., Andriamananjara A., Morel C. (2021a). Effects of the earthworm *Pontoscolex corethrurus* on rice P nutrition and plant-available soil P in a tropical Ferralsol. Applied Soil Ecology, 160, 103867.

Trap J., Ranoarisoa M.P., Raharijaona S., Rabeharisoa L., Plassard C., Mayad E.H., Bernard L., Becquer T., Blanchart E. (2021b). Agricultural practices modulate the beneficial activity of bacterial-feeding nematodes on plant growth and nutrition: evidence from an original intact soil core technique. Sustainability, 13, 7181. https://doi.org/10.3390/su13137181.

Trap J., Raminoarison M., Cébron A., Razanamalala K., Razafimbelo T., Becquer T., Plassard C., Blanchart E., Bernard L. (2024). Multiple nutrient limitation of the soil micro-food web in a tropical grassland revealed by nutrient-omission fertilization. Applied Soil Ecology, 198, 105376.

Xing Y., Wang X., Mustafa A. (2025). Exploring the link between soil health and crop productivity, Ecotoxicology and Environmental Safety, 289, 117703.