

L'Institut Agro Rennes-Angers

Site d'Angers **Site de Rennes**

| | |
|--|--|
| <p>Année universitaire : 2023 - 2024</p> <p>Spécialité :Horticulture.....</p> <p>Spécialisation (et option éventuelle) : Production Végétale Durable</p> | <p>Mémoire de fin d'études</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p> |
|--|--|

Relation entre santé du sol et performances agronomiques

Cas de la fertilisation du riz pluvial des Hautes Terres de Madagascar

Par : Léonor COQUELIN de LISLE

Soutenu à Montpellier le 30/09/2024

Devant le jury composé de :

Président : Aurélie METAY

Rapporteur : Alexis THOUMAZEAU

Enseignant référent : Brigitte BRUNEL

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers

Mémoire de fin d'études

présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur horticole
Spécialité/Mention : Horticulture
Option/Parcours : Production Végétale Durable

Relation entre santé du sol et performances agronomiques

Cas de la fertilisation du riz pluvial des Hautes Terres de Madagascar

par Léonor COQUELIN de LISLE

Année de soutenance : 2024

**Mémoire préparé sous la direction
de : Brigitte BRUNEL**

Présenté le : 12/09/2024

devant le jury :

Aurélie METAY

Brigitte BRUNEL

Alexis THOUMAZEAU

**Organisme d'accueil : Institut de
Recherche pour le Développement, UMR
Eco&Sols**

Maîtres de stage :

Éric BLANCHART

Laetitia BERNARD

Jean TRAP

Résumé

L'augmentation de la population mondiale exige des systèmes agricoles durables, car les méthodes intensives actuelles dégradent l'environnement et épuisent les ressources naturelles. L'agroécologie, qui s'appuie sur les services écosystémiques et les fonctions du sol, représente une approche prometteuse. Le projet SECuRE met en œuvre cette approche en testant divers types de fertilisation pour améliorer la culture de riz pluvial sur des Ferralsols multidéficients dans les Hautes Terres de Madagascar. Sur six ans, 16 à 25 fertilisations, basées sur des ressources locales, sont comparées. Certaines sont organiques (avec un apport annuel de 3 ou 6 tonnes/ha), d'autres associent l'apport d'une matière organique (MO) et d'une minérale (MM), et d'autres sont des mélanges de plusieurs MO associées ou non avec une MM (4 types de matières au total). Ces traitements sont comparés à deux témoins : un sans fertilisation et un autre avec la fertilisation minérale recommandée. Les résultats montrent que les témoins produisent significativement moins que les autres traitements (0 kg/ha pour le SFR 16 et 5,65 fois moins que le rendement moyen pour le SFR 08) mais sans différence significative entre ces derniers (rendements compris entre 1,12 et 1,83 kg/ha). Un classement des rendements de riz montre l'ordre croissant suivant : fertilisation 3 t < MO 6 t < MO simple + MM < mélange MO + MM < lombricompost. Les ANOVA à un facteur montrent que l'effet des traitements sur les densités de macrofaune, de nématodes, de coléoptères ravageurs et de vers de terre n'est pas significatif. Cependant, les meilleurs rendements sont associés à une plus grande abondance de ces organismes, à l'exception des nématodes. L'année a un impact fort sur les résultats, avec une première année marquée par un rendement plus faible. Les tests de Random Forest montrent également l'importance de la quantité du carbone organique issu des fertilisants et la capacité des traitements (apport de Ca, P et Mg) à corriger plusieurs déficiences simultanément pour le rendement et la stimulation des fonctions écologiques du sol.

Mots clés

Madagascar, fertilisation, riz pluvial, Ferralsols, amendements, rendement, fonctions écologiques.

Pour citer ce document : COQUELIN de LISLE, Léonor, 2024. Relation entre santé du sol et performances agronomiques : cas de la fertilisation du riz pluvial des Hautes Terres de Madagascar. Mémoire de fin d'étude, diplôme d'ingénieure horticole, spécialisation horticulture, option Production Végétale Durable, L'Institut Agro Montpellier. 41 pp

Abstract

Title : [Titre du mémoire en anglais, obligatoire pour les mémoires d'ingénieur et de master]

The world's growing population requires sustainable agricultural systems, as current intensive methods are degrading the environment and depleting natural resources. Agroecology, based on ecosystem services and soil functions, is a promising approach. The SECuRE project is implementing this approach by testing various types of fertilisations to improve rainfed rice cultivation on multi-deficient Ferralsols in the highlands of Madagascar. Over six years, 16 to 25 fertilisations, based on local resources, are being compared. Some are organic (with an annual input of 3 or 6 tonnes/ha), others combine the application of an organic matter (OM) and a mineral matter (MM), and others are a mix of several OMs combined or not with a MM (4 types of fertilisations in total). These treatments were compared with two controls: one with no fertilisation and the other with the recommended mineral fertilisation. The results show that the controls produce significantly less than the other treatments (0 kg/ha for SFR 16 and 5.65 times less than the average yield for SFR 08) but with no significant difference between them (yields between 1.12 and 1.83 kg/ha). A ranking of rice yields shows the following ascending

order: fertilisation 3 t < OM 6 t < simple OM + MM < mixed OM + MM < vermicompost. One-way ANOVAs showed that the effect of treatments on the densities of macrofauna, nematodes, pest beetles and earthworms was not significant. However, the best yields were associated with greater abundance of these organisms, with the exception of nematodes. Year has a strong impact on results, with the first year showing lower yields. The Random Forest tests also show the importance of the quantity of organic carbon from fertilisers and the ability of the treatments (Ca, P and Mg) to correct several deficiencies simultaneously for yield and the stimulation of the soil's ecological functions.

Key words

Madagascar, fertilisation, rainfed rice, Ferralsols, soil amendments, yield, ecological functions.

Remerciements

Je remercie Dieu de m'avoir donné la vie et de me l'avoir donné belle pour que je puisse apprendre à découvrir les merveilles de Sa Création.

Je remercie très vivement ma tutrice encadrante madame Brigitte BRUNEL qui a fait preuve de compréhension face à mes difficultés et a su me stimuler pour continuer mes efforts. Elle a également su me guider et me conseiller avec beaucoup de gentillesse, de pédagogie et d'efficacité.

Je remercie très chaleureusement mes tuteurs monsieur Éric BLANCHART, monsieur Jean TRAP et madame Laetitia BERNARD pour leur accueil dans l'UMR, leur patience, leurs encouragements, leur perpétuel optimisme face à mes nombreuses lacunes professionnelles et mes questions. Grâce à eux, j'ai beaucoup progressé et appris.

Je tiens également à remercier monsieur Alexis THOUMAZEAU d'avoir accepté d'être le rapporteur pour ce travail.

Je remercie tous les chercheurs, les ingénieurs d'étude, de recherche, les techniciens, les stagiaires avec qui j'ai pu partager ces quelques mois dans l'UMR. Votre bonne humeur et votre bienveillance m'a toujours portée et rendu heureuse de venir vous retrouver le matin.

Je remercie tous mes professeurs qui m'ont transmis, tout au long de mes études, leur compétences, leur connaissances et m'ont accompagnée dans mes choix d'orientation professionnelle.

Enfin je remercie mes parents pour leur soutien.

Préambule

Je soussignée COQUELIN de LISLE Léonor :

- déclare respecter les consignes de non-plagiat.
- déclare avoir utilisé l'IA générative Chat GPT (modèle 4 d'OpenAI) afin d'aider à la génération et la vérification des codes des statistiques sur le logiciel libre d'accès R ainsi que la vérification de la bonne mise en page de la bibliographie.

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Table des figures | 8 |
| Table des tableaux | 10 |
| Liste des abréviations | 10 |
| Introduction générale | 11 |
| I) Contexte et état de l'art | 13 |
| 1. <i>Essor de l'agriculture à Madagascar : les défis</i> | 13 |
| 2. <i>La culture du riz pluvial sur les Hautes Terres malgaches</i> | 14 |
| 3. <i>Les contraintes de la culture du riz sur les Hautes Terres de Madagascar</i> | 15 |
| 4. <i>Lien entre agroécologie, fonctions du sol et productivité des cultures</i> | 18 |
| II) Problématique et démarche | 19 |
| III) Matériel et méthodes | 21 |
| 1. <i>Site d'étude</i> | 21 |
| 2. <i>Le matériel végétal</i> | 21 |
| 3. <i>Les matières fertilisantes</i> | 22 |
| 4. <i>Méthodes d'analyses statistiques</i> | 25 |
| IV) Résultats | 27 |
| V) Discussion | 42 |
| VI) Conclusions et perspectives | 48 |
| Bibliographie | 49 |
| Annexes | 57 |

Table des figures

- Figure 1 : Localisation de la parcelle étudiée près de la ville d'Imerintsiatosika, dans la région d'Itasy (en vert) située au centre de l'île de Madagascar (à gauche)..... 21
- Figure 2 : Cercle des corrélations de l'ACP sur les variables des performances agronomiques pour toutes les années. Plus les flèches sont longues et proches des axes et plus elles sont importantes dans la construction de celui-ci. Légende voir annexe 3. En rouge certaines variables servant au calcul du rendement et le rendement (yield_grain_YS)..... 27
- Figure 3 : Graphique des individus répartis sur les axes 1 et 2 de l'ACP sur les données agronomiques pour toutes les années. Les points de couleur roses sont les variables qualitatives supplémentaires. 28
- Figure 4 : Boxplot de l'effet de l'année sur les rendements en grain de riz sur tous les SFR. 17_18 : cycle de culture de l'année 2017-2018 ; 18_19 : cycle de culture de l'année 2018-2019 ; 19_20 : cycle de culture de l'année 2019-2020 ; 21_22 : cycle de culture de l'année 2021-2022. Une lettre différente indique une différence significative (ANOVA, $p_value=8,227e-17$). Les valeurs sous les lettres indiquent la moyenne. . 29
- Figure 5 : Graphique de l'évolution des rendements en tonne de grain de riz par hectare (t/ha) des SFR au cours du temps. Chaque point est une moyenne des valeurs des rendements des 4 blocs..... 30
- Figure 6 : Boxplot des rendements (t/ha) présentés par ordre croissant en fonction des SFR pour l'ensemble des années. Les lettres identiques indiquées au-dessus montrent les rendements non significatifs entre eux. ANOVA 1 facteur, $p_value=6,73E-19$, test post hoc de Tukey. Les barres horizontales représentent la médiane, les barres verticales représentent l'étendue des données non atypique ($n=16$), le losange noir représente la moyenne. Les caractéristiques des diverses SFR sont indiquées dans le tableau 3..... 31
- Figure 7 : Boxplot des rendements (t/ha) présentés par ordre croissant en fonction des SFR pour l'année 2017-2018. Les lettres identiques indiquées au-dessus montrent les rendements non significatifs entre eux (ANOVA 1 facteur, $p_value=0,004043$, test post hoc de Tukey). Les barres horizontales représentent la médiane, les barres verticales représentent l'étendue des données non atypiques ($n=16$), le losange noir représente la moyenne. Les caractéristiques des diverses SFR sont indiquées dans le tableau 3. 32*
- Figure 8 : Pourcentage de l'importance dans la variabilité du rendement des différents éléments chimiques et certains rapports et de l'année dans un modèle de RF construit sur tous les SFR et toutes les années. **Year** : année ; **Kquant** : quantité de potassium ; **Cquant** : quantité de carbone ; **C_N** : ratio carbone sur azote ; **C_P** : ratio carbone sur phosphore ; **Squant** : quantité de soufre ; **N_P** : ratio azote sur phosphore ; **Nquant** : quantité d'azote ; **lign_N** : ratio lignine sur azote ; **celquant** : quantité de cellulose ; **lignquant** : quantité de lignine ; **hemicquant** : quantité d'hémicellulose ; **Caquant** : quantité de calcium ; **Pquant** : quantité de phosphore ; **Mgquant** : quantité de magnésium..... 33
- Figure 9 : Pourcentage de l'importance dans la variabilité du rendement des différents éléments chimiques et certains rapports sans l'année. Les variables sont décrites dans la figure 8..... 33

| | |
|---|----|
| Figure 10 : Représentation des résultats des cinq variables (éléments chimiques ou ratio) ayant montré la contribution relative (%) la plus élevées au rendement pour chaque année. Résultats issus d'un test RF, avec un set.seed = 140 et 500 arbres sur t tous les SFR. Les variables sont décrites dans la figure 8. | 34 |
| Figure 11 : Evolution des densités de macrofaune en nombre d'individus par m ² mesurées avec la méthode TSBF (voir Matériel et Méthodes) pour 3 années de culture (2018 à 2022) selon les différents SFR | 36 |
| Figure 12 : Densité de nématodes phytoparasites (en g/m ²) pour l'année 2021-2022. (ANOVA 1 facteur, p-value = 0,0816. Les barres horizontales représentent la médiane, les barres verticales représentent l'étendue des données non atypiques (n=16), le losange noir représente la moyenne. Les caractéristiques des diverses SFR sont indiquées dans le tableau 3. | 37 |
| Figure 13 : Densité de coléoptères ravageurs (en nombre d'individus par m ²) pour l'année 2021-2022. (ANOVA 1 facteur, p-value = 0,1106. Les barres horizontales représentent la médiane, les barres verticales représentent l'étendue des données non atypique (n=16), le losange noir représente la moyenne. Les caractéristiques des diverses SFR sont indiquées dans le tableau 3. | 38 |
| Figure 14 : Densité de vers de terre (en nombre d'individus par m ²) pour l'année 2021-2022. (ANOVA 1 facteur, p-value = 0,13. Les barres horizontales représentent la médiane, les barres verticales représentent l'étendue des données non atypique (n=16), le losange noir représente la moyenne. Les caractéristiques des diverses SFR sont indiquées dans le tableau 3. | 38 |
| Figure 15 : Pourcentage de l'importance dans la variabilité de la densité de macrofaune des différents éléments chimiques et certains rapports et de l'année dans un modèle de Random Forest construit avec tous les SFR et les 3 dernières années. Les variables sont décrites dans la figure 11 | 39 |
| Figure 16 : Pourcentage de l'importance dans la variabilité de densité de macrofaune des différents éléments chimiques et certains rapports sans l'année dans un modèle de Random Forest construit avec tous les SFR et les 3 dernières années. Les variables sont décrites dans la figure 11 | 39 |
| Figure 17 : Pourcentage de l'importance dans la variabilité de biomasse de nématodes phytopathogènes des différents éléments chimiques et certains rapports et de l'année dans un modèle de Random Forest construit avec tous les SFR et avec les années 18-19 et 21-22. Les variables sont décrites dans la figure 11. | 40 |
| Figure 18 : Pourcentage de l'importance dans la variabilité de biomasse de nématodes phytopathogènes des différents éléments chimiques et certains rapports et sans l'année dans un modèle de Random Forest construit avec tous les SFR et avec les années 18-19 et 21-22. Les variables sont décrites dans la figure 11. | 40 |
| Figure 19 : Représentation des résultats des cinq variables (éléments chimiques ou ratio) ayant montré la contribution relative (%) la plus élevée à la densité de nématodes phytoparasites pour les années 2018-2019 et 2021-2022. Résultats issus d'un test RF, avec un set.seed = 140 et 500 arbres, sur tous les SFR. | 41 |
| Figure 20 : Pourcentage de l'importance dans la variabilité de la densité de coléoptères ravageurs des différents éléments chimiques et certains rapports et de l'année dans un modèle de Random Forest construit avec tous les SFR et les 3 dernières années. Les variables sont décrites dans la figure 11 11. | 41 |

Figure 21 : Pourcentage de l'importance dans la variabilité de la densité de coléoptères ravageurs des différents éléments chimiques et certains rapports sans l'année dans un modèle de Random Forest construit avec tous les SFR et les 3 dernières années. Les variables sont décrites dans la figure 11. 41

Figure 22 : Représentation des résultats des cinq variables (éléments chimiques ou ratio) ayant montré la contribution relative (%) la plus élevées à la densité de coléoptères ravageurs pour les années 2018-2019, 2019-2020 et 2021-2022. Résultats issus d'un test RF, avec un set.seed = 140 et 500 arbres, sur tous les SFR. 42

Table des tableaux

Tableau 1: Tableau de comparaison de caractéristiques géographiques et économiques de Madagascar et de la France..... 13

Tableau 2 : Descriptif des matières utilisées (produits) dans les traitements (SFR) . 22

Tableau 3 : Compositions des 15 SFR étudiés avec les constituants apportés, leur type et quantité, et la catégorie de pratique. MO : Matières Organiques, MM : Matières Minérales, FM : Fertilisation Minérale 23

Tableau 4 : Quantité d'éléments minéraux présents dans les différents SFR appliqués sur la culture du riz en kg/ha, chaque année en début de culture (C organique, N total, P total, K total, Ca total, Mg total, S total, éléments solubles, hémicellulose, cellulose, lignine)..... 24

Tableau 5 : Récapitulatif des ACP et du nombre de variables utilisées pour chacune d'elles 25

Tableau 6 : Tableau résumant les variables qui contribuent le plus à la construction des ACP sur les variables de performances agronomiques. Pour la légende des variables voir l'annexe 3. En jaune la variable de rendement au carré de rendement. 28

Tableau 7 : Tableau des statistiques de test des ANOVA sur les variables agronomiques pour un seuil alpha de 0,05%..... 30

Liste des abréviations

| | |
|--------|--|
| °C | Degré Celsius |
| ACP | Analyse en Composante Principale |
| Al | Aluminium |
| ANOVA | Analyse de la Variance |
| C | Carbone |
| Ca | Calcium |
| cm | Centimètre |
| FAO | Food and Agriculture Organisation soit Organisation pour l'agriculture et l'alimentation |
| FM | Fertilisation Minérale |
| FOFIFA | Centre National de la Recherche Appliquée au Développement Rural |
| g | Gramme |
| GES | Gaz à effet de serre |

| | |
|----------------|---|
| ha | Hectare |
| hab | Habitants |
| ind | Individus |
| K | Potassium |
| kg | Kilogramme |
| km | Kilomètre |
| m | Mètre |
| m ² | Mètre carré |
| Mg | Magnésium |
| MM | Matière Minérale |
| mm | Millimètre |
| MO | Matière Organique |
| MS | Matière Sèche |
| N | Azote |
| NA | Not Applicable |
| nb | Nombre |
| NPK | Fertilisation Azote, Phosphore, Potassium |
| P | Phosphore |
| RF | Random Forest |
| SFR | Soil Function Restoration soit Restauration des Fonctions du Sol |
| Si | Silice |
| t | Tonnes |
| TSFB | Tropical Soil Biology and Fertility soit Biologie et Fertilité des sols tropicaux |

Pour les abréviations des variables, voir l'annexe 3.1, 3.2 et 4

Introduction générale

Les systèmes de production actuels doivent faire face à plusieurs défis. La population mondiale augmente et atteindra 8,5 milliards en 2030 et 9,7 milliards en 2050 d'après les projections des Nations Unies (United Nations, s. d.) ; ainsi, il est nécessaire d'augmenter la production agricole pour nourrir cette population. Le système de production le plus répandu dans le monde est celui de l'agriculture industrielle intensive (CIRAD, 2021), toutefois ce système a montré ses limites. En effet, basé sur l'utilisation d'intrants, une mécanisation et une spécialisation des systèmes de production dans une optique productiviste (FAO, 2009), les ressources ont été surexploitées conduisant à une dégradation de l'environnement (Murua & Laajimi, 1995). Les principales externalités environnementales négatives sont : la pollution de l'eau (Laurent, 2012), l'érosion (Tilman, 1998) et le tassement des sols (Regnier, 2023), la perte de matière organique dans les sols (Murua & Laajimi, 1995) et la salinisation de certains d'entre eux (Murua & Laajimi, 1995 ; Regnier, 2023), les émissions de gaz à effet de serre (GES), la perte de biodiversité (Bender, 2016). Ces effets entraînent une dégradation et une diminution des surfaces des sols cultivables. Dans le monde, 4 750 millions d'hectares de terres sont dédiés à l'agriculture (FAO, 2021) et tous les ans, 12 millions d'hectares de sols agricoles sont perdus d'après le Bureau des Nations Unies pour la réduction des risques des catastrophes (UNDRR, 2023). A ces différentes externalités s'ajoutent les aléas du changement climatique qui nécessite des systèmes plus résilients pour absorber au mieux les chocs possibles.

Ainsi, face à ces nombreux défis, il est nécessaire de reconcevoir les systèmes de production par une approche plus durable. L'un des concepts nés de cette nécessité est l'agroécologie. Le Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire définit l'agroécologie comme suit : « L'agroécologie est une façon de concevoir des systèmes de production qui s'appuient sur les fonctionnalités offertes par les écosystèmes. Elle les amplifie tout en visant à diminuer les pressions sur l'environnement (ex : réduire les émissions de gaz à effet de serre, limiter le recours aux produits phytosanitaires) et à préserver les ressources naturelles. Il s'agit d'utiliser au maximum la nature comme facteur de production en maintenant ses capacités de renouvellement. Elle implique le recours à un ensemble de techniques qui considèrent l'exploitation agricole dans son ensemble. C'est grâce à cette approche systémique que les résultats techniques et économiques peuvent être maintenus ou améliorés tout en améliorant les performances environnementales. » Dans cette conception des systèmes, le sol prend une place importante. El Mujtar et al., (2019) décrivent, dans une méta-analyse, l'importance du sol pour atteindre l'objectif de zéro faim dans le monde en mettant en avant les différents services écosystémiques fournis par ceux-ci et reliés à la production. Ainsi le recyclage des nutriments, le cycle du carbone et de l'azote, la structure du sol et le contrôle des maladies et ravageurs font partie de ces services (Kibblewhite et al., 2008). Ils sont le résultat de fonctions réalisées par une diversité d'organismes du sol, à des échelles spatiales et temporelles variables selon les conditions physico-chimiques du milieu. Les liens organismes du sol-plantes dépendent des conditions locales, pédoclimatiques et socio-économiques. Ils doivent être étudiés et valorisés selon le contexte.

Le projet de recherche SECuRE s'inscrit dans ce contexte mondial d'objectifs de réduction de la faim dans le monde par une amélioration de la durabilité et de la résilience des agrosystèmes. Pour cela, le projet se base sur les principes de l'agroécologie adaptée au contexte des Hautes Terres de Madagascar.

Le projet SECuRE

Ce projet a débuté en 2017 et s'est poursuivi jusqu'en 2022. Il propose d'étudier des pratiques de fertilisations innovantes qui ont pour objectif de permettre une bonne performance agronomique tout en restaurant les services écosystémiques du sol. Vingt-cinq pratiques de fertilisation (appelées les « Soil Function Restoration » soit Restauration des Fonctions du Sol dit SFR) ont été testées sur du riz pluvial d'altitude. Pour le premier cycle de culture seuls seize premiers SFR ont été testés. Les mesures des variables pour l'évaluation des traitements ont été effectuées tous les ans sauf pour le cycle de culture 2020-2021 qui était une année de rotation avec légumineuses. Les SFR seront aussi appelés « traitements » car ils correspondent à une application d'un traitement dont les résultats sont évalués. Les SFR ont été construits en s'appuyant sur les connaissances paysannes de la région et les matières fertilisantes couramment employées, en utilisant des matières possiblement accessibles aux agriculteurs, même si moins courantes, mais aussi en exploitant des connaissances scientifiques pour créer des mélanges aux propriétés complémentaires. C'est pourquoi certains SFR miment des pratiques paysannes et d'autres sont des innovations scientifiques. Pour plus de détails sur l'ensemble de l'essai, voir le mémoire de Damoiseaux en 2020 et le site www.secure.mg.

Dans un premier temps, le contexte social de Madagascar et un état de l'art sur la culture du riz pluvial en altitude sur les Hautes Terres de Madagascar, les caractéristiques d'une agriculture sur des Ferralsols et les principales contraintes et innovations associées permettront d'inscrire ce mémoire dans son environnement et

ses enjeux. Ensuite, la problématique sera énoncée et la démarche de recherche sera explicitée. Les résultats de cette investigation seront présentés et discutés avant de proposer une conclusion à cette étude.

I) Contexte et état de l'art

1. Essor de l'agriculture à Madagascar : les défis

Madagascar est une grande île de l'océan Indien au climat tropical, caractérisé par deux saisons : une saison humide qui va de novembre à avril et une saison sèche de mai à octobre (Garruchet et al., 2023). C'est un pays en développement qui est classé au 173^e rang sur les 191 pays classés selon l'Indice de Développement Humain (UNDP, 2022). Le tableau 1 décrit certaines de ses caractéristiques en comparaison avec la France métropolitaine.

Tableau 1: Tableau de comparaison de caractéristiques géographiques et économiques de Madagascar et de la France

| | Madagascar | France |
|--|--|--|
| Superficie | 587 040 km ² Source : (Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères, 2024) | 550 000 km ² Source : (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2015) |
| Population | 28,92 millions en 2021 Source : (Banque Mondiale, 2021) | 67,8 millions en 2021 Source : (Papon, 2022) |
| Densité | 49,7 hab/km ² Source : (Banque Mondiale, 2021) | 106 hab/km ² Source : (Insee, 2020) |
| Revenus moyen/mois | 41€ Source : (Floch, 2024) | Entre 2630 et 2430 € Source : (Insee, 2024) |
| Part des activités agricoles et agroalimentaires dans le PIB | 43% Source: (Ministère de l'Agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2014) | 3,4% Source: (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, 2021) |

Dans le pays, 80 % de la population vit en dessous du seuil d'extrême pauvreté (moins de 2 dollars américains par jour) et 80 % de la population vit en zone rurale (Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères, 2024). Les populations vivent principalement du travail dans l'agriculture avec 70 % de la population employée dans ce secteur en 2021 (Banque Mondiale, 2022). Le modèle agricole le plus répandu est celui de l'agriculture familiale (Garruchet et al., 2023 ; Sourisseau et al., 2014). À Madagascar, elle se caractérise par de faibles surfaces exploitables, peu d'utilisation d'intrants, une faible mécanisation et des exploitations en polyculture élevage (Sourisseau et al., 2014). Dans les Hautes Terres, ces exploitations sont en moyenne d'une taille de 91 ares avec 2,7 actifs agricoles (Andrianantoandro & Bélières, 2015). Il y a, en moyenne, 1,5 zébu et 1,8 porc (Andrianantoandro & Bélières, 2015). Sur ces petites surfaces, le travail est principalement réalisé manuellement à la bêche (outil traditionnel appelé 'angady') et parfois, dans les bas-fonds, avec une charrue tirée par

des zébus (Andrianantoandro & Bélières, 2015). La principale source de fertilisants est la matière organique animale et rarement la fertilisation minérale car ces produits sont chers (Andrianantoandro & Bélières, 2015).

Sur l'île, 75 % de la culture vivrière est autoconsommée (Garruchet et al., 2023). La principale culture est le riz qui représente 55% des surfaces agricoles avec 70 % en culture de bas-fonds et 30 % de riz pluvial (Garruchet et al., 2023). En effet, le riz est l'un des aliments principaux des malgaches puisqu'il est consommé, si possible, aux trois repas de la journée (Blanc-Pamard & Rakoto-Ramiantsoa, 2000). Le rendement moyen du riz à Madagascar varie entre 2,45 (Word Food Program, 2019) et 2,7 tonnes en moyenne par hectare (JICA, 2020) contre une moyenne à 4,6 tonnes par hectare dans le monde (Word Food Program, 2019). Certaines régions ont des rendements plus élevés en riz, notamment le Vakinankaratra (région de la capitale) dont la moyenne est à 3,1 t/ha et Itasy (zone de l'étude du projet SECuRE) dont la moyenne est à 2,9 t/ha (JICA, 2020) toutes deux dans les Hautes Terres de Madagascar. Cela leur permet d'exporter les surplus vers les régions en déficit (Garruchet et al., 2023). Dans ces Hautes Terres, deux zones sont utilisées pour l'agriculture en fonction des cultures. Les cultures vivrières (maïs, manioc, patate douce, riz pluvial) se font sur les tanety (pentes des collines), soit en plateau soit sur pente (Breumier, 2017). Les bas-fonds plus fertiles, quant à eux, servent à cultiver du riz inondé (Garruchet et al., 2023).

Malgré une production de riz dans la plupart des exploitations, Madagascar est dépendant d'importation de cette céréale (Sourisseau et al., 2014) mais aussi d'autres denrées alimentaires comme la poudre de lait, l'huile, le sucre, la farine (AFD, 2020). Or, c'est un pays en croissance démographique (Lardoux, 2006), le gouvernement veut donc augmenter la production de riz du territoire pour subvenir aux besoins de la population (Garruchet et al., 2023).

Pour augmenter la productivité de ces exploitations, deux stratégies complémentaires sont possibles : une augmentation de la surface arable et une augmentation des rendements. La première stratégie est rendue difficile par la concurrence sur l'usage de la terre entre le foncier et l'agricole (Breumier, 2017) et par le manque d'infrastructures permettant d'atteindre des zones éloignées des villes. Face à cette concurrence, les agriculteurs exploitent des terres plus difficiles à gérer comme le sont, par exemple, les « tanety » c'est-à-dire des collines (Breumier, 2017). La seconde stratégie portant sur l'augmentation des rendements est donc indispensable pour réussir à nourrir la population de l'île.

2. La culture du riz pluvial sur les Hautes Terres malgaches

Le riz est une céréale qui peut être cultivée soit en irrigation soit en pluvial. Il est cultivé principalement en Asie, Afrique et Amérique Latine avec des cycles et des modes de cultures différents selon chaque zone du monde (FAO, 1997). Dans ce cas d'étude, le riz qui sera présenté est le riz pluvial d'altitude sur les Hautes Terres de Madagascar. La superficie dédiée à cette culture à Madagascar augmente depuis les années 1980 (Breumier, 2017) avec 30 % de la surface de riziculture qui lui est dédié (Garruchet et al., 2023).

Dans les Hautes Terres malgaches, le riz est semé sur les tanety (Garruchet et al., 2023) au début des pluies vers le mois de novembre et le cycle de culture dure entre 90 et 120 jours selon les variétés (Daniel Clarys, 2012). Il y a trois phases de développement de la plante : la phase végétative, la phase reproductive et la phase de maturation. À la fin de ces trois phases, la plante peut mesurer jusqu'à 130 cm de

hauteur et compter entre 10 et 20 talles par pied. Sur chaque talle, se développent entre 5 et 10 panicules (Corduant, 2018). Enfin, la récolte des grains a lieu généralement en avril (Raboin et al., 2013).

Les besoins en eau, publiés dans le cadre du Consortium Africain pour la Santé des Sols sont de 100 mm/mois (Zingore et al., 2014). Le pH le plus adapté à la culture du riz se trouve entre 6 et 7 et s'il est trop bas des problèmes de toxicité aluminique peuvent apparaître ainsi qu'une indisponibilité du phosphore ce qui ralentit la croissance de la plante (Zingore et al., 2014). Le guide sur la riziculture pluviale publié par le FOFIFA et le Cirad en 2016, recommande de semer le riz en poquet et les apports nécessaires sont décrits comme tels : un apport de fumier sur le poquet (5-10 t/ha) et un apport de NPK (100 kg/ha) en période de tallage et période de montaison (Ramanantsoanirina et al., 2016). Le riz se développe bien dans des températures comprises entre 20 et 30°C (Zingore et al., 2014). La production de riz peut être réduite si les températures sont inférieures à 15°C ou supérieures à 35°C (Zingore et al., 2014). En raison de basses températures sur les terres d'altitudes, le cycle est plus long et il faut utiliser des variétés adaptées (Raboin et al., 2013).

Il est important de noter que des tentatives de culture sur les tanety, pour les mêmes contraintes d'espace de culture et la nécessité d'augmenter la production, avaient déjà eu lieu au début des années 80 (Breumier, 2017). Ces tentatives se sont soldées par des abandons de la culture en raison de variétés non adaptées au climat (Breumier, 2017). De plus, les variétés présentes à Madagascar donnent des rendements irréguliers (JICA, 2020) ce qui est un problème pour la sécurisation des revenus. C'est dans ce contexte qu'a commencé un programme d'amélioration variétale du riz entre le FOFIFA et le Cirad (Breumier, 2017). La sélection s'est faite dans un premier temps en fonction des conditions climatiques puis en fonction des principales maladies, notamment la pyriculariose, pour maximiser la productivité en altitude (Breumier, 2017). Malgré les efforts pour rendre la culture du riz pluvial plus efficiente, il reste de nombreuses contraintes liées au territoire des Hautes Terres de Madagascar.

3. Les contraintes de la culture du riz sur les Hautes Terres de Madagascar

a. Contraintes biotiques

Les contraintes biotiques les plus courantes pour la culture du riz pluvial à Madagascar sont la pyriculariose (maladie fongique), les attaques d'insectes tels les Coléoptères de la famille des Scarabéidés (Raboin et al., 2013) et les adventices, notamment le striga qui est une plante parasite (Ramanantsoanirina et al., 2016).

Les coléoptères attaquent soit au stade de larve et sont alors appelés « vers blancs », soit au stade adulte (Randriamanantsoa, et al., 2011). Ils attaquent le riz depuis la levée jusqu'à la montaison avec des adultes de coléoptères qui arrivent au moment des premières pluies d'octobre-novembre ce qui coïncide avec le semis du riz (Randriamanantsoa, et al., 2011). Ainsi, les adultes causent des dégâts sur les premiers stades de développement de la plante tandis que les larves font des dégâts sur les stades plus avancés. Pour lutter contre ces attaques, la méthode qui montre le plus d'efficacité est la lutte chimique par traitement des semences mais celle-ci est très chère pour les paysans (Randriamanantsoa & Ratnadass, 2005). Il existe des méthodes de lutte non chimique telles que le labour qui permet d'exposer les larves au soleil pour les faire mourir (Ramanantsoanirina et al., 2016), ou encore l'usage de

plantes répulsives avec une culture en semis sous couvert de radis fourrager *Raphanus sativus* (Randriamanantsoa, et al., 2011). Toutefois, au vu de la diversité des coléoptères de la région, des études supplémentaires aideraient à établir des liens clairs entre les attaques sur la culture et les précédents culturels, les apports organiques ou minéraux (Randriamanantsoa, et al., 2011) et donc d'établir un protocole plus efficace de prévention des attaques.

La pyriculariose est causée par un champignon (*Magnaporthe oryzae*) qui touche d'abord les feuilles puis les grains en produisant un dessèchement (FSP PARRUR, 2016). Les stades du riz les plus sensibles sont le stade plantule, l'époque du tallage et l'initiation paniculaire avec des dégâts pouvant aller jusqu'à 100 % de la récolte (FAO, 1997). Dans les Hautes Terres de Madagascar, les variétés utilisées sont celles développées par le FOFIFA et le Cirad à partir des années 80, l'intérêt premier étant la résistance au froid pour étendre la capacité de culture du riz (Raveloson & Sester, 2011). Mais ces variétés étaient sensibles à la pyriculariose (Raveloson & Sester, 2011). Cette maladie est donc un problème à Madagascar. En plus de la prédisposition génétique, des facteurs environnementaux accentuent l'incidence de la maladie. Celle-ci peut être causée par une absorption insuffisante de silice (FAO, 1997). Il a été montré que la silice, dans la culture du riz, avait un rôle sur plusieurs fonctions des plantes, dont la résistance aux maladies (Blanchart et al., 2020 ; Velly, 1977). Les sols des Hautes Terres de Madagascar sont multi-déficients et la silice est un élément en faible quantité dans ces sols comme il sera décrit dans le paragraphe sur les contraintes abiotiques. Une fois installé, le champignon persiste sur les feuilles et les pailles du riz d'une année sur l'autre (FAO, 1997). Cette maladie est peu gérable par les agriculteurs car, bien que des méthodes de lutte chimique existent, elles sont très coûteuses et donc peu utilisées (Raveloson & Sester, 2011). Des méthodes plus économiques sont préconisées : l'utilisation de semences saines, une rotation des cultures pour ne pas favoriser l'implantation de la maladie sur un champ, enlever et brûler les pailles contaminées, enlever les plantes hôtes autour du champ (FAO, 1997), changer les variétés de riz cultivés d'une année sur l'autre et les diversifier s'il y a plusieurs champs dans une zone, ne pas ressemer les grains d'un champ contaminé et éviter les apports d'azote trop importants (Blanchart et al., 2020 ; Randriamanantsoa, et al., 2011).

Le *Striga asiatica* est une plante parasite qui va prélever ses ressources sur les plants de riz (Randriamanantsoa, et al., 2011). À Madagascar, il a été introduit il y a un siècle lors d'importation du riz pluvial, il a donc toujours fait partie des baisses de rendement du riz, baisses qui peuvent varier entre 20 % et 100 % du rendement (Joyeux, 2014). Il est adapté aux zones arides et semi-arides ; la saison sèche ne permet donc pas d'en venir à bout et il se reproduit par la formation d'une banque de graines très importante. Cependant, il existe des solutions chimiques, génétiques, biologiques et agronomiques (Joyeux, 2014). Parmi ces solutions, se retrouvent le semis sous couvert végétal, le paillage et la résistance génétique (Randriamanantsoa, et al., 2011) comme pour la lutte contre la pyriculariose et les ravageurs coléoptères.

Ces trois facteurs biotiques sont les plus problématiques sur les Hautes Terres de Madagascar et les solutions les plus abordables pour les agriculteurs reposent sur des services écosystémiques.

b. Les contraintes abiotiques

Dans cette zone, les contraintes abiotiques les plus importantes pour l'agriculture sont le climat lié à l'altitude et le type de sol.

L'altitude va impacter la température avec une perte de 0.6°C chaque 100 m et favoriser des risques de tempêtes de grêles plus élevés entre décembre et janvier (Raboin et al., 2013). La création de variétés adaptées à ces températures a permis de cultiver du riz jusqu'à 1800 m d'altitude quand la limite était 1300 m (Raboin et al., 2013). Cette barrière climatique a influencé fortement les sélections variétales qui se sont étalées sur 25 ans (Raboin et al., 2013). Depuis 2004, la création variétale s'est aussi penchée sur les problèmes de pyriculariose, la qualité des grains et l'adaptation à l'agriculture de conservation (Raboin et al., 2013). Cette sélection variétale était urgente pour permettre aux agriculteurs d'augmenter leurs surfaces arables et d'augmenter la production au vu de la population croissante. De nos jours, la variété la plus cultivée venant du programme de sélection est la variété « Chhomrong Dhan » (*Oryza sativa* subspecies *japonica*), originaire du Népal et qui représente 80 % du riz pluvial des Hautes Terres (Raboin et al., 2013). Comme il est relevé dans le bilan des 25 années de sélection proposé par Raboin et al. (2013), les agriculteurs malgaches ne disposent pas, pour la plupart d'entre eux, de ressources économiques suffisantes pour utiliser des intrants ou des produits phytosanitaires. Or, les rendements restent faibles et les pressions de maladies fortes. Ainsi, les systèmes agricoles doivent tendre à plus de résilience par une adaptation à l'environnement dans sa totalité, y compris les sols et leurs organismes bénéfiques pour continuer d'augmenter la productivité des rizicultures.

La seconde contrainte majeure est le sol. Sur les Hautes Terres, les sols sont de type ferrallitique (Riquier & Moureaux, 1957). Les caractéristiques de ces Ferralsols (classification FAO) sont qu'ils sont très anciens, très altérés donc multi-déficients en divers éléments : (azote (N), phosphore (P), potassium (K) mais aussi calcium (Ca), magnésium (Mg), silice (Si)...), avec un pH acide (souvent en dessous de 5), peu de matière organique (moins de 20 g/kg) et une faible capacité d'échange cationique (Raminoarison et al., 2020). Les déficiences en N, P et K sont considérées comme les contraintes majeures de la production rizicole (Saito et al., 2019). Les pH en dessous de 5 sont propices à la dissolution des ions Al^{3+} et fer dans la solution du sol ce qui est toxique pour la plante (Kochian et al., 2015), et à la fixation du phosphore sur ces oxydes (Gérard, 2016). L'altération des minéraux et la minéralisation de la matière organique sont les deux processus qui rendent les nutriments disponibles pour la plante (Janssen et al., 1990). Ici, les sols sont très altérés et la matière organique est faiblement présente (ou sous une forme peu disponible) ce qui explique également le peu de disponibilité des nutriments pour la plante. Les éléments les plus limitants pour la croissance des plants de riz sont le phosphore (avec 97 % de masse sèche du riz en moins par rapport à un contrôle fertilisé avec du P) et l'azote (Raminoarison et al., 2020). Toutefois, en plus des déficiences en éléments principaux, les Ferralsols sont également déficients en éléments secondaires comme le Ca, le Mg, le Si et en micronutriments (Raminoarison et al., 2020). Selon Kihara et al. (2015) ajouter ces éléments à la fertilisation en NPK permet d'augmenter les rendements. Pour pallier le manque d'éléments nutritifs disponibles pour la culture, il est naturel de penser à de la fertilisation chimique puisque les éléments sont directement utilisables pour la plante. Par exemple, l'un des rapports du African Fertilizer Summit conseille d'apporter de grandes quantités de phosphore sur les Ferralsols (Bationo et al., 2006). Toutefois, ce type de fertilisation ne permet pas toujours d'augmenter les rendements et les réponses à l'application de fertilisation sont dépendantes du type de sol (Kihara et al., 2016). Pour comprendre ces différentes réponses selon les sols, plusieurs indices pour mesurer l'efficacité de l'utilisation des nutriments par la plante ont été inventés et ont mis en évidence que ce n'est pas l'entière des quantités apportées qui est utilisée

par les plantes ni transformée en rendement mais bien seulement un pourcentage qui sera différent selon les conditions climatiques, les techniques de cultures, le sol et la plante (Dobermann, 2007). Ainsi, une étude spécifique de la réponse du sol aux applications de multi-éléments doit être faite pour permettre de restaurer la fertilité des Ferralsols (Raminoarison et al., 2020). Enfin, il est important de noter que les éléments limitant le développement d'une activité biologique dans les sols sont les mêmes que ceux dont la plante a besoin (P, N, Ca, K, etc.) et que le carbone est également un élément indispensable à apporter pour permettre une activité biologique (Trap et al., 2024a). Ce résultat permet de comprendre les choix de fertilisation qui seront proposés dans ce travail.

4. Lien entre agroécologie, fonctions du sol et productivité des cultures

L'ensemble des caractéristiques socio-économiques et environnementales du pays font de l'agroécologie la façon la plus durable et sûre de reconcevoir les systèmes rizicoles pluviaux de Madagascar. Pour mettre en œuvre les principes qui définissent l'agroécologie, des systèmes de culture ont vu le jour sans toutefois se baser sur les fonctions écologiques des sols (Blanchart, s. d.). Les grandes fonctions écologiques que réalisent les sols et qui représentent un intérêt pour la production sont **i) le recyclage des nutriments ii) la transformation des molécules carbonées iii) le maintien de la structure des sols et iv) la régulation des populations (notamment de pathogènes)** (Blanchart & Trap, 2020 ; Clermont-Dauphin et al., 2013). Ces fonctions sont réalisées par une multitude d'organismes en interaction avec les autres organismes et leur milieu (Blanchart & Trap, 2020).

Dans une méta-analyse sur le rôle des vers de terre, il est montré leur rôle indirect sur l'amélioration de la croissance des plantes par la minéralisation de la matière organique, une amélioration de la structure du sol par la formation de macropores, la régulation des pathogènes, la dispersion d'organismes symbiotiques et la production d'hormones interagissant directement sur le développement et la protection de la plante (Vidal et al., 2023). Les fonctions de transformation des molécules carbonées, de recyclage des nutriments, de maintien de la structure des sols et de régulation des populations sont résumées dans un document écrit avec le support de la Commission européenne qui met en avant le fait que ces fonctions sont réalisées par la biodiversité des sols (European Landowners' Organization et al., 2010). Par exemple, la chaîne d'humification est décrite : la pré-décomposition est réalisée par le climat, la première décomposition est réalisée par la macrofaune, la deuxième décomposition est réalisée par les bactéries et les champignons et enfin la minéralisation de certains minéraux est également permise par des bactéries. Dans cet exemple il est évident que les organismes du sol jouent un rôle primordial pour la réalisation des différentes fonctions du sol. De plus, une méta-analyse (Trap et al., 2016) sur l'effet des organismes bactériovores (nématodes et protiste principalement) sur les fonctions écologiques du sol montre que leurs populations peuvent jouer un rôle clef dans la lutte contre les maladies en agriculture . Elles ont aussi un effet positif sur la croissance des plantes notamment par une augmentation de la quantité d'azote dans les parties aériennes et de phosphore dans les parties racinaires de la plante. Cela peut s'expliquer par le fait qu'elles augmentent le turnover et l'activité microbienne, ce qui influencera la disponibilité en éléments nutritifs dans le sol avec, par exemple, une quantité doublée d'azote minéralisé (Trap et al., 2016). Ces différents articles (European Landowners' Organization et al., 2010 ; Trap et al., 2016 ; Vidal et al., 2023) montrent l'influence des organismes du sol sur leur milieu ce qui peut le rendre propice au développement de cultures. Toutefois les organismes du sol ne sont pas les seuls à modifier le milieu,

les plantes sont également capables de le transformer pour le rendre plus adapté à leur besoin. La plante va utiliser sa rhizosphère pour interagir avec les organismes du sol et le sol en libérant des composés organiques et inorganiques qui vont influencer la disponibilité en éléments organiques du sol, la structure de celui-ci et sa capacité de rétention en eau (Oburger, 2022). Il y a une communication réciproque entre les plantes et les organismes du sol qui est le résultat d'une coévolution entre les deux parties et qui a des conséquences sur les symbioses, les pathogènes et le développement de la plante (Blouin, 2018). A Madagascar, des travaux de recherche sur les organismes des sols ont montré des résultats similaires.

Par exemple, dans le contexte des Hautes Terres de Madagascar, l'inoculation de vers de terre *Pontoscolex corethrus* a permis une amélioration de la structure du sol, de la biomasse racinaire, du rendement en grains du riz et de la quantité d'azote et de phosphore dans les grains. Leur inoculation était mieux réussie dans les systèmes sans labour (Ratsiatosika, Razafindrakoto, et al., 2021). Une autre étude avec cette même espèce de ver de terre a montré qu'il permettait le recyclage des nutriments, à travers une augmentation de la nutrition phosphatée des plants de riz (Trap, Blanchart, et al., 2021). De même, le ver de terre *P. corethrus*, associé à une fertilisation en silice, stimule la tolérance du riz à la pyriculariose. Cet effet peut être diminué par une fertilisation NPK qui accentue la sensibilité de la plante à cette maladie (Blanchart et al., 2020). Une autre étude montre que la coévolution des plantes avec les organismes du milieu est primordiale pour le développement de la plante. En effet, le ver de terre *P. corethrus* inoculé sur 6 variétés de riz différentes permet une amélioration de la nutrition de la plante et de sa croissance avec des réponses différentes selon la variété (Ratsiatosika, Blanchart, et al., 2021). Ces capacités d'interaction de la plante avec les organismes ne sont pas prises en compte lors de la création variétale et du choix de la culture ce qui nuit à la capacité de la plante à s'adapter aux contraintes de son milieu (Kibblewhite et al., 2008). Ces interactions plantes-organismes du sol ont été gommées des systèmes de culture productiviste.

Tous les organismes du sol sont fortement impactés par la conduite de la culture : les modes de fertilisation, le travail du sol, l'usage de pesticides (El Mujtar et al., 2019). Il a été montré que des pratiques d'agroforesterie et de diversification des cultures sont bénéfiques à la présence de nématodes endogènes qui ont un impact positif sur la nutrition et la croissance des plantes (Trap, Ranoarisoa, et al., 2021). Ainsi, il est primordial de concevoir des modes de gestion adaptés aux organismes du sol pour favoriser leur fonctionnement et établir un environnement qui leur soit favorable. L'une des techniques possibles est l'agriculture de conservation. En effet, elle propose un travail du sol réduit, une couverture permanente du sol et une diversification des espèces semées (Kienzle & Njenga, 2022) qui sont des conditions favorables aux organismes du sol comme vu précédemment. Ainsi, les méthodes les plus prometteuses pour augmenter et sécuriser la production agricole de manière durable avec les contraintes socio-économiques des Hautes Terres de Madagascar sont les méthodes agroécologiques (Blanchart et al., 2021). C'est pour cette raison que l'expérimentation réalisée dans le cadre du projet SECuRE à Madagascar s'est basée sur une intensification des fonctions écologiques du sol, par des pratiques de fertilisation utilisant des matières fertilisantes locales et facilement accessibles.

II) Problématique et démarche

En 2020, une analyse multicritère avait été réalisée pour évaluer les performances de ces pratiques d'intensification des fonctions écologiques. Celle-ci

avait porté sur l'évaluation des résultats de l'année 2018-2019 de 16 SFR sur les 25 présents dans l'étude (voir annexe 1). L'analyse ayant été menée sur un temps très court après la mise en culture, n'a pas pu prendre en compte la temporalité de l'expérience. Il est maintenant nécessaire de reconduire une analyse des données pour évaluer l'impact des traitements au cours du temps sur la culture et sur le sol.

Il s'agit de répondre à la question : est-ce que des pratiques adaptées de fertilisation suivant les principes de l'agroécologie permettent d'intensifier à la fois les fonctions écologiques du sol et les performances agronomiques des exploitations agricoles des Hautes Terres malgaches ?

Les objectifs et les hypothèses sont les suivants :

- 1) Évaluer l'impact au cours du temps des différents traitements de fertilisation sur les performances agronomiques du riz.

Hypothèses : i) le SFR témoin positif permet le meilleur rendement par l'application de produits fertilisants de synthèse correspondant aux besoins de la plante, ii) le SFR témoin négatif ne permet pas l'obtention d'une production de riz à cause d'une absence d'apports de tous les éléments nutritifs indispensables, iii) Les SFR avec un apport de mélange de matières organiques permettent une production plus stable au cours du temps par la diversité des apports d'éléments chimiques que les SFR sans mélange.

- 2) Déterminer quels sont les paramètres de la fertilisation (les éléments chimiques, la quantité, le type d'apport, si chimique, organique ou un mélange) qui influencent le plus ces performances.

Hypothèses : i) la forme d'apport chimique est plus efficace pour améliorer les performances agronomiques que les formes organiques, ii) la quantité d'apports influence fortement le rendement : plus il y a d'apports, plus les performances agronomiques s'améliorent pour les types organiques et minéraux, iii) les éléments nutritifs les plus importants pour les performances agronomiques sont l'azote (N) et le phosphore (P)

- 3) Évaluer l'impact au cours du temps des différents traitements de fertilisation sur les paramètres du sol.

Hypothèses : i) le pH basique des amendements organiques permet de remonter le pH du sol ii) les apports composés d'un mélange de matières organiques sont plus propices au développement et à la diversité des communautés des microorganismes et de la macrofaune iii) les traitements à base de matières organiques réduisent les communautés de maladies et de ravageurs iv) ne faire aucun apport durant le cycle de culture ne modifie pas les paramètres du sol.

- 4) Déterminer quels sont les paramètres de la fertilisation (les éléments chimiques, la quantité, le type d'apport (chimique, organique ou un mélange)) qui influencent le plus les paramètres du sol mesurés.

Hypothèses : i) le type d'apport est l'influence principale sur les communautés de microorganismes du sol et sur la macrofaune ii) le carbone organique est l'élément influençant le plus les paramètres du sol, iii) la quantité d'apport va influencer l'amplitude de réponse des paramètres du sol.

III) Matériel et méthodes

1. Site d'étude

Cette étude a été réalisée près de la ville d'Imerintsiatosika dans la région Itasy à une vingtaine de kilomètres à l'Ouest d'Antananarivo sur les Hautes Terres de Madagascar (figure 1).

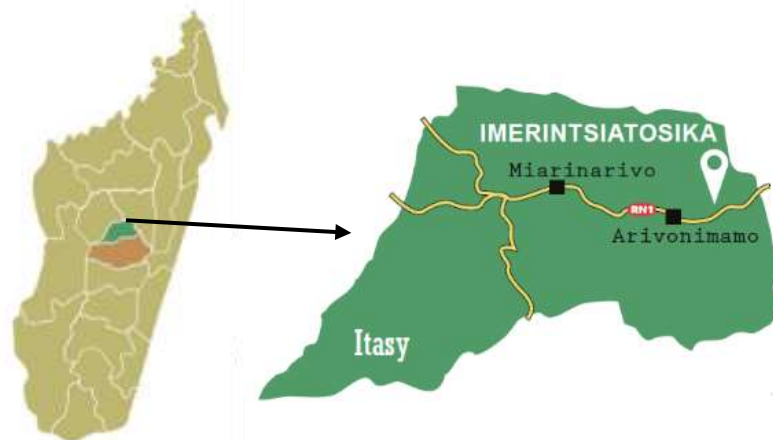


Figure 1 : Localisation de la parcelle étudiée près de la ville d'Imerintsiatosika, dans la région d'Itasy (en vert) située au centre de l'île de Madagascar (à gauche)

Le terrain appartient à un agriculteur qui participe à l'expérimentation. Avant qu'il ne soit mis en culture, il y avait de la savane donc il n'y a pas d'effet d'héritage d'anciennes pratiques agricoles, ni de rémanence de fertilisants ou de produits phytosanitaires. Pour rappel, dans cette région de l'île, il y a deux saisons, une chaude et humide qui va d'octobre à mars et une autre sèche et fraîche qui va d'avril à septembre. Les températures moyennes sur l'année sont de 18°C et la pluviométrie sur une année est de 1300 mm. Les Hautes Terres se trouvent à une altitude comprise entre 1300 et 1600 m. Le sol est ferrallitique de couleur rouge à brun et fortement désaturé avec un pH d'environ 5,1. La texture de la couche supérieure du sol est argileuse à 40 %, limoneuse à 20 % et sableuse à 40 % (Blanchart, s. d.).

2. Le matériel végétal

La variété de riz qui a été utilisée pour l'essai est la variété « Chhomrong Dhan » (*Oryza sativa* subspecies *japonica*). Elle représente 80 % du riz pluvial présent sur les Hautes Terres de Madagascar ; elle est adaptée au froid et elle résiste bien aux maladies communes du riz dans cette région. Le sol de la parcelle est labouré en octobre, le riz est semé en poquets (petit trou dans le sol dans lequel sont mises la matière fertilisante et la semence) au début du mois de novembre avec l'application des matières fertilisantes dans le fond du poquet sous les grains de riz. Les pieds de riz sont espacés de 20 cm. La récolte a lieu au mois d'avril.

3. Les matières fertilisantes

L'expérimentation teste 16 traitements (appelés SFR) la première année, auxquels se rajoutent 9 traitements à partir de la 2^e année, pour un total de 25 traitements. Chaque traitement est mis en place sur une placette de 4 x 4 m² et est répété dans 4 blocs différents disposés comme le montre le schéma de l'annexe 2.

Les 25 traitements sont classés en trois catégories :

- les traitements « paysans » : SFR 01, SFR 02, SFR 03 et SFR 17
- les traitements témoins : témoin positif : SFR 08 et SFR 21 ; témoin négatif : SFR 16
- les traitements « scientifiques » : tous les autres SFR

Les traitements « paysans » reproduisent les méthodes de fertilisation employées par les paysans. Les traitements « scientifiques » sont créés à partir des matières disponibles sur les Hautes Terres, en fonction des essais réalisés par les agriculteurs avec certaines matières et en se basant sur des connaissances scientifiques des apports que peuvent réaliser lesdites matières. Ils sont donc innovants dans les matières mais aussi sur les quantités d'éléments apportés et les assemblages réalisés. Les 25 traitements sont décrits en annexe 1.

Les matières utilisées sont présentes sur le territoire malgache et certaines sont déjà employées par les agriculteurs comme la poudrette de parc, le fumier traditionnel, le compost, les cendres de balles de riz (tableau 2). Toutes les matières sont connues des agriculteurs même si elles ne sont pas utilisées.

Tableau 2 : Descriptif des matières utilisées (produits) dans les traitements (SFR)

| Produits | Composition |
|---------------------------|--|
| Poudrette de parc | Fèces de bovin produites et stockées au niveau des parcs de rétention des bovins pendant la nuit. Contient une quantité importante de terre au moment du raclage |
| Fumier traditionnel | Fèces de bovin mélangées avec de la litière végétale ou des résidus alimentaires, stocké à l'extérieur de l'étable, sans soins particuliers pour sa conservation. |
| Fumier amélioré/conservé | Fèces et urine des bovins mélangés avec la litière végétale en grande quantité et stocké sous abri pour éviter les pertes de nutriments par volatilisation, lessivage et/ou lixiviation. |
| Compost | Mélange fermenté de débris organique obtenu par compostage. Le compost utilisé est celui de la société Madacompost |
| Lombricompost | Déjections animales et résidus végétaux décomposés par des vers de terre tels qu' <i>Eisenia foetida</i> . Le lombricompost utilisé est commercialisé par la société Tata. |
| Guano | Déjections de chauve-souris commercialisées par la société Guanomad. |
| Dolomie | Poudre de roche riche en calcium et en magnésium. |
| Cendre de balles de riz | Cendres issues de la briqueterie |
| Cendres de pailles de riz | Cendres issues du brûlis des pailles de riz |
| Prochimad | Poudre de roche riche en phosphore |
| NPK | Engrais minéral à base d'azote ; de phosphore et de potassium avec des proportions respectives de 11, 22, 16. |
| Urée | Engrais azoté sous forme granulée |

Sur chacune des 25 placettes des 4 blocs, des mesures sur le riz, le sol et les matières fertilisantes sont effectuées tous les ans ; de ces mesures sont calculées d'autres variables. Les données obtenues sur les plantes sont des mesures de croissance, de biomasse, de qualité des grains et de la paille, des composantes du rendement et du rendement (mesuré sur 7 poquets et mesuré sur un carré de rendement) pour un total de 50 variables. Les mesures sur les sols sont des mesures des propriétés physico-chimique, de respirométrie, de mycorhization, de capacité de dégradation de la matière organique du sol (Ecoplates, BaitLamina, tea-bags), les mesures de faune du sol (macrofaune, nématodes) pour un total de 245 variables. Les mesures sur les matières fertilisantes sont des mesures de quantité de carbone (C), d'azote (N), de phosphore (P), de potassium (K), de calcium (Ca), de magnésium (Mg) et de soufre (S) ainsi que des variables biochimiques (quantité d'hémicellulose, de cellulose, de lignine et de composés solubles) et des rapports de ces quantités (C/N, N/P, C/P, lignine/N) pour caractériser la matière organique (MO) apportée, pour un total de 15 variables. Les annexes 3 et 4 décrivent toutes les variables mesurées utilisés dans ce rapport et pour plus de détails sur les méthodologies de mesure, se reporter au rapport de Damoiseau en 2020. Les variables sur les plantes ont été choisies pour évaluer l'effet des pratiques sur les performances agronomiques des différents traitements. Les variables sur les sols ont été choisies pour évaluer la biodiversité ainsi que les quatre fonctions écologiques des sols à savoir : **i) le recyclage des nutriments ii) la transformation des molécules carbonées iii) le maintien de la structure des sols et iv) la régulation des populations (notamment de pathogènes)**. Les variables sur les fertilisants ont été mesurées pour évaluer plus précisément l'effet des nutriments sur les variables du sol et de la plante.

Pour pouvoir étudier l'effet des pratiques à une même échelle de temps, seuls les 16 SFR installés la première année ont été conservés, excepté le SFR 01 dont la fertilisation a changé lors du cycle 2021-2022. Pour une facilité d'analyse statistique l'année de culture 2020-2021 ne sera pas analysée car cette année-ci, une légumineuse a été cultivée, il n'y a donc pas eu de mesures du riz, ni du sol. La dernière année de culture, l'année 2022-2023 a également été retirée de l'analyse car une attaque de vers blancs a détruit une partie de la récolte de riz faussant les mesures de rendement. Ainsi, les analyses statistiques ont été faites sur 4 années (cycle de culture 17-18, 18-19, 19-20 et 21-22) et sur 15 SFR (du SFR 02 au SFR 16). Le tableau 3 décrit les 15 SFR analysés dans cette étude.

Tableau 3 : Compositions des 15 SFR étudiés avec les constituants apportés, leur type et quantité, et la catégorie de pratique. MO : Matières Organiques, MM : Matières Minérales, FM : Fertilisation Minérale

| SFR | Constituants | | | Types | Pratique |
|--------|---------------------------------|--------------------------|--|--------------|--------------|
| SFR 02 | Fumier traditionnel (3 t MS/ha) | | | MO seul | paysanne |
| SFR 03 | Fumier traditionnel (3 t MS/ha) | NPK 11-22-16 (40 kg/ha) | | MO seul + FM | paysanne |
| SFR 04 | Fumier traditionnel (6 t MS/ha) | | | MO seul | scientifique |
| SFR 05 | Fumier amélioré (6 t MS/ha) | | | MO seul | scientifique |
| SFR 06 | Compost (6 t MS/ha) | | | MO seul | scientifique |
| SFR 07 | Lombricompost (6 t MS/ha) | | | MO seul | scientifique |

| | | | | | | |
|--------|---------------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|-----------------|------------------|
| SFR 08 | NPK 11-22-16 (100 kg /ha) | Urée (100 kg /ha) | | | FM adéquate | contrôle positif |
| SFR 09 | Fumier traditionnel (6 t MS/ha) | Dolomie (500 kg/ha) | | | MO seul + MM | scientifique |
| SFR 10 | Fumier traditionnel (6 t MS/ha) | Cendre (500 kg/ha) | | | MO seul + MM | scientifique |
| SFR 11 | Fumier traditionnel (6 t MS/ha) | Hyperfos (500 kg/ha) | | | MO seul + MM | scientifique |
| SFR 12 | Fumier traditionnel (2 t MS/ha) | Compost (2 t MS/ha) | Lombricompost (2 t MS/ha) | | MO mélange | scientifique |
| SFR 13 | Fumier traditionnel (2 t MS/ha) | Compost (2 t MS/ha) | Lombricompost (2 t MS/ha) | Cendre (500 kg/ha) | MO mélange + MM | scientifique |
| SFR 14 | Fumier traditionnel (2 t MS/ha) | Compost (2 t MS/ha) | Lombricompost (2 t MS/ha) | Hyperfos (500 kg/ha) | MO mélange + MM | scientifique |
| SFR 15 | Fumier traditionnel (2 t MS/ha) | Compost (2 t MS/ha) | Lombricompost (2 t MS/ha) | Guanomad (500 kg/ha) | MO mélange + MM | scientifique |
| SFR 16 | Aucune fertilisation | | | | rien | contrôle négatif |

En plus d'évaluer l'impact des SFR sur les différentes variables choisies, il est intéressant de connaître quels éléments chimiques influencent le plus les effets des SFR. Il est ainsi nécessaire de connaître la quantité des éléments chimiques qui composent le traitement. Une analyse des matières utilisées lors de l'expérience a été réalisée chaque année. Celle-ci a permis de connaître les quantités d'éléments chimiques par matière. Les traitements étant reconduits à l'identique d'une année sur l'autre, les compositions et les proportions en éléments chimiques seront considérées comme identiques ; ce sont donc ces valeurs moyennes qui seront utilisées comme présenté dans le tableau 4.

Tableau 4 : Quantité d'éléments minéraux présents dans les différents SFR appliqués sur la culture du riz en kg/ha, chaque année en début de culture (C organique, N total, P total, K total, Ca total, Mg total, S total, éléments solubles, hémicellulose, cellulose, lignine)

| | Quantité C kg.ha-1 | Quantité N kg.ha-1 | Quantité P kg.ha-1 | Quantité K kg.ha-1 | Quantité Ca kg.ha-1 | Quantité Mg kg.ha-1 | Quantité S kg.ha-1 | Soluble kg.ha-1 | Hemicellulose kg.ha-1 | Cellulose kg.ha-1 | Lignin kg.ha- 1 |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------------|----------------------|--------------------|
| SFR02 | 586,458 | 24,987 | 8,508 | 28,515 | 10,539 | 5,85 | 3,42 | 471,897 | 139,818 | 2118,867 | 269,418 |
| SFR03 | 587,782 | 38,955 | 17,308 | 34,915 | 10,539 | 5,85 | 3,42 | 471,897 | 139,818 | 2118,867 | 269,418 |
| SFR04 | 1172,916 | 49,974 | 17,016 | 57,03 | 21,078 | 11,7 | 6,84 | 943,794 | 279,636 | 4237,734 | 538,836 |
| SFR05 | 1494,342 | 97,218 | 17,694 | 106,218 | 38,472 | 31,704 | 14,7 | 1865,376 | 30,522 | 3152,13 | 951,972 |
| SFR06 | 879,06 | 65,358 | 28,422 | 31,578 | 264,162 | 54,606 | 6,6 | 1599,6 | 283,236 | 3311,4 | 805,764 |
| SFR07 | 1395,696 | 100,986 | 22,944 | 102,318 | 45,468 | 22,914 | 18 | 1468,8 | 381,024 | 2775,576 | 1374,594 |
| SFR08 | 22,62 | 80,14 | 22 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SFR09 | 1172,916 | 49,974 | 17,026 | 57,056 | 116,7035 | 48,405 | 6,84 | 943,794 | 279,636 | 4237,734 | 538,836 |
| SFR10 | 1189,2255 | 50,6735 | 17,629 | 60,4965 | 21,881 | 12,079 | 7,29 | 984,4775 | 284,436 | 4667,476 | 563,6105 |
| SFR11 | 1174,16 | 50,407 | 57,688 | 57,1915 | 60,6755 | 12,5475 | 6,94 | 1035,237 | 504,117 | 4411,9705 | 548,6755 |
| SFR12 | 1149,224 | 72,106 | 22,794 | 63,642 | 110,236 | 29,74 | 10,48 | 1337,398 | 314,632 | 3441,57 | 906,398 |
| SFR13 | 1165,5335 | 72,8055 | 23,407 | 67,1085 | 111,039 | 30,119 | 10,93 | 1378,0815 | 319,432 | 3871,312 | 931,1725 |
| SFR14 | 1150,468 | 72,539 | 63,466 | 63,8035 | 149,8335 | 30,5875 | 10,58 | 1428,841 | 539,113 | 3615,8065 | 916,2375 |
| SFR15 | 1173,7015 | 78,864 | 58,9235 | 64,743 | 141,078 | 31,957 | 33,43 | 1748,3725 | 362,714 | 3480,3585 | 908,553 |
| SFR16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4. Méthodes d'analyses statistiques

L'analyse des données se fait en utilisant le logiciel libre d'accès R version 4.3.1.

Les analyses se sont déroulées en 2 étapes. La première était une analyse factorielle sur les données agronomiques pour déterminer quel(s) étai(en)t le(s) SFR avec le meilleur rendement et la meilleure stabilité dans le temps. Cette première approche des données a permis de mettre à jour le jeu de données.

Une Analyse en Composante Principale (ACP) sur les variables agronomiques puis sur les variables 'sol' a été réalisée avec le package « FactomineR » pour connaître les liens entre chacune des variables et choisir un nombre restreint de variables pour les études plus approfondies. Les ACP ont été réalisées une première fois toutes années confondues puis une ACP par année en ne gardant que les variables qui n'avaient pas de valeurs manquantes pour voir si les résultats étaient similaires. Pour ces ACP, il n'a donc pas été nécessaire de faire d'imputation des données. Les variables « SFR », « Block » (bloc) et « Year » (année) ont été utilisées comme variables qualitatives supplémentaires dans les ACP.

Pour réaliser les ACP sur les variables agronomiques, une imputation des données a été faite avec la fonction « imputFAMD » du package missMDA. Pour l'utiliser, il a été nécessaire de supprimer au préalable certaines variables qui présentaient trop de NA ('not applicable') car un trop grand nombre de NA ne permet pas de calculer l'erreur standard sur laquelle se base l'imputation.

Pour les ACP sur les variables du sol, seules les variables correspondant à la somme des valeurs mesurées par ordres de macrofaune (ex : somme de la densité de coléoptères), groupes trophiques de nématodes, des biomasses totales et de densités totales de la macrofaune ont été gardées, réduisant ainsi le jeu de données à 85 variables sur les 245 d'origine. Le jeu de données utilisées pour les analyses statistiques sur le sol est présenté en annexe 4. Les ACP n'ont pas été faites sur l'année 2017-2018 car les mesures du sol n'ont pas été réalisées cette année-là. Pour les ACP année par année, le jeu de données minimales (c'est-à-dire les variables qui ont été mesurées pour toutes les années de culture) a été utilisé.

Ainsi, 9 ACP ont été réalisées (tableau 5).

Tableau 5 : Récapitulatif des ACP et du nombre de variables utilisées pour chacune d'elles

| | | |
|------------------------|-----------------|----------------------------|
| Variables de la plante | Toutes années | 28 variables quantitatives |
| | Année 2017-2018 | 28 variables quantitatives |
| | Année 2018-2019 | 37 variables quantitatives |
| | Année 2019-2020 | 25 variables quantitatives |
| | Année 2021-2022 | 22 variables quantitatives |
| Variables du sol | Toutes années | 85 variables quantitatives |
| | Année 2017-2018 | non disponibles |
| | Année 2018-2019 | 34 variables quantitatives |

| | | |
|--|-----------------|----------------------------|
| | Année 2019-2020 | 34 variables quantitatives |
| | Année 2021-2022 | 34 variables quantitatives |

La lecture des résultats des ACP s'est faite avec la fonction « dimdesc » qui a permis d'obtenir uniquement les variables dont l'effet est significatif pour la construction des axes 1 et 2 et dans l'ordre décroissant d'importance sur les axes.

À partir des résultats des ACP, certaines variables agronomiques et du sol ont été sélectionnées et utilisées pour faire des ANOVA et des tests de Random Forest.

Une ANOVA sur mesures répétées a été faite avec la fonction « ezANOVA » qui corrige automatiquement la sphéricité par un test de Greenhouse-Geisser pour valider l'hypothèse d'égalité des variances. Cette ANOVA a été effectuée pour étudier l'effet de l'année sur le rendement au carré de rendement (i.e. le rendement mesuré sur l'ensemble de la placette de 4 x 4 m², à différencier du rendement mesuré sur 7 poquets).

Des ANOVAs ont été réalisées avec la fonction « aov » pour tester l'effet des SFR sur la variable du rendement au carré de rendement, sur la densité totale de macrofaune, sur la densité de nématodes, sur la densité des coléoptères ravageurs et sur la densité de vers de terre. Des tests post-hoc ont été faits quand l'ANOVA montrait un effet significatif, avec le test de comparaison par pair de Tukey et la fonction « TukeyHSD ».

Une analyse exploratoire a été réalisée en utilisant un test Random Forest (RF) avec un set.seed fixé à 140, ce qui représente 60 % du jeu de données. Un test RF nécessite une variable à expliquer. Le choix s'est fait sur la base des résultats de l'ACP et en choisissant les variables qui avaient le plus de sens pour pouvoir comprendre les variations du jeu de données et mieux aider les agriculteurs lors du choix des matières fertilisantes. Ainsi 2 variables explicatives ont été sélectionnées :

- la variable 'rendement au carré de rendement'
- la variable de 'densité totale de la faune du sol évaluée avec la méthode TSBF' c'est-à-dire la densité de la macrofaune visible à l'œil nu qui va être prélevée manuellement dans des blocs de terre mesurant 25 cm de côté et 20 cm de profondeur.

Pour l'étude de la variable de rendement et la densité de macrofaune, une première version de test RF a été faite avec les 15 SFR (SFR 02 à 16, voir tableau 3). Une seconde version du test a été faite sur les mêmes variables mais en enlevant le témoin négatif SFR 16 (aucune fertilisation) puis en enlevant aussi le témoin positif SFR 08 (fertilisation chimique NPK). Ces deux versions permettent de mieux voir les différences entre les SFR apportant de la matière organique. Au sein des différents traitements il est possible de savoir quels sont les éléments de la fertilisation qui impactent le plus les variables étudiées. Enfin, un dernier test RF a été réalisé en enlevant, en plus des deux autres déjà retirés (SFR 08 et 16), les SFR 02 et SFR 03. Le choix a été fait de les retirer car ils apportaient 3 t de matières fertilisantes contre 6 t pour les autres. En les retirant nous avons gommé l'effet 'quantité' dans la réponse de la variable étudiée. Les tests de Random Forest (RF) donnent le %IncMSE qui permet de connaître le pourcentage d'augmentation des erreurs du modèle lorsque les variables (éléments chimiques qui constituent les SFR et les rapports de ceux-ci) sont aléatoirement permutées dans le jeu de données : si une permutation change fortement l'erreur du modèle alors cette variable est importante dans la construction

du modèle et son pourcentage sera élevé. Ainsi, une variable importante dans le modèle expliquera une grande partie de la variation des variables expliquées.

IV) Résultats

Caractérisation des variables ayant le plus d'effet sur la variation des données agronomiques

Tout d'abord, les données de la plante ont été analysées par ACP pour les 15 SFR et les 4 années (2017-2018 / 2018-2019 / 2019-2020 / 2021-2022). Cette ACP donne un premier axe qui représente 45,41 % de l'inertie du jeu de données et un deuxième axe qui en représente 19,94 % (figure 2).

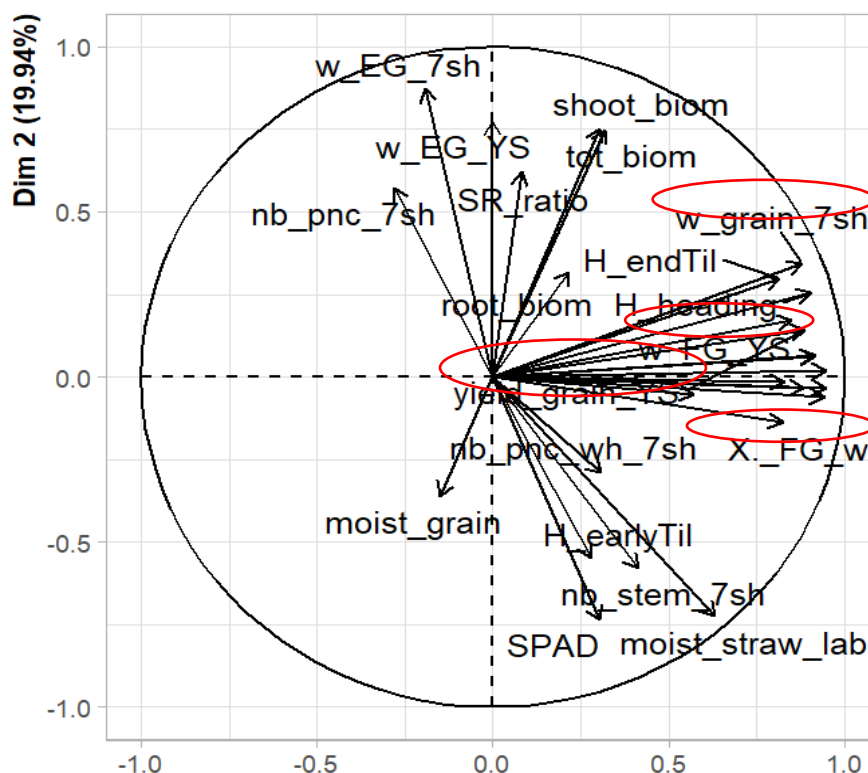


Figure 2 : Cercle des corrélations de l'ACP sur les variables des performances agronomiques pour toutes les années. Plus les flèches sont longues et proches des axes et plus elles sont importantes dans la construction de celui-ci. Légende voir annexe 3. En rouge certaines variables servant au calcul du rendement et le rendement (yield_grain_YS)

Les variables qui ont contribué le plus à la construction du premier axe sont les variables liées à la mesure du rendement (annexe 3) et les valeurs du rendement. L'axe 2 a été principalement construit par les variables de biomasse racinaire, biomasse aérienne, le ratio de ces deux biomasses et quelques composantes du rendement également : le poids des grains vide (w_EG), le poids de grains pour 7 poquets (w_grain_7sh), le nombre de panicules pour 7 poquets (nb_pnc_7sh), le poids des grains pleins au carré de rendement (w_FG_YS), le nombre de panicules blanches pour 7 poquets (nb_pnc_wh_7sh) et le nombre de talles pour 7 poquets (nb_stem_7sh). D'après cette ACP (figure 2), la plupart des variables agronomiques sont corrélées entre elles, notamment les variables de composition du rendement.

Sur la figure 3, nous pouvons voir que les SFR sont tous à droite sur l'axe 1 sauf les SFR 16, 08 et 02. Ils sont anti-corrélés aux variables de rendement ce qui se confirme par le fait que ce sont des SFR avec des rendements plus faibles. Pour toutes les ACP réalisées avec les données agronomiques collectées par année ou pour l'ensemble des 4 années, les 8 variables qui contribuent le plus au rendement sont récapitulées dans le tableau 6. Les autres résultats sont visibles dans l'annexe 5.

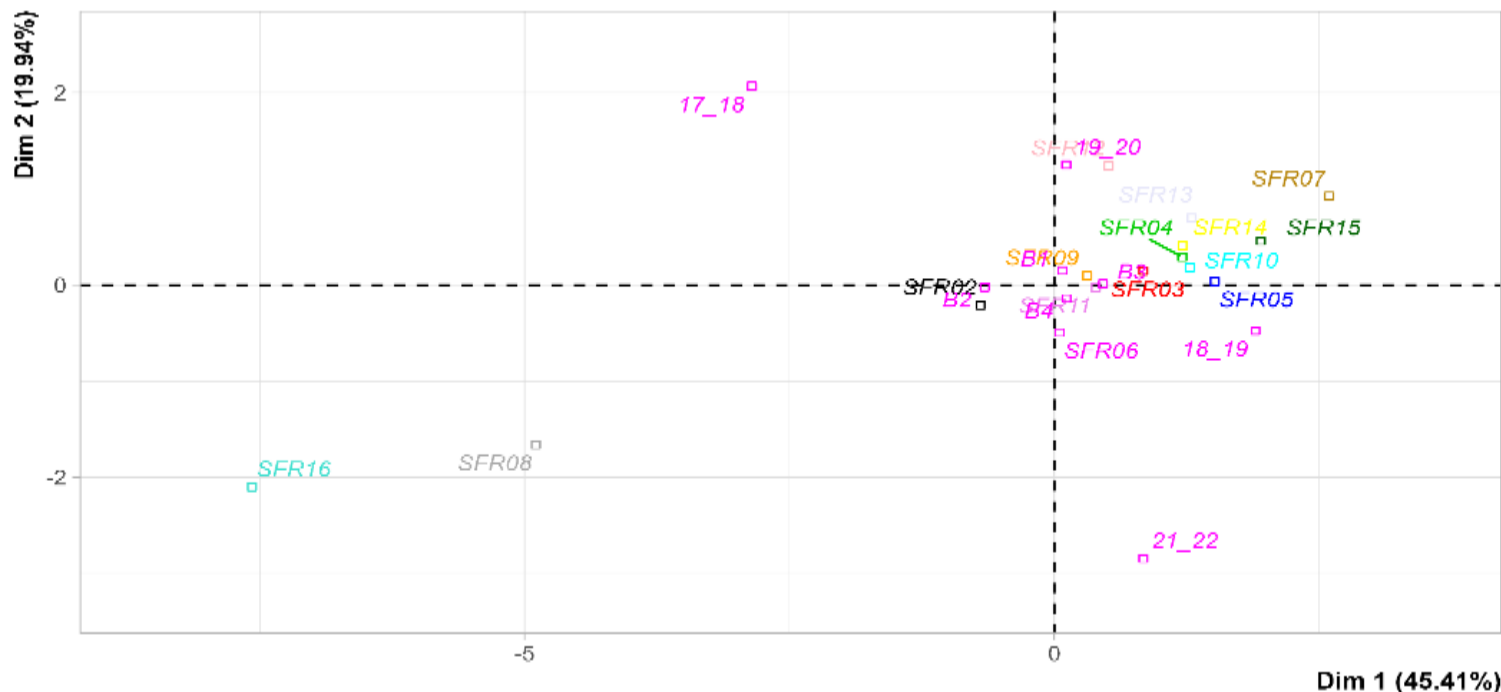


Figure 3 : Graphique des individus répartis sur les axes 1 et 2 de l'ACP sur les données agronomiques pour toutes les années. Les points de couleur roses sont les variables qualitatives supplémentaires.

Tableau 6 : Tableau résumant les variables qui contribuent le plus à la construction des ACP sur les variables de performances agronomiques. Pour la légende des variables voir l'annexe 3. En jaune la variable de rendement au carré de rendement.

| Toutes les années | Cycle de culture 17-18 | Cycle de culture 18-19 | Cycle de culture 19-20 | Cycle de culture 21-22 |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Pour l'axe 1 (45,41 %) : | Pour l'axe 1 (58,81 %) : | Pour l'axe 1 (43,50 %) : | Pour l'axe 1 (57,09 %) : | Pour l'axe 1 (58,22 %) : |
| w_grain_YS | w_FG_YS | w_grain_YS | nb_stem_7sh | H_endTil |
| H_harvest | yield_grain_YS | yield_grain_YS | nb_pnc_7sh | nb_stem_7sh |
| yield_straw_7sh | w_grain_YS | w_stem_YS | w_grain_7sh | H_harvest |
| w_stem_7sh | w_EG_YS | yield_straw_YS | | w_stem_7sh |
| w_FG_7sh | yield_straw_YS | H_harvest | w_FG_YS | yield_straw_7sh |
| yield_grain_7sh | yield_straw_7sh | H_endTil | yield_grain_YS | yield_straw_YS |
| H_heading | w_stem_7sh | yield_grain_7sh | H_endTil | w_stem_YS |
| yield_grain_YS | w_stem_YS | w_stem_7sh | w_FG_7sh | yield_grain_7sh |
| Pour l'axe 2 (19,94 %) : | Pour l'axe 2 (9,12 %) : | Pour l'axe 2 (10,35 %) : | Pour l'axe 2 (11,47 %) : | Pour l'axe 2 (8,83 %) : |
| w_EG_7sh | %_heading | DM_straw_SPIR | w_EG_YS | moist_grain |
| w_EG_YS | SR_ratio | NDF_SPIR | w_EG_7sh | NDVI |
| shoot_biom | %_FG_nb | ADF_SPIR | SR_ratio | w_FG_7sh |
| tot_biom | nb_stem_7sh | CC_SPIR | nb_pnc_wh_7sh | yield_grain_7sh |
| SR_ratio | nb_sh_per_YS | nb_stem_7sh | | yield_straw_7sh |

Effet des années et des SFR sur le rendement

À la suite des ACP, l'analyse factorielle a permis d'étudier l'effet des années et des traitements sur le rendement.

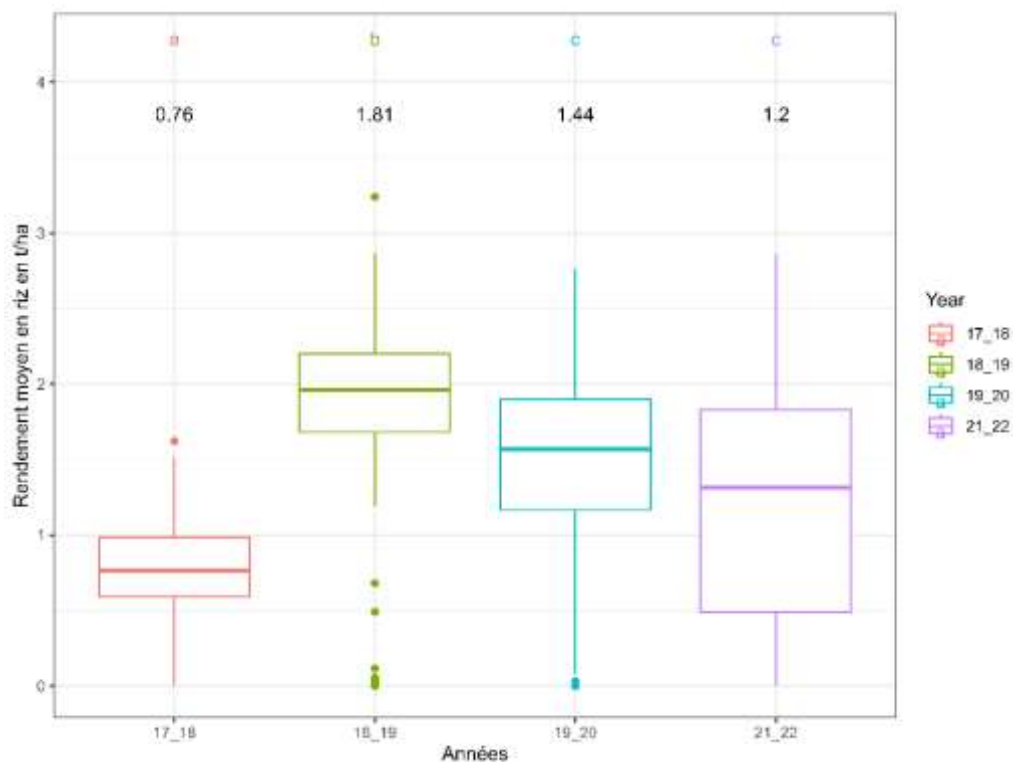


Figure 4 : Boxplot de l'effet de l'année sur les rendements en grain de riz sur tous les SFR. 17_18 : cycle de culture de l'année 2017-2018 ; 18_19 : cycle de culture de l'année 2018-2019 ; 19_20 : cycle de culture de l'année 2019-2020 ; 21_22 : cycle de culture de l'année 2021-2022. Une lettre différente indique une différence significative (ANOVA, $p_{\text{value}}=8,227e-17$). Les valeurs sous les lettres indiquent la moyenne.

L'ANOVA sur les mesures répétées, qui teste l'effet de l'année sur les rendements, montre, après correction de la sphéricité par le test de Greenhouse-Geisser, un effet significatif du facteur année ($p_{\text{value}} = 8,227e-17$) (Figure 4). Sur la figure 4, nous voyons que la première année les rendements sont significativement plus faibles que les autres années. L'année de culture 2018-2019 est celle avec le rendement significativement plus élevé que les autres années. Les deux dernières années n'ont pas un rendement significativement différent.

Sur la figure 5, nous voyons que tous les SFR à l'exception de 2 (SFR 16 et 08), génèrent une très forte augmentation des rendements entre la première année de culture et la deuxième (le SFR 04 (apport de fumier traditionnel à 6 tonnes) passe de 0,75 t/ha à 2,6 t/ha) suivie d'une diminution lors de la troisième année (SFR 04 : 1,5 t/ha). Le rendement de la dernière année étudiée est plus variable selon les SFR, certains raugmentent (SFR 04 : 1,75 t/ha) et d'autres continuent de diminuer comme le SFR 02 qui passe de 1,75 t/ha en année 2018-2019 à 1,25 t/ha en 2019-2020 et finalement 0,90 t/ha en 2021-2022. Nous observons également la tendance du SFR 08 (témoin positif) qui produit un rendement similaire aux autres SFR la première année, puis qui ne fait que diminuer jusqu'à ne plus rien donner la dernière année. Les traitements donnant les meilleurs rendements avec le moins de variation au cours du temps sont les SFR 07 (le lombricompost), le SFR 03 (le fumier traditionnel avec 40 kg/ha de NPK) et le SFR 06 (compost 6 t/ha) (figure 5).

Voici les moyennes des rendements sur les 4 ans de culture : SFR 02 : 1,124449137 / SFR 03 : 1,405921656 / SFR 04 : 1,512728878 / SFR 05 : 1,538802045 / SFR 06 :

1,292591221 / **SFR 07 : 1,839809589** / SFR 08 : 0,264282696 / SFR 09 : 1,423013318 / SFR 10 : 1,616423097 / SFR 11 : 1,318628948 / SFR 12 : 1,421498088 / SFR 13 : 1,615436341 / SFR 14 : 1,536719545 / SFR 15 : 1,650687331 / SFR 16 : 0,007365405.

Le meilleur rendement est donc celui du SFR 07 (lombricompost), puis du SFR 15, du SFR 10 et SFR 13 (avec des cendres), du SFR 05, 14 et 04.

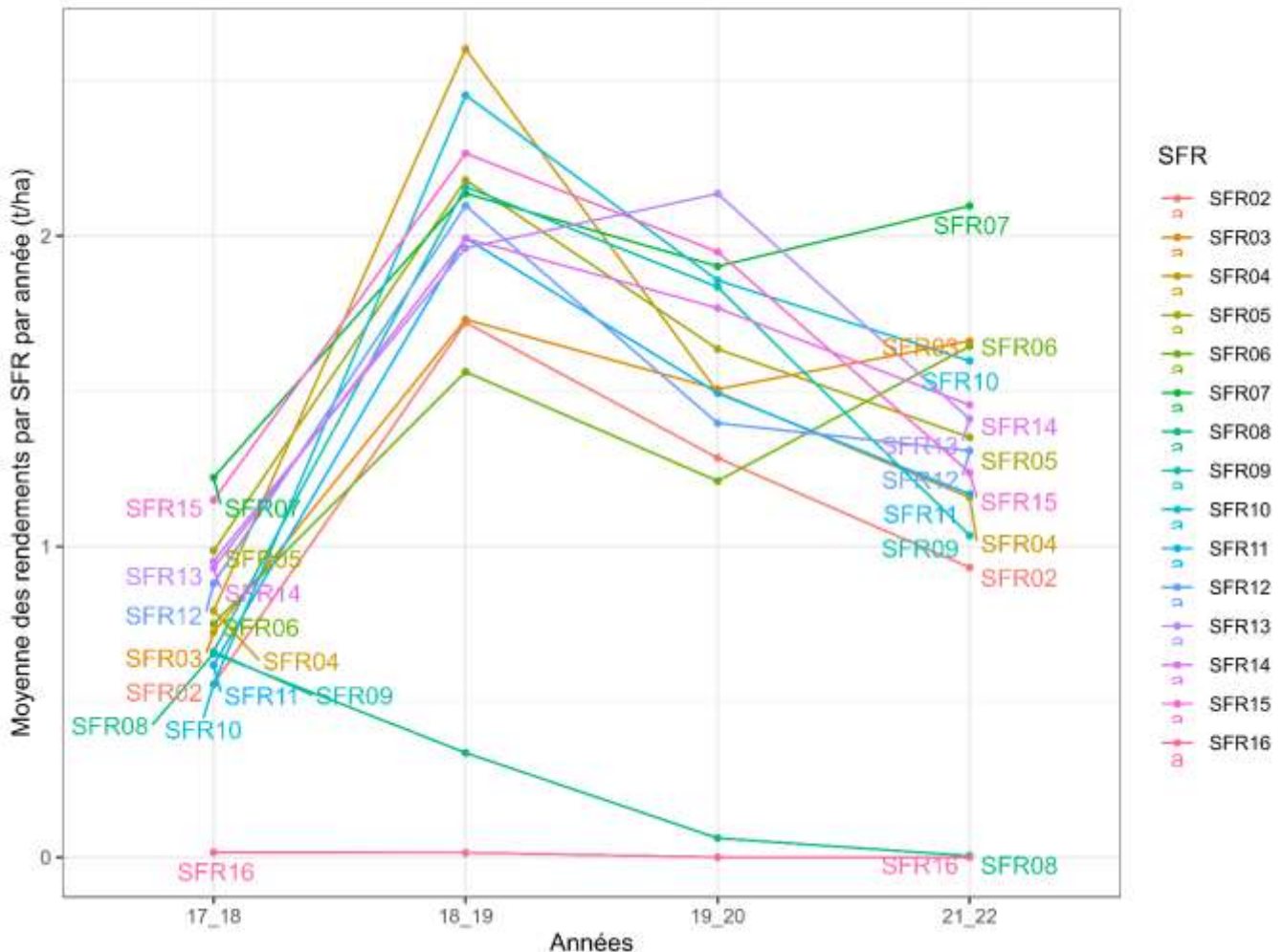


Figure 5 : Graphique de l'évolution des rendements en tonne de grain de riz par hectare (t/ha) des SFR au cours du temps. Chaque point est une moyenne des valeurs des rendements des 4 blocs

Le tableau 7 résume les résultats des ANOVA qui donnent toutes des résultats significatifs et qui montrent que le traitement a un effet significatif sur les rendements.

Tableau 7 : Tableau des statistiques de test des ANOVA sur les variables agronomiques pour un seuil alpha de 0,05%

| Test | p-value |
|--|----------|
| ANOVA effet des SFR sur le rendement (4 années) | 6,73E-19 |
| ANOVA effet des SFR sur le rendement (2017-2018) | 0,004043 |
| ANOVA effet des SFR sur le rendement (2018-2019) | 1,21E-13 |
| ANOVA effet des SFR sur le rendement (2019-2020) | 2,44E-12 |
| ANOVA effet des SFR sur le rendement (2021-2022) | 0,004043 |

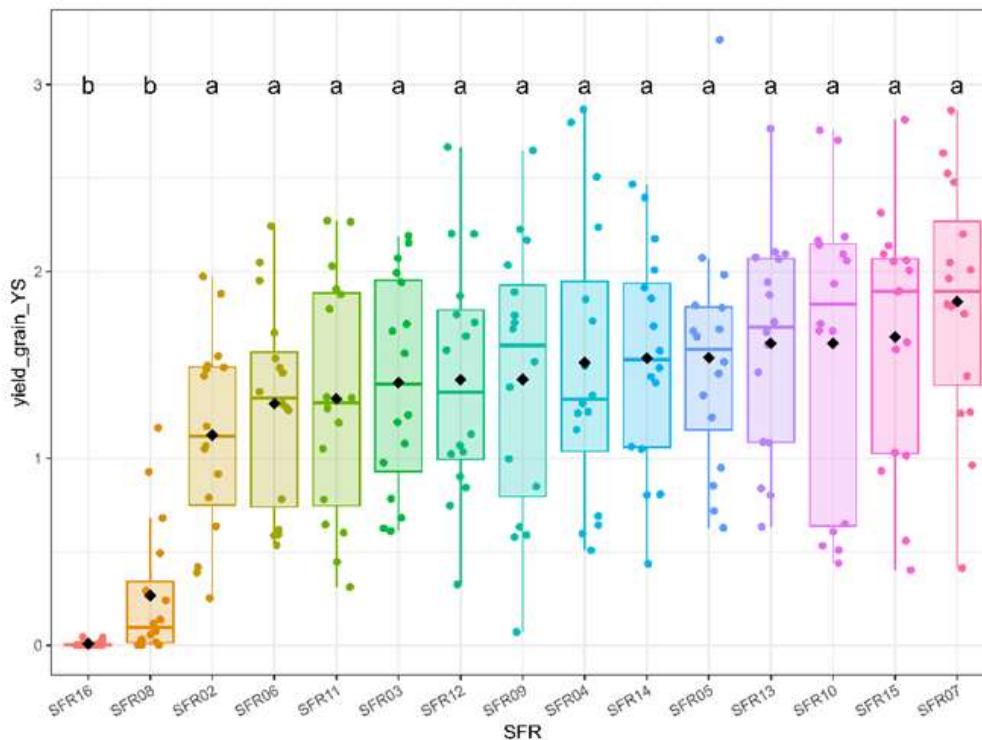


Figure 6 : Boxplot des rendements (t/ha) présentés par ordre croissant en fonction des SFR pour l'ensemble des années. Les lettres identiques indiquées au-dessus montrent les rendements non significatifs entre eux. ANOVA 1 facteur, p value= 6,73E-19, test post hoc de Tukey. Les barres horizontales représentent la médiane, les barres verticales représentent l'étendue des données non atypique ($n=16$), le losange noir représente la moyenne. Les caractéristiques des diverses SFR sont indiquées dans le tableau 3.

Le test post-hoc de la première ANOVA qui teste l'effet des SFR sur les rendements de toutes les années montre que le SFR 16 et le SFR 08 sont significativement plus bas que les autres SFR (figure 6).

Pour l'année 2017-2018, le rendement du SFR 16 est significativement inférieur à tous les SFR sauf SFR10, 02, et 11 (figure 7). Le rendement du SFR 07 (apport de lombricompost) est significativement supérieur aux SFR 16, 02 et 10 mais pas aux autres SFR (figure 7). Pour la première année (figure 7), le SFR 08 (témoin positif avec fertilisation chimique adéquate) donne un rendement similaire à ceux des autres SFR. Pour l'année 2018-2019, il y a une augmentation générale des rendements sauf pour les SFR 08 et 16 (annexe 6). Le SFR 08 (témoin positif) montre des rendements fortement diminués et le SFR 16 (témoin négatif sans fertilisation) reste à 0 t/ha (annexe 6). Le SFR 06 (1,56 t/ha) est significativement plus bas que les SFR 04 (2,60 t/ha) et 10 (2,45 t/ha) (annexe 6). Le SFR 02 (1,72 t/ha) est également significativement plus bas que le SFR 04 mais pas que les autres SFR (annexe 6). Pour l'année 2019-2020, les SFR 16 (0 t/ha) et 08 (0,06 t/ha) sont toujours significativement plus faibles en termes de rendement que les autres SFR (annexe 6). Le SFR 13 donne un rendement significativement plus haut (2.14 t/ha) que les SFR 08 (0.0614 t/ha), 16 (0 t/ha), 06 (1.21 t/ha) et 02 (1.29 t/ha) (annexe 6). Il n'y a pas de différence significative du rendement entre les autres SFR (annexe 6).

Pour l'année 2021-2022, les rendements des SFR 08 (0.004 t/ha) et 16 (0 t/ha) sont significativement plus bas que le rendement du SFR 07 (2,10 t/ha) mais pas que les autres SFR (annexe 6).

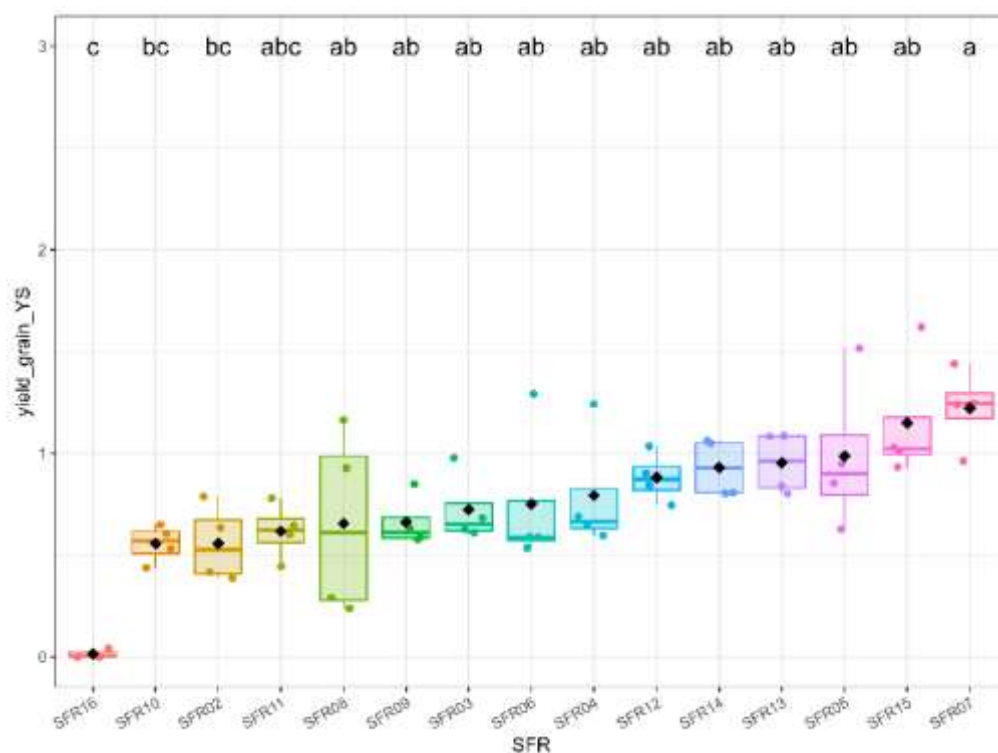
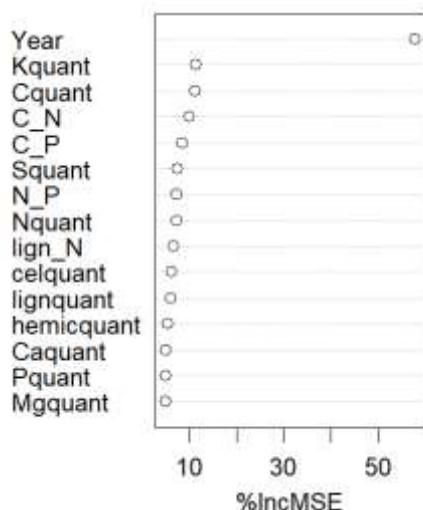


Figure 7 : Boxplot des rendements (t/ha) présentés par ordre croissant en fonction des SFR pour l'année 2017-2018. Les lettres identiques indiquées au-dessus montrent les rendements non significatifs entre eux (ANOVA 1 facteur, p value = 0,004043, test post hoc de Tukey). Les barres horizontales représentent la médiane, les barres verticales représentent l'étendue des données non atypiques ($n=16$), le losange noir représente la moyenne. Les caractéristiques des diverses SFR sont indiquées dans le tableau 3.

En regardant les ordres des SFR sur les boxplots (figure 7 et annexe 6), nous pouvons voir que le SFR 07 revient deux années en première place, la première et la dernière qui sont celles avec les plus petits rendements moyens (respectivement 0,76 t/ha et 1,2 t/ha en moyenne). Le SFR 02, qui est un SFR mimant les pratiques paysannes avec du fumier traditionnel épandu à 3 t/ha est toujours parmi les 4 derniers SFR les moins productifs. Le SFR 03, qui est le second SFR de la catégorie 'SFR paysans' et qui est fait avec du fumier et de la fertilisation minérale, donne des résultats plus variables : pour les années 2017-2018 et 2021-2022, donc celles à plus faible rendement, il est mieux classé (en seconde place pour la dernière année) que quand les rendements sont meilleurs mais il n'est jamais dans les groupes ayant un rendement significativement plus bas que le premier SFR. Le SFR 10 donne un rendement très faible la première année (avant dernier sur le boxplot, figure 7) puis il reste parmi les 4 rendements les plus élevés.

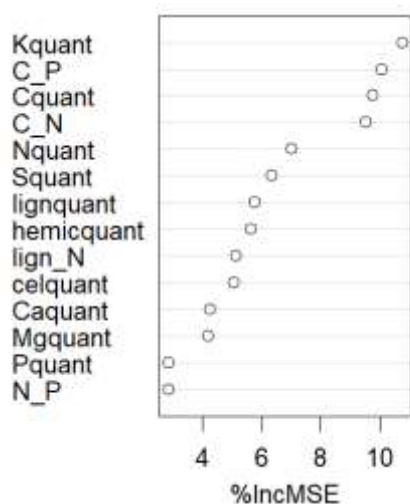
Effet des apports en éléments chimiques et organiques sur le rendement

Les différents tests de RF permettent de déterminer quels sont les éléments chimiques les plus importants pour la variation du rendement. L'importance d'une variable dans le modèle étant relative aux autres, les tests ont été enlevés en supprimant le SFR 16, puis avec lui le SFR 08 et enfin en retirant aussi les SFR 02 et 03.



La figure 8 montre que l'élément qui diminue le plus l'erreur du modèle est l'année et non pas les éléments chimiques constitutifs des SFR. Le poids de l'année dans la diminution de l'erreur est de 60 % tandis que les poids des éléments chimiques dans la diminution de l'erreur du modèle varient entre 0 et 12 % (figure 8). Ceci confirme l'effet de l'année vu précédemment. Pour étudier l'effet des différents éléments chimiques l'année n'est plus incorporée au modèle.

Figure 8 : Pourcentage de l'importance dans la variabilité du rendement des différents éléments chimiques et certains rapports et de l'année dans un modèle de RF construit sur tous les SFR et toutes les années. **Year** : année ; **Kquant** : quantité de potassium ; **Cquant** : quantité de carbone ; **C_N** : ratio carbone sur azote ; **C_P** : ratio carbone sur phosphore ; **Squant** : quantité de soufre ; **N_P** : ratio azote sur phosphore ; **Nquant** : quantité d'azote ; **lign_N** : ratio lignine sur azote ; **celquant** : quantité de cellulose ; **lignquant** : quantité de lignine ; **hemicquant** : quantité d'hémicellulose ; **Caquant** : quantité de calcium ; **Pquant** : quantité de phosphore ; **Mgquant** : quantité de magnésium.



Sur la figure 9, les éléments chimiques les plus importants dans les variations du rendement pour l'ensemble des traitements et des années sont : le potassium, le rapport carbone/phosphore, la quantité de carbone et les rapport carbone/azote. Ils ont un %IncMSE compris entre 10 et 12 %. Les autres variables ont des %IncMSE compris entre 2 et 7 %.

Figure 9 : Pourcentage de l'importance dans la variabilité du rendement des différents éléments chimiques et certains rapports sans l'année. Les variables sont décrites dans la figure 8.

Quand les tests RF sont effectués année par année pour voir s'il y a une évolution de l'importance des variables au cours du temps, le résultat est que l'ordre de classement des variables les plus importantes est différent. Le graphique suivant (figure 10) présente les résultats des 5 variables les plus importantes dans la variation du rendement en pourcentage relatif. Les résultats qui sont tirés de ces graphiques sont les fréquences d'apparition et non des pourcentages.

Selon le test RF effectué sur toutes les années et tous les SFR, les éléments présents sur les 4 ans sont le potassium, et le carbone représenté par la variable « Cquant », c'est-à-dire la « quantité de carbone dans le traitement » soit par les variables avec un composé carboné comme la lignine, la cellulose, le ratio carbone sur azote et le rapport C/P (figure 10). Le phosphore et l'azote sont des variables présentes uniquement la première année (figure 10).

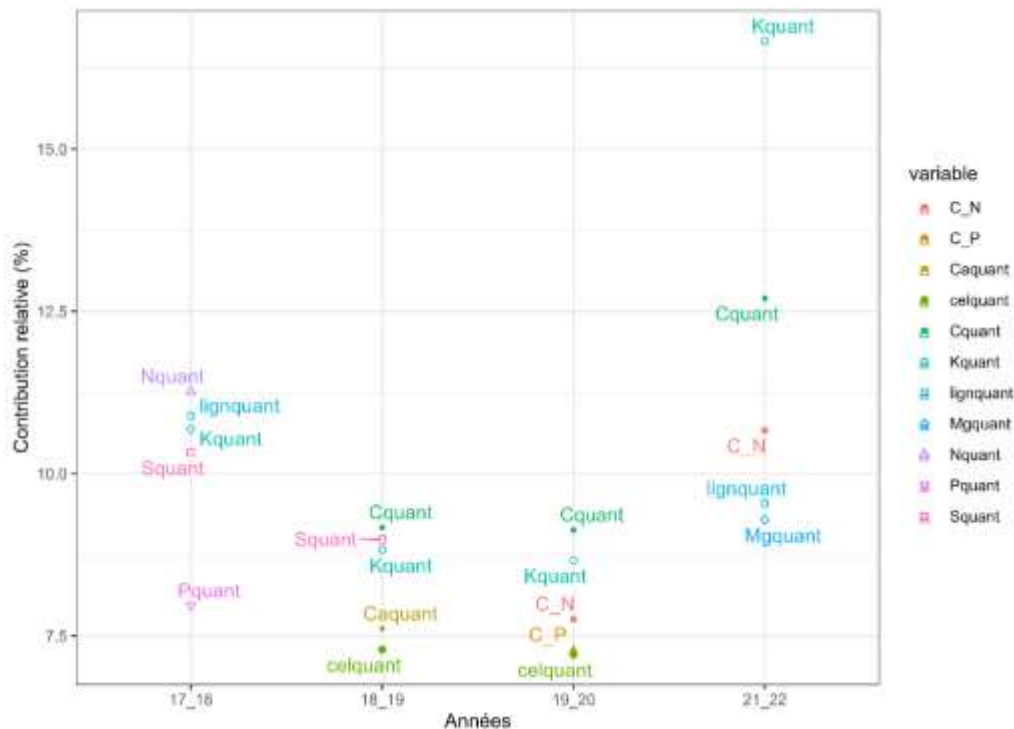


Figure 10 : Représentation des résultats des cinq variables (éléments chimiques ou ratio) ayant montré la contribution relative (%) la plus élevée au rendement pour chaque année. Résultats issus d'un test RF, avec un $set.seed = 140$ et 500 arbres sur t tous les SFR. Les variables sont décrites dans la figure 8.

Quand le SFR 16 (témoin négatif, sans fertilisant) est retiré, le classement des 5 premiers éléments chimiques qui contribuent le plus au rendement change peu. Le potassium est toujours présent sur les 4 ans comme une des variables principales (annexe 7). L'azote est également une des 5 premières variables la première année et il est présent aussi en 3^{ème} année dans le rapport lignine/N « lign_N » (annexe 7). Les éléments carbonés sont également toujours parmi les 5 premières variables (annexe 7). Les différences sont que le soufre est présent dans le classement sur les trois premières années alors qu'il ne l'était que sur deux dans le test précédent et le phosphore n'est pas du tout présent (annexe 7)

Quand nous enlevons les traitements positifs et négatifs (SFR 16 et 08), les mêmes éléments sont les plus importants la première année que pour le test sans le SFR 16 seulement (annexe 7) avec des importances relatives différentes (l'azote devient plus important (contribution de 16 %) que le potassium (13 %) et la quantité de molécules soluble (9 %)). Le soufre reste dans les 5 premiers pour toutes les années tandis que le potassium, lui, n'est plus dans le classement la dernière année (annexe 7). Le carbone et les molécules carbonées sont présentes pour toutes les années (annexe 7).

Quand nous enlevons les SFR 16, 08, ainsi que 02 et 03 (les traitements paysans) qui apportent moins de quantité de fertilisants que les autres, les éléments les plus impactant sur le rendement sont proches des résultats précédents (annexe 7). Le soufre est présent dans le classement des cinq variables les plus importantes pour les 4 années (annexe 7). De même, le carbone et ses différentes formes font partie des 5 variables contribuant le plus aux variations du rendement (annexe 7).

Les éléments chimiques et les rapports contribuent différemment à la variation du rendement, avec une prédominance de l'effet du carbone.

Effet des SFR sur la densité de macrofaune, de nématodes phytopathogènes, de coléoptères ravageurs et de vers de terre

Pour rappel, l'impact des pratiques fertilisantes sur les variables du sol a été étudié sur 3 années. Les ACP réalisées avec le jeu de données minimum sur le sol, indiquent que la variable « DTota », c'est-à-dire la densité de la macrofaune (ensemble des invertébrés visibles, mesurée avec la méthode TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility, voir explication dans la partie Matériel et Méthodes)) fait partie des variables qui participent de manière significative à la construction des axes 1 et 2 (Annexe 8). La plupart des variables du sol vont dans le même sens que la variable de densité de macrofaune (Annexe 8) donc c'est elle qui sera choisie comme représentant les variables de la santé du sol pour connaître l'impact des SFR sur celles-ci.

De même, la variable de la densité de coléoptères ravageurs (variable « Dpest ») mesurée, et la densité de nématodes phytoparasites (variable « NemaPest »), sont aussi des variables qui construisent soit l'axe 1 soit l'axe 2 des ACP (annexe 8). Elles seront également étudiées pour voir l'influence des traitements sur ces ravageurs et maladies qui peuvent affecter le riz.

La variable de densité de vers de terre (variable « DHapl ») construit aussi les axe 1 et/ou 2 des ACP et sera étudiée pour connaître l'impact des SFR sur ces organismes bénéfiques du sol.

Enfin, il est important de noter que, quand la variable 'rendement' est ajouté à l'ACP comme variable quantitative supplémentaire, elle est projetée proche de l'axe 1. Elle est donc corrélée aux variables du sol, notamment la densité totale de macrofaune (annexe 8).

La figure 11 montre l'effet des SFR sur la densité de la macrofaune. Pour l'année 2019-2020, cette densité a chuté sauf pour le SFR 02 (fumier traditionnel à 3 t/ha), le SFR 14 (2 t de fumier, 2 t de compost, 2 t de lombricompost et 500 kg de Hyperfos par hectare) qui augmente et le SFR 13 (2 t de fumier, 2 t de compost, 2 t de lombricompost et 500 kg de guano par hectare) qui reste constant (figure 11). La dernière année, la plupart des SFR montrent une augmentation des densités moyennes de macrofaune par rapport à l'année précédente, sauf le SFR 13 et le SFR 04 (figure 11). Le SFR 16 (sans fertilisation) donne des densités presque nulles les deux dernières années (4 ind/m²) (figure 11). Le SFR 04 (apport de 6 t de fumier traditionnel) révèle une densité qui diminue sur les 3 ans (- 60 %) (figure 11). Le SFR 05 (apport de 6 t de fumier amélioré) diminue légèrement entre la première année et la deuxième (de 130 à 100 ind/m²) et augmente la dernière (jusqu'à 325 ind/m²). Le SFR 11 (apport de 6 t de fumier et 500 kg de Hyperfos) montre une densité d'invertébrés qui chute entre l'année 1 et 2 (de < 400 ind/m² à 100 ind/m²) et qui augmente pour atteindre 150 ind/m² la dernière année. Le SFR 08 (témoin positif, fertilisation chimique) montre une faible variation de la densité de macrofaune (environ 100 ind/m² la première année, 75 ind/m² la deuxième année et 100 ind/m² la dernière année). Voici la moyenne sur les 3 ans des densités de macrofaune selon les SFR : SFR02 : 73.33 / SFR03 : 156.00 / SFR04 : 206.67 / SFR05 : 185.33 / SFR06 : 122.67 / **SFR07 : 237.33** / SFR08 : 49.42 / SFR09 : 233.33 / SFR10 : 186.67 / SFR11 : 221.33 / SFR12 : 232.00 / SFR13 : 144.00 / SFR14 : 204.00 / SFR15 : 228.00 / SFR16 : 22.67. C'est donc le SFR 07 qui révèle la plus grande densité de macrofaune puis le SFR9, SFR12, SFR15, SFR11.

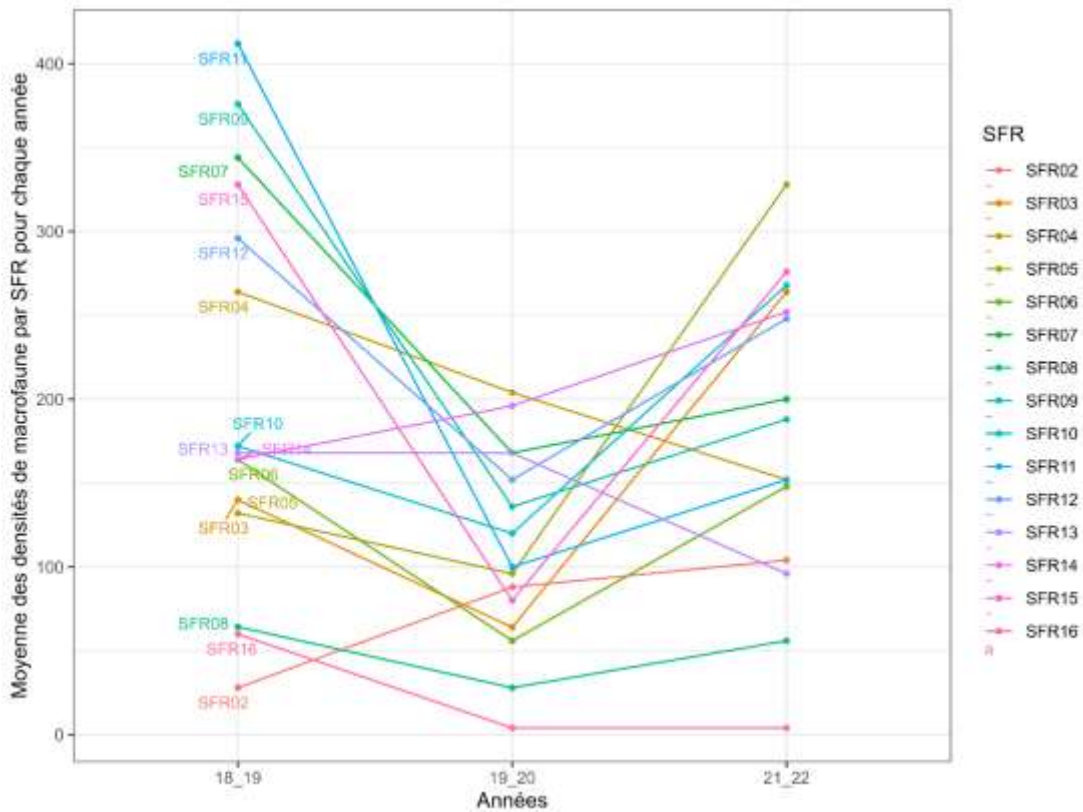


Figure 11 : Evolution des densités de macrofaune en nombre d'individus par m² mesurées avec la méthode TSBF (voir Matériel et Méthodes) pour 3 années de culture (2018 à 2022) selon les différents SFR

La figure 12 montre l'effet des traitements au terme de 5 ans de culture (soit sur la dernière année 2021-2022) sur la densité de nématodes phytoparasites. Un test d'ANOVA à un facteur pour voir l'effet des SFR sur cette densité révèle qu'il n'y a pas de différence significative cette année-là ($p\text{-value} = 0,0816 > 0,05$). La figure 12 montre que le SFR 16 et le SFR 08 présentent une très faible densité de nématodes phytoparasites après 5 ans de culture (respectivement 108,05 et 759,48 ind/kg de sol). Le SFR ayant la plus grande densité est le SFR 15 (apport d'un mélange de compost, fumier, lombricompost et guano) avec 4406,69 ind/kg. Le SFR 07 (apport de lombricompost) est proche de la valeur du SFR 15 avec 4326,57 ind/kg.

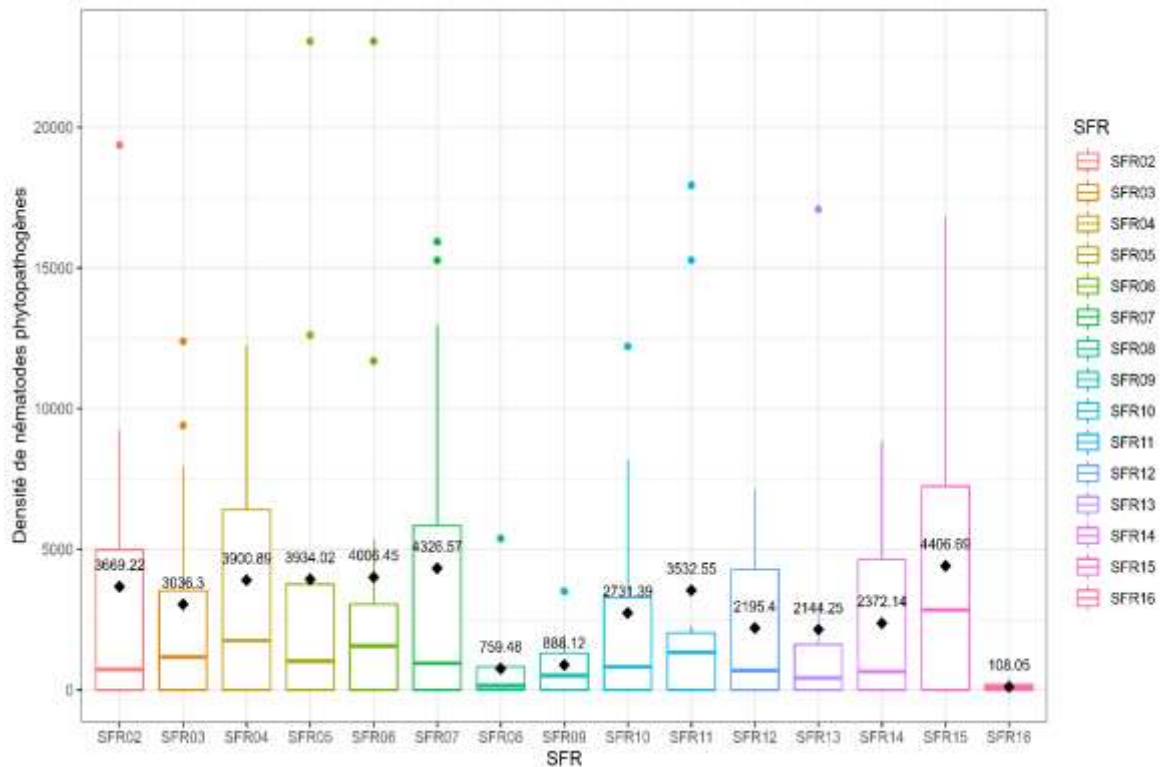


Figure 12 : Densité de nématodes phytoparasites (en g/m²) pour l'année 2021-2022. (ANOVA 1 facteur, p-value = 0,0816. Les barres horizontales représentent la médiane, les barres verticales représentent l'étendue des données non atypiques (n=16), le losange noir représente la moyenne. Les caractéristiques des diverses SFR sont indiquées dans le tableau 3.

La figure 13 montre l'effet des différents traitements au terme de 5 ans de culture sur la densité de coléoptères ravageurs. Une ANOVA à un facteur montre qu'il n'y a pas d'effet significatif des SFR sur la densité de coléoptères ravageurs sur la dernière année (p-value = 0,13 > 0,05). Comme pour la présence de nématodes, les SFR 16 et 08 ne révèlent presque pas de densité (avec respectivement 0 et 4 ind/m²). Les SFR 04 et 10 révèlent également une faible densité de coléoptères ravageurs (4 ind/m²). Ici encore c'est le SFR 15 qui montre la plus grande densité de coléoptères (72 ind/m²). Les SFR 02, 06, 07, 11 et 14 montrent la même densité de coléoptères avec 24 ind/m².

La figure 14 montre l'effet des SFR au terme de 5 ans de culture sur la densité de vers de terre. Une ANOVA à un facteur qui teste l'effet des SFR sur la densité de vers de terre montre qu'il n'y a pas d'effet significatif des traitements sur la variable (p-value = 0,1106 > 0,05). Les SFR 16 et 08 sont ceux qui présentent les plus faibles densités de vers de terre avec respectivement 0 et 8 ind/m². Le SFR 14 est celui qui en révèle le plus avec 136 individus par mètre carré.

Ainsi, les SFR 16 et 08 (témoin négatif et témoin positif) sont ceux qui ont révélé les plus petites quantités d'organismes du sol.

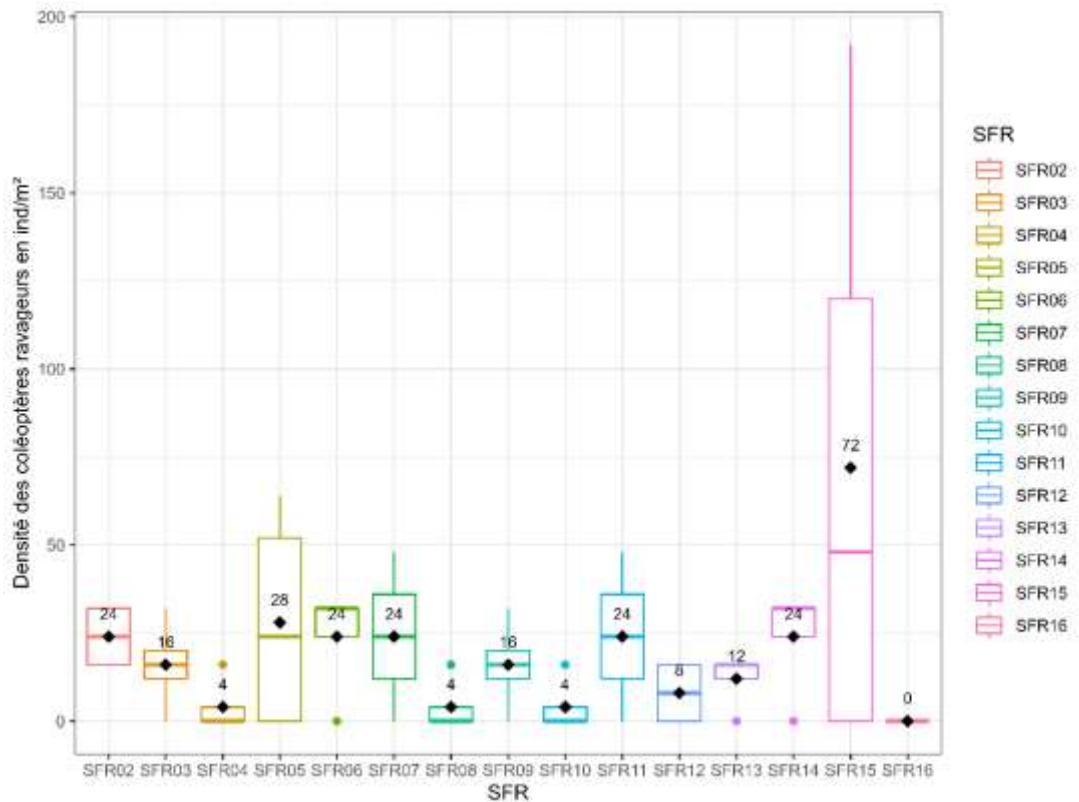


Figure 13 : Densité de coléoptères ravageurs (en nombre d'individus par m²) pour l'année 2021-2022. (ANOVA 1 facteur, p-value = 0,1106. Les barres horizontales représentent la médiane, les barres verticales représentent l'étendue des données non atypique (n=16), le losange noir représente la moyenne. Les caractéristiques des diverses SFR sont indiquées dans le tableau 3.

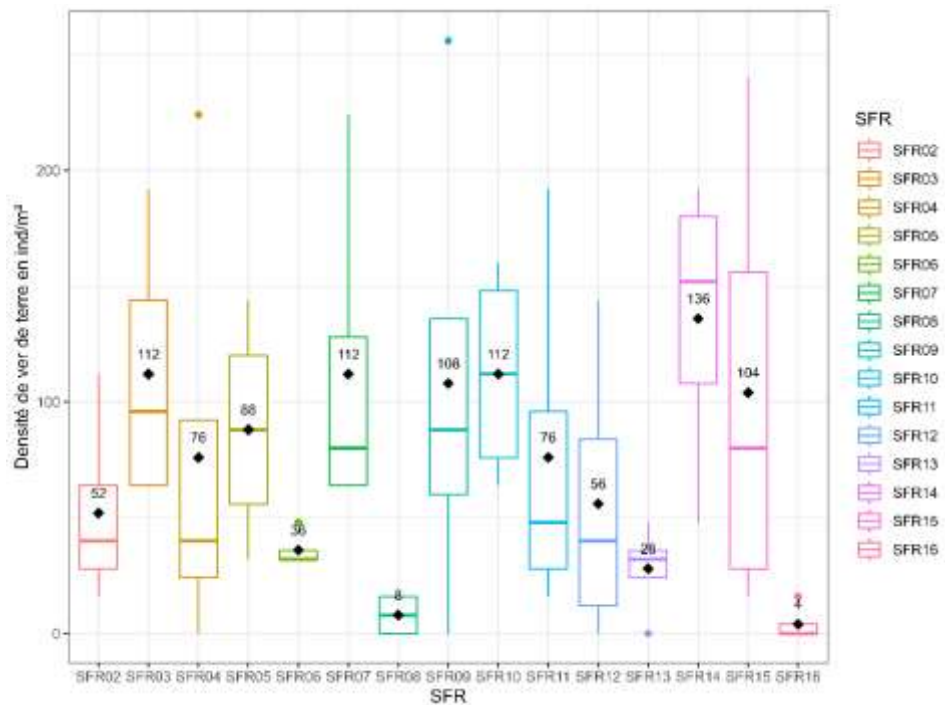


Figure 14 : Densité de vers de terre (en nombre d'individus par m²) pour l'année 2021-2022. (ANOVA 1 facteur, p-value = 0,13. Les barres horizontales représentent la médiane, les barres verticales représentent l'étendue des données non atypique (n=16), le losange noir représente la moyenne. Les caractéristiques des diverses SFR sont indiquées dans le tableau 3.

Effet des éléments chimiques contenus dans les fertilisants apportés sur la densité de macrofaune totale, la densité de coléoptères ravageurs et la biomasse de nématodes phytopathogènes

Le test RF permet de connaître l'influence des éléments chimiques présents dans les fertilisants sur la densité de macrofaune.

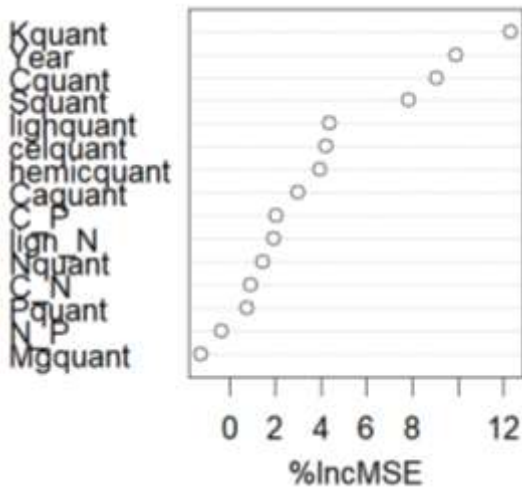


Figure 15 : Pourcentage de l'importance dans la variabilité de la densité de macrofaune des différents éléments chimiques et certains rapports et de l'année dans un modèle de Random Forest construit avec tous les SFR et les 3 dernières années. Les variables sont décrites dans la figure 11

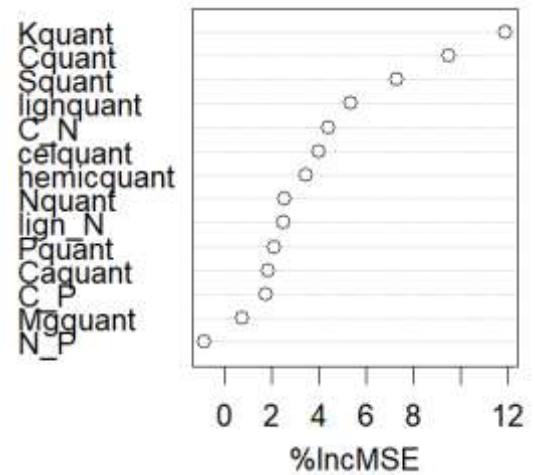


Figure 16 : Pourcentage de l'importance dans la variabilité de densité de macrofaune des différents éléments chimiques et certains rapports sans l'année dans un modèle de Random Forest construit avec tous les SFR et les 3 dernières années. Les variables sont décrites dans la figure 11

Les figures 15 et 16 montrent le pourcentage de modification de l'erreur de prédiction de la variable « densité de macrofaune » par le modèle quand les variables explicatives sont permutées (celles présentées sur la gauche du graphique). Plus le pourcentage est élevé et plus les variables explicatives vont être considérées comme exerçant une influence importante sur la densité de macrofaune. Sur la figure 15, l'année est incluse dans le modèle et est la deuxième variable la plus importante (10 %) après le potassium (12 %), l'année est donc un facteur important pour déterminer la densité de macrofaune mais il n'est pas aussi influent que sur le rendement (figure 8). Les éléments chimiques des fertilisants contribuant le plus à expliquer la densité de macrofaune quand l'année est enlevée du modèle sont : le potassium (12 %), le carbone (10 %) et le soufre (8 %) (figure 16). Dans l'annexe 9, quand le témoin négatif (SFR 16 sans fertilisant) est enlevé du jeu de données pour étudier l'influence des traitements avec des apports sur la densité de macrofaune, les éléments les plus importants changent par rapport à un modèle dans lequel il est présent. Le magnésium n'est plus dans les 5 éléments avec la plus grande contribution à la densité de macrofaune tandis que les quantités de carbone et de potassium sont présentes les 3 années. Quand les SFR 16 et 08 (les deux témoins) sont retirés, les résultats sont similaires au modèle sans les SFR paysans (SFR 02 et 03) à 3 t/ha (annexe 9.1 et 9.2) puisque ce sont les 5 mêmes éléments chimiques qui sont présents sur les 3 ans (le K, le N, le S, la lignine et les éléments solubles, voir annexe 9). Toutefois, l'ordre généré par RF est différent : la quantité d'éléments solubles des traitements et le potassium sont plus importants (annexe 9.3).

Le test RF permet de voir l'influence des éléments chimiques présents dans les fertilisants sur les nématodes phytoparasites.

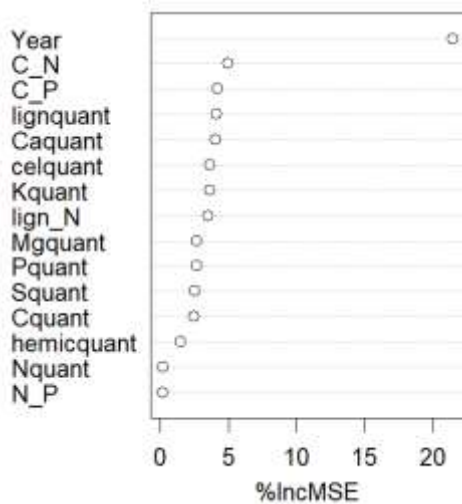


Figure 17 : Pourcentage de l'importance dans la variabilité de biomasse de nématodes phytopathogènes des différents éléments chimiques et certains rapports et de l'année dans un modèle de Random Forest construit avec tous les SFR et avec les années 18-19 et 21-22. Les variables sont décrites dans la figure 11.

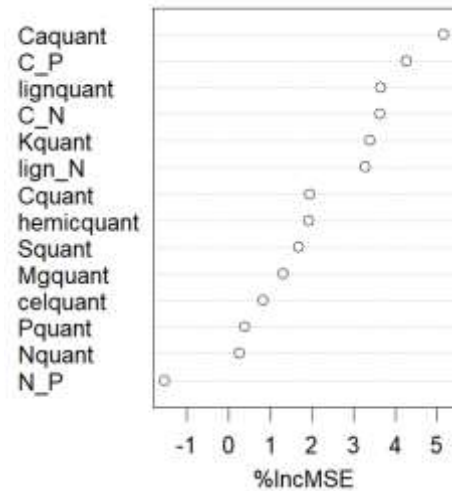


Figure 18 : Pourcentage de l'importance dans la variabilité de biomasse de nématodes phytopathogènes des différents éléments chimiques et certains rapports et sans l'année dans un modèle de Random Forest construit avec tous les SFR et avec les années 18-19 et 21-22. Les variables sont décrites dans la figure 11.

La figure 17 montre que l'année a une très forte importance pour la biomasse de nématodes phytoparasites (22 % IncMSE). Les éléments chimiques, eux, ont des importances allant de -1 % pour le rapport azote/phosphore (N_P) à 6 % pour le calcium (Caquant) (figure 18). La suite des analyses avec le modèle RF a été faite sans l'année pour mieux voir les effets des éléments chimiques.

Le figure 19 nous montre quels sont les 5 éléments principaux qui influencent la densité de nématodes phytoparasites pour les cycles de culture des années 2018-2019 et 2021-2022. Le soufre est un élément commun dans les deux classements des 5 variables participant le plus à cette densité sur les deux cycles de culture. L'azote est présent sous 2 formes de variable la première année (quantité d'azote et le rapport N/P) et la dernière année sous la forme du rapport carbone/azote. De même l'élément carbone est présent la première année sous forme de cellulose et d'hémicellulose et la seconde année sous forme des rapports carbone/phosphore et carbone/azote.

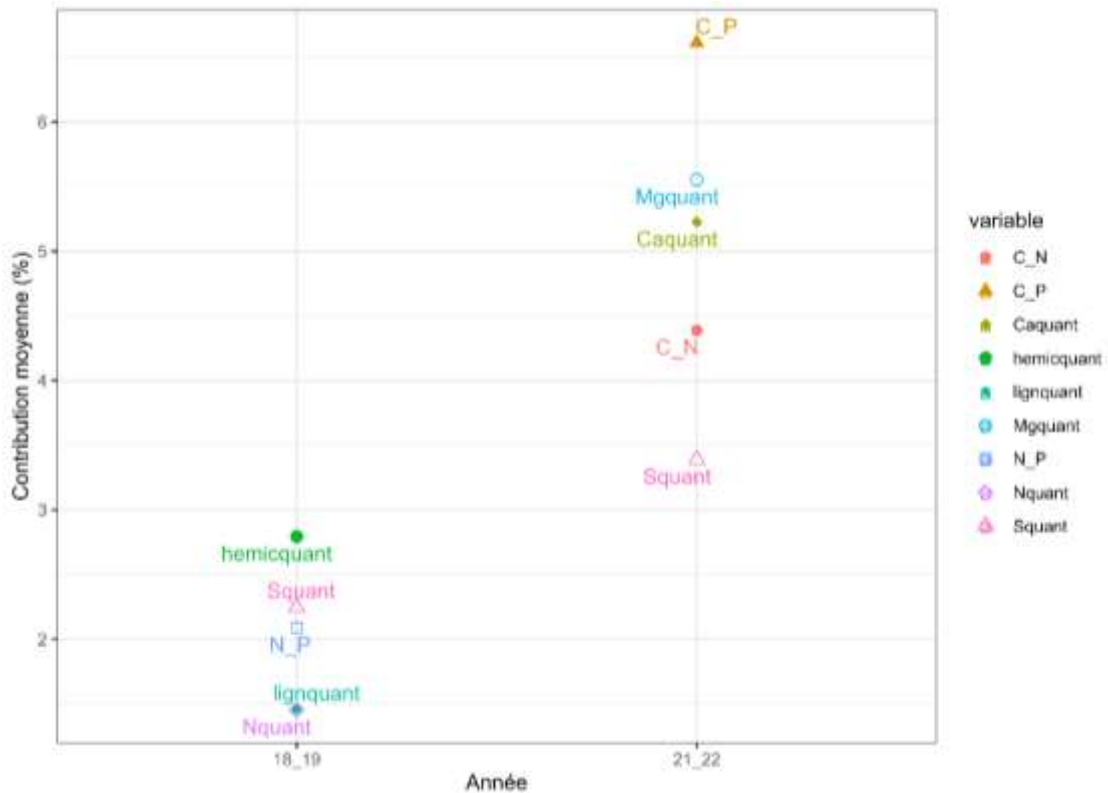


Figure 19 : Représentation des résultats des cinq variables (éléments chimiques ou ratio) ayant montré la contribution relative (%) la plus élevée à la densité de nématodes phytoparasites pour les années 2018-2019 et 2021-2022. Résultats issus d'un test RF, avec un set.seed = 140 et 500 arbres, sur tous les SFR.

Le test RF suivant permet de voir l'influence des éléments chimiques présents dans les fertilisants sur les coléoptères ravageurs (figure 20 et 21).

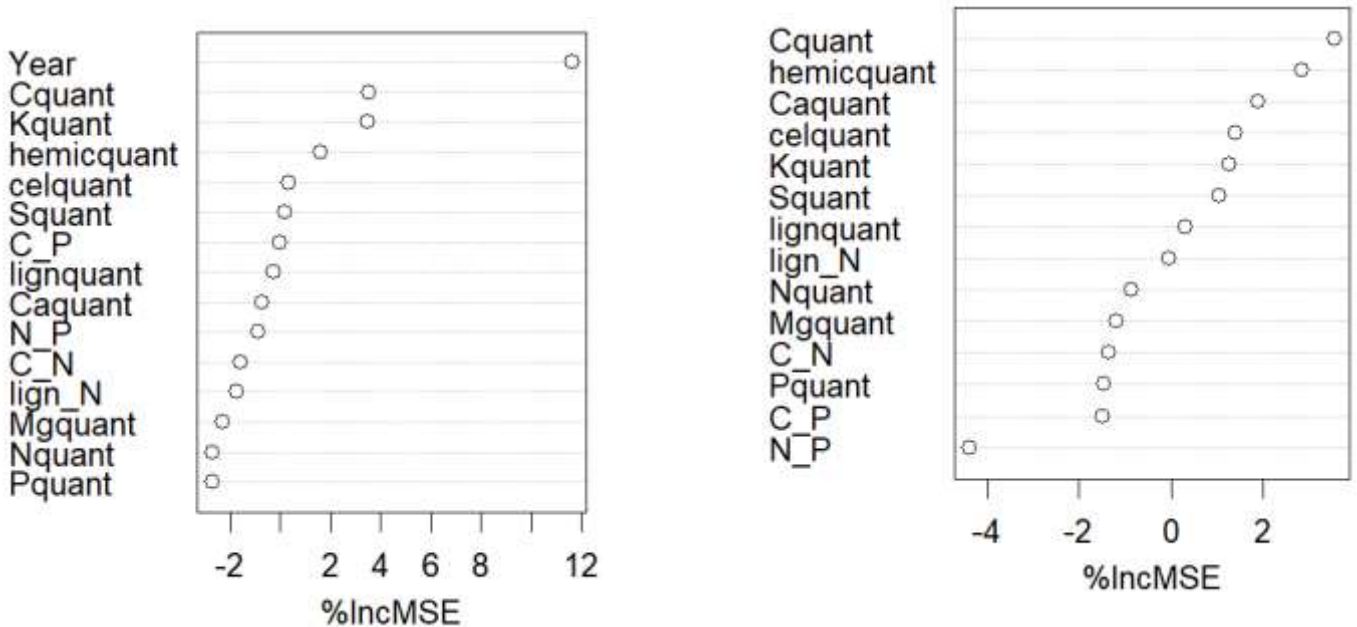


Figure 20 : Pourcentage de l'importance dans la variabilité de la densité de coléoptères ravageurs des différents éléments chimiques et certains rapports et de l'année dans un modèle de Random Forest construit avec tous les SFR et les 3 dernières années. Les variables sont décrites dans la figure

Figure 21 : Pourcentage de l'importance dans la variabilité de la densité de coléoptères ravageurs des différents éléments chimiques et certains rapports sans l'année dans un modèle de Random Forest construit avec tous les SFR et les 3 dernières années. Les variables sont décrites dans la figure 11.

La figure 20 montre que l'année est l'élément qui influence le plus la densité de coléoptères ravageurs (12 % d'IncMSE). Pour voir l'effet des éléments chimiques, l'année n'est pas utilisée dans les autres modèles. Ainsi, sur la figure 21, les éléments présents dans les fertilisants qui ont la plus grande importance dans la densité de coléoptères ravageurs sont le carbone (4 %), l'hémicellulose (3 %), le calcium (2 %), la cellulose, le potassium et le soufre (entre 1 et 2 %).

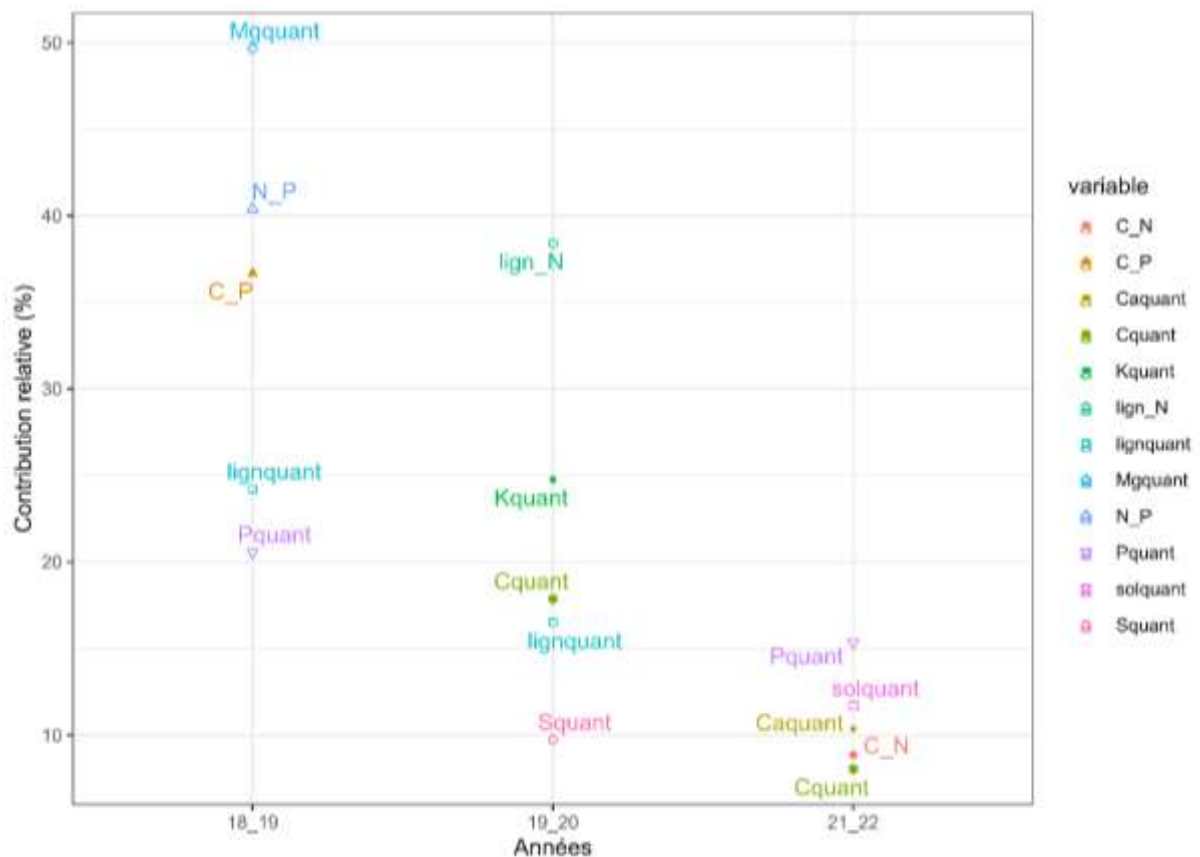


Figure 22 : Représentation des résultats des cinq variables (éléments chimiques ou ratio) ayant montré la contribution relative (%) la plus élevée à la densité de coléoptères ravageurs pour les années 2018-2019, 2019-2020 et 2021-2022. Résultats issus d'un test RF, avec un set.seed = 140 et 500 arbres, sur tous les SFR.

La figure 22 révèle les 5 éléments principaux influençant la densité de coléoptères ravageurs pour chacune des 3 dernières années. Les éléments cités précédemment sont retrouvés ici et le magnésium est également un élément important la première année ainsi que le phosphore pour la première et la dernière année.

V) Discussion

Effet du traitement témoin négatif : absence de fertilisation (SFR 16)

Le témoin négatif montre des résultats très clairs : les rendements sont nuls et la vie du sol est extrêmement pauvre. Cette incapacité des plantes à obtenir les éléments minéraux nécessaires à leurs nutriments provient du fait que les Ferralsols sont anciens donc très carencés. Selon la théorie du développement des écosystèmes d'Odum, ces sols naturellement pauvres sont à l'opposé des sols à fort potentiel productif avec des cycles chimiques presque fermés et sans libération de minéraux (Trap & Blanchart, 2023). Pour pouvoir améliorer la productivité, il est nécessaire de bouleverser l'équilibre des cycles et des réseaux trophiques pour augmenter la disponibilité des

éléments minéraux. L'une des possibilités pour y parvenir est l'ajout de matières fertilisantes qui vont être une source d'énergie pour les éléments du système.

Effet du traitement témoin positif : fertilisation minérale (SFR 08)

Le témoin positif est un type de fertilisation qui pourrait suffire, en théorie, pour rendre le système plus productif mais ce n'est pas le cas. Le SFR 08 permet d'obtenir un rendement la première année mais uniquement celle-ci. Dans ce traitement, les éléments minéraux apportés (N, P, K) le sont sous une forme directement assimilable pour la plante mais peu stable (le phosphore va être rapidement fixé sur les oxydes, l'azote peut être lessivé ou volatilisé). Il faut que la plante soit capable d'assimiler ces éléments rapidement après leurs applications. Cette capacité de la plante à assimiler les éléments chimiques apportés repose sur l'hypothèse qu'aucun autre élément n'est limitant pour l'utilisation desdits éléments chimiques (*Janssen et al., 1990*). Or, en regardant les résultats des rendements des années suivantes, il est évident que les multi-déficiences des Ferralsols limitent l'absorption du N, du P et du K avec notamment la faible disponibilité du carbone du sol. Cette fertilisation n'est pas utilisable par la culture autrement que la première année quand elle exploite les faibles ressources du sol qui ne sont pas renouvelées. La libération d'éléments minéraux dans le sol sous une forme exploitable par la plante est réalisée par les métabolismes des organismes du sol. Si les minéraux ne sont pas libérés dans le sol, cela indique probablement que les micro-organismes du sol n'ont pas non plus pu utiliser cet apport de fertilisants pour leurs propres cycles de vie. De plus, la fertilisation chimique est connue pour acidifier les sols (*Mazur et al., 2016*) ce qui favorise la fixation du phosphore sur les oxydes du sol et la toxicité aluminique déjà présente. Cette méthode de fertilisation n'est donc bénéfique ni pour la plante ni pour les écosystèmes dont la plante dépend.

Effet des traitements organiques à 3 tonnes (SFR 02 et SFR 03)

Ces traitements révèlent des rendements très faibles voir les plus faibles après le SFR 08. Ceci peut s'expliquer par les moindres quantités d'éléments minéraux apportés par le fumier qui sont les plus faibles parmi les 15 traitements. Le résultat des tests RF qui montre que les éléments carbonés sont les principales molécules qui influencent le rendement, or ces deux traitements présentent les deux plus faibles teneurs en carbone donc ceci peut expliquer leurs rendements inférieurs. Le SFR 03 donne de meilleurs rendements que le SFR 02 probablement en raison d'un apport additionnel de NPK (40 kg/ha) dans le SFR 03. Ainsi, l'ajout d'éléments minéraux au fumier permet une meilleure production de la plante.

Concernant les variables de sols, aucun effet n'est significatif. Toutefois, les deux SFR paysans figurent parmi les SFR présentant la plus petite densité de macrofaune. La stimulation des organismes du sol est directement reliée à la quantité de MO apportée : plus l'apport est important, plus la macrofaune du sol se développe. En revanche, pour les nématodes phytoparasites et les coléoptères ravageurs, cette relation n'est pas applicable puisque ces deux traitements présentent les mêmes densités que les autres. Le SFR 03 montre une densité de vers de terre très supérieure à celle du SFR 02 montrant que cette fertilisation est propice à leur survie. Leur nombre peut s'expliquer par la position du SFR 03 proche d'un des traitements ayant reçu un traitement avec des vers de terre lors d'une expérimentation parallèle à celle du projet.

Effet des traitements organiques seuls à 6 tonnes (SFR 04, 05, 06, 07)

En comparant les traitements qui apportent des matières seules entre eux, le SFR 07 (lombricompost) est celui qui donne les meilleurs rendements en riz deux années sur quatre. Ces résultats se retrouvent dans un essai de fertilisation de maïs au Nord Vietnam qui compare l'effet de fumier de buffle, de compost, de lombricompost, de biochar et de biochar associé au lombricompost (Doan et al., 2015). Dans cette étude, le lombricompost permet d'obtenir des rendements significativement plus hauts en cas de sécheresse par une meilleure disponibilité des nutriments et de l'eau (Doan et al., 2015). La troisième année, presque tous les SFR ont un rendement qui diminue surtout ceux à base de fumier, dont le SFR 04. La forte diminution des rendements des traitements à base de fumier peut s'expliquer par le fait que la qualité du fumier a varié. En 2019-2020, le fournisseur n'avait pas assez de fumier pour approvisionner l'essai, le fumier utilisé en échange étant de moins bonne qualité que celui de l'année précédente, cette différence semble se refléter dans les résultats des rendements. Cette variabilité des matières peut se retrouver également pour le compost qui dépend beaucoup de la qualité des matières premières et du temps de maturation (Faverial, 2016). C'est donc une caractéristique à considérer pour le choix des amendements. Le SFR 05 bien qu'étant un fumier amélioré donc normalement plus riche en nutriments donne des rendements plus faibles que le fumier traditionnel, ce qui montre aussi que la méthode de gestion du fumier est primordiale pour qu'il soit de bonne qualité. Le SFR 06 (compost) quant à lui donne des rendements moins importants que les fumiers sur les trois premières années. L'apport de carbone est moins important dans ce traitement ainsi que l'apport de potassium, or ce sont des molécules qui influencent fortement le rendement d'après les tests statistiques. Cela pourrait expliquer les rendements plus faibles. Parmi les fertilisants avec un élément seul, le SFR 07 et le SFR 04 présentent les meilleurs rendements sur trois des quatre années, potentiellement grâce à un meilleur équilibre des éléments chimiques apportés.

L'effet de ces 4 traitements sur les variables du sol est différent pour chacun. Les densités de macrofaune, de nématodes phytoparasites et de vers de terre supérieures dans le SFR 07 sont potentiellement dues à des apports en carbone et en éléments minéraux en plus grande quantité. Cela crée un environnement où les éléments principaux nécessaires à la réalisation des cycles de vie desdits organismes sont disponibles en grande quantité. Comme les SFR 04 et 05 montrent des résultats de densité de nématodes et de vers de terre similaires et assez hauts pour les nématodes, la qualité du fumier ne semble pas avoir d'influence sur ces paramètres. Le SFR 06 montre une densité de vers de terre inférieure aux trois autres SFR mais une quantité supérieure de nématodes phytoparasites par rapport aux SFR 04 et 05. Le développement des nématodes ne semble donc pas être sensible aux différents traitements.

Effet du fumier en mélange avec des éléments minéraux (SFR 09, 10 et 11)

Rappelons ici que ces traitements apportent du fumier en même quantité que le SFR 04 mais apportent également une matière minérale. Le traitement de fumier + cendres (SFR 10) est le seul des trois traitements qui permet un meilleur rendement que le traitement avec du fumier seul (SFR 04). La cendre par ses caractéristiques chimiques remonte le pH du sol et cela permet une libération des éléments minéraux présents dans le sol, comme le phosphore et empêche une fixation de ceux qui sont apportés par la fertilisation. Par conséquent, la culture bénéficie d'une meilleure nutrition. Ainsi,

la dolomie et l'Hyperfos ne sont pas aussi efficaces que la cendre pour améliorer les rendements, plus que ne le fait le fumier seul.

Pour ce qui est de l'influence sur les variables du sol, les éléments minéraux ajoutés par la fertilisation chimique ne semblent pas explicatifs des densités mesurées. Les vers de terre sont toutefois plus présents dans les deux traitements qui permettent de remonter le pH (SFR 09 et SFR 10) (Majeau et al., 2013). Ce changement rend l'environnement propice au développement des vers de terre (USDA, 2009). (USDA, 2009). Le traitement avec les cendres ne présente presque pas de coléoptères ravageurs, ce qui est connu des agriculteurs des Hautes Terres. Cet effet répulsif a été démontré dans d'autres études (Ka et al., 2018).

Effet des traitements en mélange de matières organiques avec des éléments minéraux (SFR 12, 13, 14 et 15)

Ces traitements apportent un mélange de fumier + lombricompost + compost, seul (SFR 12) ou accompagné d'une matière minérale. En moyenne sur les 4 années étudiées, ces traitements en mélange donnent les mêmes rendements que les SFR sans mélange. L'absence de différence entre les mélanges de MO avec MM et les matières seules s'explique par la diversité des éléments chimiques déjà présents au sein des MO seules. Ce résultat est différent de ce qui a été montré au Congo sur des sols acides dans lequel les MO en mélange avaient permis une augmentation de la production de pastèques (Bosela et al., 2022). Ces résultats sont peut-être influencés par la qualité du fumier qui a diminué au cours de l'essai. Les SFR 13, 14 et 15 ont des rendements plus élevés que les SFR 12 donc l'ajout de MM influence les rendements quand les MO sont mélangées avec notamment le SFR 15 (MO + guano) qui donne le deuxième meilleur rendement sur l'ensemble des traitements.

Le SFR 15 est celui qui révèle aussi la plus grande densité d'organismes du sol qu'ils soient considérés comme bénéfiques (vers de terre) ou nuisibles (nématodes, coléoptères). Cette forte présence des organismes du sol peut s'expliquer par les grandes quantités de soufre, de phosphore, de calcium apportées par le guano qui sont des éléments chimiques influençant ces variables en plus du carbone. Le SFR 13 (avec cendres) est celui qui montre le moins de nématodes, de vers de terre et très peu de coléoptères (mais plus que le SFR 12). L'effet des cendres sur les coléoptères se retrouve de nouveau dans ce SFR, comme dans le SFR 10, indépendamment de la MO avec laquelle ils sont mélangés. Le SFR 14 (avec Hyperfos) présente une plus grande densité de ces organismes que le SFR 12. Ici, la stimulation des fonctions écologiques du sol est reliée au rendement par la création d'un environnement propice aux métabolismes des organismes du sol et des plantes grâce aux apports de MO et de MM.

Effet des molécules carbonées

Cette étude montre l'importance de l'apport de matières organiques (à base de carbone) pour l'ensemble des fonctions du sol et la réalisation des services bénéfiques à l'Homme. Nos résultats montrent que cette fertilisation organique est nécessaire pour nourrir à la fois la plante (croissance et rendement) et le sol (diversité d'organismes). Sans apports de ces molécules carbonées, la fertilisation minérale n'est pas efficace et même contre-productive puisqu'elle dégrade encore plus le milieu. Dans le sol, la matière organique est fondamentale car elle permet **(i) d'augmenter la**

capacité d'échange cationique du sol (CEC) (Mazur et al., 2016), (ii) de remonter le pH (Koulibaly et al., 2015), (iii) de préserver la stabilité de la structure du sol et (iv) de stimuler l'activité des microorganismes du sol (Kramer & Gleixner, 2006). Ce sont des processus qui vont tous permettre une plus grande disponibilité des éléments chimiques pour les plantes d'où l'importance des matières organiques, carbonées, pour l'augmentation du rendement du riz. Rappelons ici que le carbone apparaît comme l'élément le plus limitant pour les organismes du sol dans ces sols particulièrement contraints (Trap et al., 2024b) et que la santé du sol dépend de ces apports.

Effet du phosphore

Dans l'article de Raminoarison (2020) sur les multi-déficiences des Ferralsols, le phosphore est l'un des éléments principaux qui limitent le développement du riz. Cette importance du phosphore est également montrée sur la culture du riz en Côte d'Ivoire (Koné et al., 2010). Ces deux articles montrent un effet significatif de l'ajout de P dans l'augmentation des rendements mais toujours dans des conditions adaptées aux contraintes du milieu. Ici les SFR apportant le plus de P sont dans l'ordre décroissant : le SFR 14, 15, 11, 06, 13, 07, 12. Dans ce classement se retrouvent les SFR 07, 15, 13, 14 qui sont certains des SFR donnant les meilleurs rendements. Ainsi, ce résultat appuie les observations des articles précédents bien que le phosphore n'apparaisse pas dans cette expérience comme l'élément le mieux corrélé au rendement ou à la biodiversité du sol. Ceci ramène à la forme sous laquelle le P est apporté et va se minéraliser au niveau du sol.

Relation entre fonctions écologiques du sol et performances agronomiques

Dans notre étude, les performances agronomiques du riz sont évaluées par la variable 'rendement'. Ce choix de variable est un choix courant (Bouet et al., 2015; Yacouba et al., 2013). Pour évaluer la réalisation des fonctions écologiques du sol, les variables sélectionnées sont des variables de densité de macrofaune (coléoptères, vers de terre et macrofaune totale) et de microfaune (nématodes). Ces choix sont également courants car la densité de ces organismes est révélatrice d'un écosystème propice à leur développement. En effet, leur densité et leur diversité vont varier en fonction de différents paramètres comme la couverture du sol, son humidité, son pH (Mathieu, 2004) ; donc, la modification du milieu pourra être appréciée indirectement. Ils sont également acteurs de la modification du milieu avec une influence différente selon leur taille : la macrofaune peut modifier les propriétés physiques du sol tandis que la microfaune modifie les propriétés chimiques de celui-ci (Lavelle et al., 1990). Bien que cette classification des fonctions écologiques selon le critère de taille soit remise en question (Hedde, 2018), l'effet de la macrofaune et microfaune du sol sur l'ensemble de ces propriétés physico-chimiques et structurales est largement démontré (Lavelle et al., 2006).

Pour nos données, après 5 ans de culture, les traitements ne donnent pas de différences significatives sur les variables du sol, résultat trouvé également lors d'une comparaison de 4 pratiques agroécologiques sur des lxisols ferriques au Burkina Faso (B. Béatrice et al., 2022). Ceci se doit potentiellement au petit nombre de répétitions donc à la faible puissance statistique qu'il y a dans ce jeu de données et aussi à la forte variabilité des communautés biologiques de sol qui sont sensibles aux

changements de culture, de pratique, de fertilisation, etc (Aubert et al., 2005; Mathieu, 2004; Rakotomanga et al., 2016). Cependant, il y a des différences significatives sur les rendements. Deux hypothèses sont alors envisageables : soit une faible intensification des fonctions du sol permet déjà un impact sur les performances agronomiques de la culture, soit les différents traitements, par les apports de minéraux qu'ils fournissent permettent une amélioration du rendement indépendamment de la restauration des fonctions écologiques du sol. Pour étudier ces deux possibilités, il est à noter que les SFR qui montrent parmi les plus fortes densités des variables du sol sont aussi ceux qui donnent les meilleurs rendements (le SFR 07, apport de lombricompost et le SFR 15, mélange de MO et guano). Ce lien est plus visible avec la variable de densité macrofaune qu'avec les autres variables du sol. Ainsi, il est légitime de voir dans cette corrélation une relation de cause à effet. La question qui demeure est la part d'amélioration du rendement due à la stimulation des fonctions écologiques du sol et la part due aux apports de fertilisants.

Variabilité interannuelle des résultats

L'année est un facteur qui a influencé les résultats de cette étude. Les résultats de rendement pour un même traitement sont très différents d'une année sur l'autre. La grande variabilité des résultats pour un même traitement peut s'expliquer, entre autres, par la différence de qualité des produits utilisés. Dans cette étude, le choix a été fait d'utiliser la moyenne des quantités d'éléments chimiques présents dans les matières apportées. Or, il existe des différences annuelles. Ainsi, pour les traitements avec du fumier pur (SFR 04 qui donne le meilleur rendement la deuxième année) ou en mélange, les rendements diminuent beaucoup l'année suivante car l'approvisionnement a été fait auprès d'un autre producteur de fumier. Cette variabilité de la matière apportée se retrouve pour l'ensemble des matières (le compost, le lombricompost, le fumier traditionnel et amélioré) puisque l'objectif était de tester les produits disponibles à la vente pour les agriculteurs. De même, les valeurs du guano ont varié d'une année sur l'autre.

Cette variabilité peut aussi s'expliquer par un facteur climatique. La culture du riz n'étant pas irriguée, elle dépend fortement des conditions climatiques qui sont variables d'une année sur l'autre. De même, les communautés microbiennes des sols sont dépendantes des conditions climatiques ainsi, les conditions climatiques affectent à la fois les plantes et les fonctions écologiques du sol.

Les résultats obtenus lors de cette analyse ne diffèrent pas beaucoup de ceux obtenus par l'analyse de Damoiseaux en 2020. Cette étude préliminaire, analysant les résultats de cet essai uniquement pour l'année 2018-2019, avait permis de classer les traitements ou SFR selon leur performance agronomique, écologique et la perception qu'en avaient les paysans. Selon cette première étude, le SFR 15 (apports de fumier traditionnel, composts, lombricompost et guano, tableau 3) est celui qui permet d'atteindre les objectifs de performances agronomiques et écologiques mais il est relativement cher à mettre en place. Lors de notre analyse, le SFR 15 est également un des meilleurs traitements (le deuxième en termes de rendement et l'un de ceux qui stimulent le plus les fonctions écologiques du sol).

VI) Conclusions et perspectives

L'objectif de ce travail était de montrer si l'application de certaines matières fertilisantes permettait de restaurer les fonctions écologiques du sol tout en augmentant la production rizicole.

L'analyse des différents traitements appliqués sur des Ferralsols a montré que l'intensification des fonctions écologiques du sol et l'amélioration des rendements vont de pair : la performance agronomique (rendement, croissance du riz) est globalement bien corrélée avec la performance écologique du sol (biodiversité).

Bien que les résultats soient contrastés, on peut constater que le témoin considéré initialement comme positif montre un effet agronomique uniquement à court terme puisque les rendements chutent très rapidement et sont nuls à partir de la 3^e année de l'essai. Cette faible durabilité est probablement liée à l'absence de matière organique carbonée, qui contient les éléments indispensables pour la disponibilité des nutriments des plantes et le développement de la vie du sol.

Le témoin négatif, quant à lui, illustre parfaitement l'incapacité des Ferralsols à fournir les éléments nécessaires à la croissance des cultures s'il n'y a pas de fertilisation complémentaire.

Les traitements organiques ont mis en évidence l'importance de la quantité et de la qualité des apports. Globalement, les meilleurs résultats en termes de rendement et de stimulation des fonctions du sol ont été obtenus par des traitements dont les matières sont mélangées. Cependant, c'est le SFR 07 qui a donné les meilleurs rendements et impacte le plus les différentes variables mesurant la santé du sol. Les résultats sont très variables d'une année sur l'autre avec une forte dépendance aux conditions climatiques et à la qualité des matières employées.

Dans un souci de conseiller les agriculteurs, l'utilisation des cendres semble être un bon répulsif contre les coléoptères. Le lombricompost est un processus plus complexe à mettre en place car il nécessite des infrastructures mais il aura peut-être moins de variabilité intra-annuelle ce qui contribuera à la sécurisation des rendements.

Bibliographie

- AFD. (2020). *Améliorer la productivité agricole et promouvoir l'agro-écologie (PAPAM)-7782.pdf*.
- Andrianantoandro, V. T., & Bélières, J.-F. (2015). L'agriculture familiale malgache entre survie et développement : Organisation des activités, diversification et différenciation des ménages agricoles de la région des Hautes Terres. *Revue Tiers Monde*, 221(1), 69-88. <https://doi.org/10.3917/rtm.221.0069>
- Aubert, M., Hedde, M., Decaëns, T., Margerie, P., Alard, D., & Bureau, F. (2005). Facteurs contrôlant la variabilité spatiale de la macrofaune du sol dans une hêtraie pure et une hêtraie-charmaie. *Comptes Rendus Biologies*, 328(1), 57-74. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2004.10.008>
- B. Béatrice, S., Ouattara, B., Zomboudre, G., Traore, M., Vanek, S., Kabore, R., Diasso, C., Nacro, H., & Sedogo, M. (2022). Effets de pratiques agroécologiques sur la macrofaune dans les lixisols ferriques en zone Soudano-Sahélienne du Burkina Faso. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 36, 734-744.
- Banque Mondiale. (2021). *CountryProfile*. https://databank.worldbank.org/views/reports/reportwidget.aspx?Report_Name=CountryProfile&Id=b450fd57&tbar=y&dd=y&inf=n&zm=n&country=MDG
- Banque Mondiale. (2022). *World Bank Open Data*. World Bank Open Data. <https://data.worldbank.org>
- Bationo, A., Hartemink, A., Lungu, O., Naimi, M., Okoth, P., Smaling, E., & Thiombiano, L. (2006). *African Soils : Their Productivity and Profitability of Fertilizer Use*.
- Bender, S. F. (2016). *An Underground Revolution : Biodiversity and Soil Ecological Engineering for Agricultural Sustainability*.
- Blanchart, E. (s. d.). *Le projet SECuRE | SECuRE*. Consulté 11 mars 2024, à l'adresse <https://www.secure.mg/le-projet-secure>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.08.003>
- Blanchart, E., Razafimbelo, T., Audouin, S., Muller, B., & Razafimahatratra, M. (2021). *Intensification écologique de l'agriculture des Hautes Terres de Madagascar*.
- Blanchart, E., & Trap, J. (2020). Intensifier les fonctions écologiques du sol pour fournir durablement des services écosystémiques en agriculture. *Etude et Gestions des Sols*, 27, 121-134.
- Blanc-Pamard, C., & Rakoto-Ramiarantsoa, H. (2000). *Le terroir et son double : Tsarahonenana, 1966-1992, Madagascar*. IRD Editions.
- Blouin, M. (2018). Chemical communication_ An evidence for co-evolution between plants and soil organisms. *Applied Soil Ecology*.
- Bosela, O., Mabossy-Mobouna, G., Liundameligo, A., Bilengelenge, M., Ngendo, E., Elongo, G., & Okungo, A. (2022). *Utilisation d'amendements organiques locaux pour la production de pastèques (Citrullus lanatus var. Lanatus (Thunb.) Matsumura & Nakai) à Kisangani en R.D. Congo*.

- Bouet, A., Gbedie, N. A., Boka, A., & Kouassi, N. (2015). Evaluation des variétés de riz prometteuses pour la résistance à quelques contraintes biotiques majeures et pour leurs performances agronomiques en Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(4), 2041. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v9i4.27>
- Breumier, P. (2017). *Etude de cas: Riz pluvial d'altitude* (p. 177). https://agritrop.cirad.fr/583796/1/Rapport-Riz_RPA_IMPRESS.pdf
- CIRAD. (2021, juin 3). *Interactions des modèles agricoles: Vers une nouvelle vision du développement territorial*. CIRAD. <https://www.cirad.fr/les-actualites-du-cirad/actualites/2021/interactions-des-modeles-agricoles-et-developpement-territorial>
- Clermont-Dauphin, C., Blanchart, E., Loranger-Merciris, G., & Meynard, J.-M. (2013). *Cropping systems for soil biodiversity and ecosystem services: Prospects and research needs*.
- Corduant, S. (Réalisateur). (2018, mai 4). *Le système de riziculture intensif à Madagascar* [Enregistrement vidéo]. https://www.youtube.com/watch?v=X510JKyC_w
- Daniel Clarys, C. (2012). *La culture du riz pluvial*. http://www.conseil-agri.com/images/documents/CEFADHTECPV_12.PDF
- Doan, T. T., Henry-des-Tureaux, T., Rumpel, C., Janeau, J.-L., & Jouquet, P. (2015). Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Vietnam: A three year mesocosm experiment. *Science of The Total Environment*, 514, 147-154. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.005>
- Dobermann, A. (2007). *Fertilizer Best Management Practices General Principles, Strategy for their Adoption and Voluntary Initiatives vs Regulations*. <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2431&context=agronomyf&acpub>
- El Mujtar, V., Muñoz, N., Prack Mc Cormick, B., Pulleman, M., & Tiftonell, P. (2019). Role and management of soil biodiversity for food security and nutrition; where do we stand? *Global Food Security*, 20, 132-144. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.01.007>
- European Landowners' Organization, European Crop Protection Association, & Rifcon. (2010). *Soil Biodiversity and Agriculture*.
- FAO. (1997). *Systèmes améliorés de riziculture pluviale*. <https://www.fao.org/3/T0751F/To751f05.htm#TopOfPage>
- FAO. (2009). *Portail terminologique de la FAO*. <https://www.fao.org/faoterm/viewentry/fr/?entryId=99484>
- FAO. (2021). *L'État des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde—Des systèmes au bord de la rupture. Rapport de synthèse 2021*. <https://doi.org/10.4060/cb7654fr>
- Faverial, J. (2016). *Compostage et vermicompostage des effluents d'élevage*.
- Floch, F. (2024, juillet 4). *Madagascar: 22,5 € (108 250 Ar) est le salaire médian, plus de 50% des employés touchent moins*. Franceinfo. <https://la1ere.francetvinfo.fr/reunion/madagascar-22-5-108-250-ar-est-le-salaire-median-plus-de-50-des-employes-touchent-moins-1503044.html>

- FSP PARRUR. (2016). *La pyriculariose du riz* [Image]. <https://www.dp-spad.org/content/download/4304/32256/version/1/file/Piryculariose+A5+-+Recto+%281%29.pdf>
- Garruchet, V., Bosc, P.-M., & Mialet-Serra, I. (2023). *L'Agriculture à Madagascar : Évolution, chiffres clés et défis*.
- Gérard, F. (2016). Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils—A myth revisited. *Geoderma*, 262, 213-226. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.036>
- Hedde, M. (2018). Indicateurs basés sur la faune des sols : Des outils pour l'agriculture innovante ? *Innovations Agronomiques*, 69, 15-26. <https://doi.org/10.15454/J1HFAR>
- Insee. (2020). *Tableaux de l'économie française*. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4277596?sommaire=4318291>
- Insee. (2024). *L'essentiel sur... Les salaires* | Insee. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/7457170#onglet-1>
- Janssen, B. H., Guiking, F. C. T., van der Eijk, D., Smaling, E. M. A., Wolf, J., & van Reuler, H. (1990). A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma*, 46(4), 299-318. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(90\)90021-Z](https://doi.org/10.1016/0016-7061(90)90021-Z)
- JICA. (2020). *Etude sur le potentiel pour une meilleure production et distribution de la filière riz*. https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12357786_01.pdf
- Joyeux, C. (2014). *Striga asiatica, l'herbe aux sorcières en Afrique, « Arema » à Madagascar*. https://agritrop.cirad.fr/572986/1/document_572986.pdf
- Ka, A., Gueye, M. T., Diop, S. M., Cissokho, P. S., & Gueye, A. N. (2018). Etude de l'efficacité de la poudre et des cendres de balle de riz contre deux insectes ravageurs du riz stocké au Sénégal, *Sitophilus zeamais* (Motsch.) et *Tribolium castaneum* (Herbst). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12(4), 1731. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i4.17>
- Kibblewhite, M. G., Ritz, K., & Swift, M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 685-701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>
- Kienzle, J., & Njenga, B. (2022). *L'agriculture de conservation*.
- Kihara, J., Nziguheba, G., Zingore, S., Coulibaly, A., Esilaba, A., Kabambe, V., Njoroge, S., Palm, C., & Huisling, J. (2016). Understanding variability in crop response to fertilizer and amendments in sub-Saharan Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 229, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.05.012>
- Kochian, L. V., Piñeros, M. A., Liu, J., & Magalhaes, J. V. (2015). Plant Adaptation to Acid Soils : The Molecular Basis for Crop Aluminum Resistance. *Annual Review of Plant Biology*, 66(1), 571-598. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043014-114822>
- Koné, B., Yao-Kouamé, A., Sorho, F., Diatta, S., Sié, M., & Ogunbayo, A. (2010). Long-term effect of Mali phosphate rock on the grain yield of interspecifics and saltiva rice cultivars on acid soil in a humid forest zone of Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(3). <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v4i3.60451>

- Koulibaly, B., Traore, O., Dakuo, D., Lalsaga, R., Lompo, F., & Zombre, P. (2015). Acidification des sols ferrugineux et ferrallitiques dans les systèmes de production cotonnière au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8(6), 2879. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v8i6.44>
- Kramer, C., & Gleixner, G. (2006). Variable use of plant- and soil-derived carbon by microorganisms in agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(11), 3267-3278. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.04.006>
- Lardoux, J.-M. (2006). Madagascar, poids lourd démographique dans une poussière d'îles. *Economie de La Réunion*, 128, 32-33.
- Laurent, F. (2012). *Agriculture et pollution de l'eau : Modélisation des processus et analyse des dynamiques territoriales* [Thesis, Université du Maine]. <https://theses.hal.science/tel-00773259>
- Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., & Rossi, J.-P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 42, S3-S15. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.10.002>
- Lavelle, P., Martin, A., Blanchart, E., Gilot, C., Melendez, G., & Pashanasi, B. (1990). *Conservation de la fertilité des sols de savane par la gestion de l'activité de la macrofaune du sol*.
- Majeau, J.-A., Hébert, M., & Desforges, J. (2013). *Les cendres de poêles à bois Que peut-on en faire?* <https://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/articles/cendre-poele-bois-201305.pdf>
- Mathieu, J. (2004). *Étude de la macrofaune du sol dans une zone de déforestation en amazonie du sud-est, au Brésil, dans le contexte de l'agriculture familiale*.
- Mazur, Z., Sienkiewicz, S., & Mazur, T. (2016). The influence of multi-year organic and mineral fertilisation on the physicochemical properties of lessive soil. *Polish Journal of Soil Science*, 48(1), 79. <https://doi.org/10.17951/pjss.2015.48.1.79>
- Ministère de l'Agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt. (2014). *Les politiques agricoles à travers le monde*. https://agriculture.gouv.fr/sites/default/files/documents/pdf/fichepays2014-MADAGASCAR_cle8433a6.pdf
- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. (2015). *Quelle part du territoire français est occupée par l'agriculture ?* Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. <https://agriculture.gouv.fr/quelle-part-du-territoire-francais-est-occupee-par-lagriculture>
- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire. (2021). *L'agriculture française en quelques chiffres*. RPUE - Représentation Permanente de la France auprès de l'Union européenne. <https://ue.delegfrance.org/l-agriculture-francaise-en-3038>
- Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères. (2024). *Présentation de Madagascar*. France Diplomatie - Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères. <https://www.diplomatie.gouv.fr/fr/dossiers-pays/madagascar/presentation-de-madagascar/>
- Murua, J. R., & Laajimi, A. (1995). *Transition de l'agriculture conventionnelle vers l'agriculture durable : Quelques réflexions*.

Oburger, E. (2022). Harnessing belowground processes for sustainable intensification of agricultural systems. *Plant Soil*.

Papon, S. (2022). *Bilan démographique 2021*. institut national de la statistique et des études économiques. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6024136>

Raboin, L.-M., Ramanantsoanirina, A., Dzido, J.-L., Frouin, J., Radanielina, T., Tharreau, D., Dusserre, J., & Ahmadi, N. (2013). Création variétale pour la riziculture pluviale d'altitude à Madagascar: Bilan de 25 années de sélection. *Cahiers Agricultures*, 22, 450-458. <https://doi.org/10.1684/agr.2013.0624>

Rakotomanga, D., Blanchart, É., Rabary, B., Randriamanantsoa, R., Razafindrakoto, M., & Autfray, P. (2016). Diversité de la macrofaune des sols cultivés sur les Hautes-Terres de Madagascar. *BASE*, 495-507. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.13314>

Ramanantsoanirina, A., Raveloson, H., Rasolofo Irintso, L., Randriamanantsoa, R., Dusserre, J., Raboin, L.-M., Sester, M., Tahiry Randrianjafizanaka, M., Autfray, P., & Salgado, P. (2016). *La Riziculture Pluviale Opérations culturales recommandées*. <https://www.dp-spad.org/content/download/4301/32244/version/1/file/CARNVULG+light+V8+%281%29.pdf>

Raminoarison, M., Razafimbelo, T., Rakotoson, T., Becquer, T., Blanchart, E., & Trap, J. (2020). Multiple-nutrient limitation of upland rainfed rice in ferralsols : A greenhouse nutrient-omission trial. *Journal of Plant Nutrition*, 43(2), 270-284. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1676906>

Randriamanantsoa, R., Quaranta, B., Aberlenc, H.-P., Rafamatanantsoa, E., Naudin, K., Ratnadass, A., & Vercambre, B. (2011). *Diversité et gestion des vers blancs (coleoptere, scarabaeoidea) en riziculture pluviale sur les Hautes Terres malgaches*. https://agritrop.cirad.fr/563965/1/document_563965.pdf

Randriamanantsoa, R., & Ratnadass, A. (2005). *Protection insecticide du riz pluvial par traitement des semences à Madagascar*.

Ratsiatosika, O., Blanchart, E., Razafimbelo, T., & Razafindrakoto, M. (2021). Does rice breeding affect the ability of plants to interact with earthworms in nutrient-depleted Ferralsols? *Applied Soil Ecology*.

Ratsiatosika, O., Razafindrakoto, M., Razafimbelo, T., Rabenarivo, M., Becquer, T., Bernard, L., Trap, J., & Blanchart, E. (2021). Earthworm Inoculation Improves Upland Rice Crop Yield and Other Agrosystem Services in Madagascar. *Agriculture*, 11(1), 60. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010060>

Raveloson, H., & Sester, M. (2011). *Lutte intégrée contre la pyriculariose du riz pluvial à Madagascar*.

Regnier, E. (2023). *Sols menacés | INRAE*. <https://www.inrae.fr/dossiers/peut-encore-sauver-sols/sols-menaces>

Riquier, J., & Moureaux, C. (1957). *Les Sols Malgaches: Pédologie Et Types Principaux* [Compte Rendu]. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/b_fdi_33-34/37124.pdf

Saito, K., Vandamme, E., Johnson, J.-M., Tanaka, A., Senthilkumar, K., Dieng, I., Akakpo, C., Gbaguidi, F., Segda, Z., Bassoro, I., Lamare, D., Gbakatchetche, H., Abera, B. B., Jaiteh, F., Bam, R. K., Dogbe, W., Sékou, K., Rabeson, R., Kamissoko,

- N., ... Wopereis, M. C. S. (2019). Yield-limiting macronutrients for rice in sub-Saharan Africa. *Geoderma*, 338, 546-554. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.036>
- Sourisseau, J.-M., Tsimisanda, H.-M., Bélières, J.-F., Elyah, A., Bosc, P.-M., & Razafimahatratra, M. (2014). *Les Agricultures Familiales À Madagascar : Un Atout Pour Le Développement Durable*.
- Tilman, D. (1998). *The greening of the green revolution*.
- Trap, J., & Blanchart, E. (2023). Intensifying the soil ecological functions for sustainable agriculture: Acting with stakeholders. *Current Research in Environmental Sustainability*, 5, 100225. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2023.100225>
- Trap, J., Blanchart, E., Ratsiatosika, O., Razafindrakoto, M., Becquer, T., Andriamananjara, A., & Morel, C. (2021). Effects of the earthworm *Pontoscolex corethrurus* on rice P nutrition and plant-available soil P in a tropical Ferralsol. *Applied Soil Ecology*, 160, 103867. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103867>
- Trap, J., Bonkowski, M., Plassard, C., Villenave, C., & Blanchart, E. (2016). Ecological importance of soil bacterivores for ecosystem functions. *Plant and Soil*, 398(1-2), 1-24. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2671-6>
- Trap, J., Raminoarison, M., Cébron, A., Razanamalala, K., Razafimbelo, T., Becquer, T., Plassard, C., Blanchart, E., & Bernard, L. (2024a). Multiple nutrient limitation of the soil micro-food web in a tropical grassland revealed by nutrient-omission fertilization. *Applied Soil Ecology*, 198, 105376. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105376>
- Trap, J., Raminoarison, M., Cébron, A., Razanamalala, K., Razafimbelo, T., Becquer, T., Plassard, C., Blanchart, E., & Bernard, L. (2024b). Multiple nutrient limitation of the soil micro-food web in a tropical grassland revealed by nutrient-omission fertilization. *Applied Soil Ecology*, 198, 105376. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105376>
- Trap, J., Ranoarisoa, M. P., Raharijaona, S., Rabeharisoa, L., Plassard, C., Mayad, E. H., Bernard, L., Becquer, T., & Blanchart, E. (2021). Agricultural Practices Modulate the Beneficial Activity of Bacterial-Feeding Nematodes for Plant Growth and Nutrition: Evidence from an Original Intact Soil Core Technique. *Sustainability*, 13(13), 7181. <https://doi.org/10.3390/su13137181>
- UNDP (Éd.). (2022). *Uncertain times, unsettled lives: Shaping our future in a transforming world*. United Nations Development Programme.
- UNDRR. (2023, juin 7). *Soil Degradation* | UNDRR. <http://www.undrr.org/understanding-disaster-risk/terminology/hips/en0005>
- United Nations. (s. d.). *Population | Nations Unies*. United Nations; United Nations. Consulté 22 juillet 2024, à l'adresse <https://www.un.org/fr/global-issues/population>
- USDA. (2009). *Soil Quality Indicators : Earthworms*.
- Velly, J. (1977). *La fertilisation en silice du riz à Madagascar*.
- Vidal, A., Blouin, M., Lubbers, I., Capowiez, Y., Sanchez-Hernandez, J. C., Calogiuri, T., & Van Groenigen, J. W. (2023). The role of earthworms in agronomy : Consensus, novel insights and remaining challenges. In *Advances in Agronomy* (Vol. 181, p. 1-78). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2023.05.001>
- World Food Program. (2019). *La filière riz à Madagascar face à la fortification*. <https://madagascar.un.org/sites/default/files/2019-11/190801%20Analyse%20paysage%20riz%20Madagascar.pdf>

Yacouba, A. S., Moussa, O. Z., Halidou, A., Ibroh, G., & Basso, A. (2013). *Évaluation des performances agronomiques et socio économiques des lignées intra et interspécifiques de riz de bas fond/irrigué au niger.*

Liste des annexes

| | |
|---|-----------|
| <i>Annexe 1 : Tableau A1 des apports en fertilisation utilisés pour chacun des 25 SFR du projet SECuRE et apportés chaque année. Source : Alice Garreau</i> | <i>57</i> |
| <i>Annexe 2 : Représentation du dispositif expérimental</i> | <i>59</i> |
| <i>Annexe 3 : Document expliquant les noms des variables du jeu de données</i> | <i>60</i> |
| <i>Annexe 4 : Jeu de données des variables du sol</i> | <i>64</i> |
| <i>Annexe 5 : Résultats des ACP sur les variables agronomiques</i> | <i>67</i> |
| <i>Annexe 6 : Boxplot montrant l'effet des SFR sur les rendement par une ANOVA et test post-hoc de Tukey</i> | <i>75</i> |
| <i>Annexe 7 : Graphiques présentant les résultats des test de Random Forest pour voir l'effet des SFR sur le rendement</i> | <i>77</i> |
| <i>Annexe 8 : Résultats des ACP sur les variables du sol</i> | <i>79</i> |
| <i>Annexe 9 : Graphiques présentant les résultats des test de Random Forest pour voir l'effet des SFR sur la densité de macrofaune du sol</i> | <i>87</i> |

Annexes

Annexe 1 : Tableau A1 des apports en fertilisation utilisés pour chacun des 25 SFR du projet SECuRE et apportés chaque année. Source : Alice Garreau

Tableau 8 : Description des 25 traitements étudiés dans l'essai SECuRE, la quantité totale de matière apportée en tonne de matière sèche par hectare (t MS/ha) et les différents éléments qui les composent.

| SFR | Constituants | | | |
|--------|--|--------------------------------------|--|-------------------------------------|
| SFR 01 | Poudrette de parc (3 t MS/ha) | | | |
| SFR 02 | Fumier traditionnel (3 t MS/ha) | | | |
| SFR 03 | Fumier traditionnel (3 t MS/ha) | NPK 11-22-16 (40 kg/ha) | | |
| SFR 04 | Fumier traditionnel (6 t MS/ha) | | | |
| SFR 05 | Fumier amélioré (6 t MS/ha) | | | |
| SFR 06 | Compost (6 t MS/ha) | | | |
| SFR 07 | Lombricompost (6 t MS/ha) | | | |
| SFR 08 | NPK 11-22-16 (100 kg /ha) | Urée (100 kg /ha) | | |
| SFR 09 | Fumier traditionnel (6 t MS/ha) | Dolomie (500 kg/ha) | | |
| SFR 10 | Fumier traditionnel (6 t MS/ha) | Cendre de balles de riz (500 kg/ha) | | |
| SFR 11 | Fumier traditionnel (6 t MS/ha) | Hyperfos (500 kg/ha) | | |
| SFR 12 | Fumier traditionnel (2 t MS/ha) | Compost (2 t MS/ha) | Lombricompost (2 t MS/ha) | |
| SFR 13 | Fumier traditionnel (2 t MS/ha) | Compost (2 t MS/ha) | Lombricompost (2 t MS/ha) | Cendre de balles de riz (500 kg/ha) |
| SFR 14 | Fumier traditionnel (2 t MS/ha) | Compost (2 t MS/ha) | Lombricompost (2 t MS/ha) | Hyperfos (500 kg/ha) |
| SFR 15 | Fumier traditionnel (2 t MS/ha) | Compost (2 t MS/ha) | Lombricompost (2 t MS/ha) | Guanomad (500 kg/ha) |
| SFR 16 | Pas de fertilisation | | | |
| SFR 17 | Lisier de porc (3 t MS/ha) | Cendre de balles de riz (500 kg/ha) | | |
| SFR 18 | Fumier traditionnel (18 t MS/ha) (tous les 3 ans) | | | |
| SFR 19 | Fumier traditionnel (6 t MS/ha) (tous les 3 ans) | Compost (6 t MS/ha) (tous les 3 ans) | Lombricompost (6 t MS/ha) (tous les 3 ans) | |
| SFR 20 | Fumier traditionnel (6 t MS/ha) fractionné en 3 fois (2 t MS/ha * 3) | | | |
| SFR 21 | NPK 11-22-16 (100 kg /ha) | Urée (100 kg /ha) | | |
| SFR 22 | Fumier traditionnel (18 t MS/ha) mulch (every 3 year) | | | |
| SFR 23 | Fumier traditionnel (6 t MS/ha) | Farine de crabe(500 kg/ha) | | |
| SFR 24 | Fumier traditionnel (2 t MS/ha) | Compost (2 t MS/ha) | Lombricompost (2 t MS/ha) | Fientes de volaille (500 kg/ha) |
| SFR 25 | Fumier traditionnel (2 t MS/ha en haut) | Lombricompost (2 t MS/ha au milieu) | Compost (2 t MS/ha en bas) | |

Annexe 2 : Représentation du dispositif expérimental

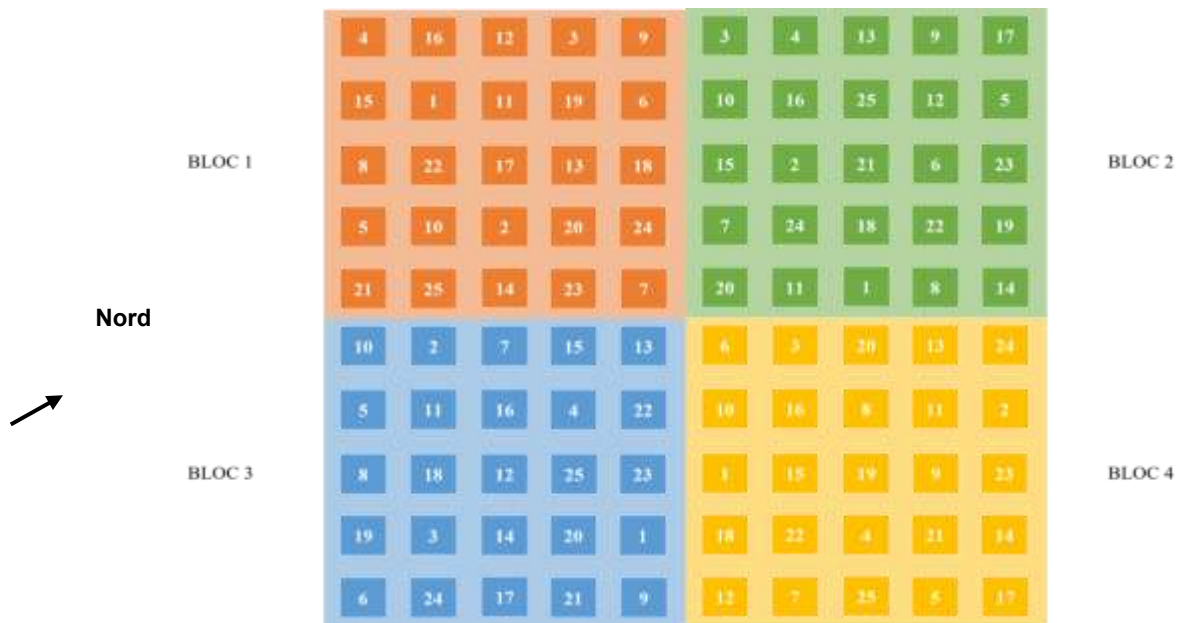


Figure 23: Schéma représentant la parcelle étudiée 50 x 50 m² avec la disposition des 25 SFR dans les placettes des 4 x 4 m² sur les 4 blocs de répétition. Source : Alice Garreau

Annexe 3 : Document expliquant les noms des variables du jeu de données

Annexe 3.1 : Jeu de données des variables agronomiques

Tableau 9 : Description des variables agronomiques utilisées pour l'analyse

| Variables | Descriptions | Variables | Descriptions |
|-----------------|--|-----------------|--|
| %_FG_nb | % du nombre de grains pleins | root_biom | Biomasse racinaire |
| %_FG_w | % du poids des grains pleins | shoot_biom | Biomasse aérienne |
| %_flowering | % de floraison | SPAD | Soil Plant Analyses Development : mesure la chlorophylle des feuilles |
| %_heading | % d'épis | SR_ratio | Rapport biomasse aérienne/racinaire |
| ADF_SPIR | % de la paille dégradée par un détergent acide observé par la méthode de Spectrométrie dans Proche InfraRouge | tot_biom | Biomasse totale |
| ADL_SPIR | % de la paille dégrader par un détergent acide spécifique de la lignine observé par la méthode de Spectrométrie dans Proche InfraRouge | w_EG_7sh | Poids des grains vides pour 7 poquets |
| H_earlyTil | Hauteur au début du tallage | w_EG_YS | Poids des grains vides au carré de rendement |
| H_endTil | Hauteur à la fin du tallage | w_FG_7sh | Poids des grains pleins pour 7 poquets |
| H_harvest | Hauteur à la récolte | w_FG_YS | Poids des grains pleins au carré de rendement |
| H_heading | Hauteur des épis | w_grain_7sh | Poids des grains pour 7 poquets |
| moist_grain | Humidité des grains | w_grain_YS | Poids des grains au carré de rendement |
| moist_straw_lab | Humidité des pailles | w_stem_7sh | Poids des tiges pour 7 poquets |
| nb_ear_7sh | Nombre d'épis pour 7 poquets | w_stem_YS | Poids des tiges au carré de rendement |
| nb_EG_7sh | Nombre de grains vides pour 7 poquets | w_thsd_grain | Poids de mille grains |
| nb_EG_YS | Nombre de grains vides pour le carré de rendement | yield_grain_7sh | Rendement en grain pour 7 poquets |
| nb_FG_7sh | Nombre de grais pleins pour 7 poquets | yield_grain_YS | Rendement en grain au carré de rendement |
| nb_FG_YS | Nombre de grains pleins pour le carré de rendement | yield_straw_7sh | Rendement en paille pour 7 poquets |
| nb_grain_7sh | Nombre de grains pour 7 poquets | yield_straw_YS | Rendement en paille au carré de rendement |
| nb_grain_YS | Nombre de grains pour le carré de rendement | NDF_SPIR | % de la paille dégradée par un détergent neutre |
| nb_pnc_7sh | Nombre de panicules pour 7 poquets | NDVI | Normalized Difference Vegetation Index : mesure de la capacité photosynthétique de la plante |
| nb_pnc_wh_7sh | Nombre de panicules blanches pour 7 poquets | P_grain | Teneur en phosphore des grains |
| nb_sh_per_YS | Nombre de poquets par carré de rendement | P_straw | Teneur en phosphore de la paille |

| | | | |
|-------------|-------------------------------|-----|---|
| nb_stem_7sh | Nombre de tige pour 7 poquets | PRI | Photochemical Reflectance Index : mesure de la capacité photosynthétique de la plante |
|-------------|-------------------------------|-----|---|

Annexe 3.2 : Jeu de données de variables de fertilisation

Tableau 10 : Valeur des variables de fertilisation utilisées pour l'analyse, jeu de données complet, partie 1

| SFR | Qt_C_kg/ha | Qt_N_kg/ha | Qt_P_kg/ha | Qt_K_kg/ha | Qt_Ca_kg/ha | Qt_Mg_kg/ha | Qt_S_kg/ha | Soluble_kg/ha |
|-------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|---------------|
| SFR02 | 586,458 | 24,987 | 8,508 | 28,515 | 10,539 | 5,85 | 3,42 | 471,897 |
| SFR03 | 587,782 | 38,955 | 17,308 | 34,915 | 10,539 | 5,85 | 3,42 | 471,897 |
| SFR04 | 1172,916 | 49,974 | 17,016 | 57,03 | 21,078 | 11,7 | 6,84 | 943,794 |
| SFR05 | 1494,342 | 97,218 | 17,694 | 106,218 | 38,472 | 31,704 | 14,7 | 1865,376 |
| SFR06 | 876,060 | 65,358 | 28,422 | 31,578 | 264,162 | 54,606 | 6,6 | 1599,6 |
| SFR07 | 1395,696 | 100,986 | 22,944 | 102,318 | 45,468 | 22,914 | 18 | 1468,8 |
| SFR08 | 22,620 | 80,14 | 22 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SFR09 | 1172,916 | 49,974 | 17,026 | 57,056 | 116,7035 | 48,405 | 6,84 | 943,794 |
| SFR10 | 1189,226 | 50,6735 | 17,629 | 60,4965 | 21,881 | 12,079 | 7,29 | 984,4775 |
| SFR11 | 1174,160 | 50,407 | 57,688 | 57,1915 | 60,6755 | 12,5475 | 6,94 | 1035,237 |
| SFR12 | 1149,224 | 72,106 | 22,794 | 63,642 | 110,236 | 29,74 | 10,48 | 1337,398 |
| SFR13 | 1165,534 | 72,8055 | 23,407 | 67,1085 | 111,039 | 30,119 | 10,93 | 1378,0815 |
| SFR14 | 1150,468 | 72,539 | 63,466 | 63,8035 | 149,8335 | 30,5875 | 10,58 | 1428,841 |
| SFR15 | 1173,702 | 78,864 | 58,9235 | 64,743 | 141,078 | 31,957 | 33,43 | 1748,3725 |
| SFR16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tableau 11 : Valeur des variables de fertilisation utilisées pour l'analyse, jeu de données complet, partie 2

| | Hemicel_kg/ha | Cel_kg/ha | Lign_kg/ha | lign_N | C_N | N_P | C_P |
|-------|---------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| SFR02 | 139,818 | 2118,867 | 269,418 | 10,7823268 | 23,4705247 | 2,93688293 | 68,9301834 |
| SFR03 | 139,818 | 2118,867 | 269,418 | 6,916134 | 15,0887434 | 2,25069332 | 33,960134 |
| SFR04 | 279,636 | 4237,734 | 538,836 | 10,7823268 | 23,4705247 | 2,93688293 | 68,9301834 |
| SFR05 | 30,522 | 3152,13 | 951,972 | 9,79213726 | 15,3710424 | 5,49440488 | 84,4547304 |
| SFR06 | 283,236 | 3311,4 | 805,764 | 12,3284678 | 13,449922 | 2,29955668 | 30,9288579 |
| SFR07 | 381,024 | 2775,576 | 1374,594 | 13,6117284 | 13,820688 | 4,40141213 | 60,8305439 |
| SFR08 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,28225605 | 3,64272727 | 1,02818182 |
| SFR09 | 279,636 | 4237,734 | 538,836 | 10,7823268 | 23,4705247 | 2,93515799 | 68,8896981 |
| SFR10 | 284,436 | 4667,476 | 563,6105 | 11,1223914 | 23,4683908 | 2,87443984 | 67,4584775 |
| SFR11 | 504,117 | 4411,9705 | 548,6755 | 10,8849069 | 23,2935902 | 0,87378658 | 20,3536264 |
| SFR12 | 314,632 | 3441,57 | 906,398 | 12,5703548 | 15,9379802 | 3,16337633 | 50,4178293 |
| SFR13 | 319,432 | 3871,312 | 931,1725 | 12,7898648 | 16,0088661 | 3,11041569 | 49,7942282 |
| SFR14 | 539,113 | 3615,8065 | 916,2375 | 12,630964 | 15,8599926 | 1,14295843 | 18,1273123 |
| SFR15 | 362,714 | 3480,3585 | 908,553 | 11,5205037 | 14,8826017 | 1,33841337 | 19,919073 |
| SFR16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Annexe 4 : Jeu de données des variables du sol

| Variables | Descriptions | Variables | Descriptions |
|------------------|--|------------------|--|
| Dpest | Densité de coléoptères ravageurs, méthode TSBF | Totfeed | Activité alimentaire totales des bactéries du sol |
| Daran | Densité des araignées, méthode TSBF | Dayfeed | Activité alimentaire le jour des bactéries du sol |
| DChil | Densité de chilopodes, méthode TSBF | Daydeco_red | Décomposition journalière du sachet de thé rouge |
| Ddiplo | Densité de diplopodes, méthode TSBF | Daydeco_green | Décomposition journalière du sachet de thé vert |
| DHapl | Densité d'haplotaxidés, méthode TSBF | Deco_rate_green | Taux de décomposition du thé rouge |
| Dcole | Densité des coléoptères, méthode TSBF | Deco_rate_red | Taux de décomposition du thé vert |
| Ddiplu | Densité de diploures, méthode TSBF | P_resin_0-10 | Mesure du P du sol entre 0 et 10 cm de profondeur |
| DDipt | Densité de diptères, méthode TSBF | P_micro_0-10 | Mesure du P microbien du sol entre 0 et 10 cm de profondeur |
| DHemi | Densité d'hémiptères, méthode TSBF | AWCD_cka | Average well colour development_Carboxylic and Kenotic Acids : mesure de l'activité des communautés bactériennes du sol capables de dégrader les acides carboxyliques et cétones |
| DHyme | Densité d'hyménoptères, méthode TSBF | AWCD_amac | Average well colour development_Carboxylic and Kenotic Acids : mesure de l'activité des communautés bactériennes du sol capables de dégrader les amino-acides |
| Disop | Densité d'isoptères, méthode TSBF | AWCD_tot | Average well colour development_Carboxylic and Kenotic Acids : mesure de l'activité totale des communautés bactériennes du sol |
| DLepi | Densité de lépidoptères, méthode TSBF | AWCD_amam | Average well colour development_Carboxylic and Kenotic Acids : mesure de l'activité des communautés bactériennes du sol capables de dégrader les amides et les amines |
| DOrth | Densité d'orthoptères, méthode TSBF | AWCD_CH | Average well colour development_Carboxylic and Kenotic Acids : mesure de l'activité des communautés bactériennes du sol capables de dégrader les carbohydrates |
| DTota | Densité totale, méthode TSBF | AWCD_poly | Average well colour development_Carboxylic and Kenotic Acids : mesure de l'activité des communautés bactériennes du sol capables de dégrader les polymères |

| Variables | Descriptions | Variables | Descriptions |
|------------------|---|-----------------------------------|--|
| BAran | Biomasse méthode TSBF d'araignées | bulk_density_0-10 | Densité apparente entre 0 et 10 cm de profondeur |
| BChil | Biomasse méthode TSBF de chilopodes | bulk_density_10-20 | Densité apparente entre 10 et 20 cm de profondeur |
| BDiplo | Biomasse méthode TSBF de diplopodes | N_tot_0-10 | Quantité de N du sol entre 0 et 10 cm de profondeur |
| BHapl | Biomasse méthode TSBF d'haplotaxidés | C_tot_0-10 | Quantité de C du sol entre 0 et 10 cm de profondeur |
| BCole | Biomasse méthode TSBF de coléoptères | aggr_10-20 | % d'agrégats dans le sol entre 10 et 20 cm de profondeur |
| BDiplu | Biomasse méthode TSBF de diploures | aggr_0-10 | % d'agrégats dans le sol entre 0 et 10 cm de profondeur |
| BDipt | Biomasse méthode TSBF de diptères | pH_in_situ_0-15 | Mesure du pH du sol entre 0 et 15 cm de profondeur |
| BHemi | Biomasse méthode TSBF d'hémiptères | pH_water_0-10 | Mesure du pH de l'eau du sol entre 0 et 10 cm de profondeur |
| BHyme | Biomasse méthode TSBF d'hyménoptères | pH_water_10-20 | Mesure du pH de l'eau du sol entre 10 et 20 cm de profondeur |
| Blisop | Biomasse méthode TSBF d'isoptères | arbuscule_abundance_A | % de l'abondance d'arbuscule totale |
| BLepi | Biomasse méthode TSBF de lépidoptères | mycorrhizal_intensity_M | % de la colonisation sur tout le système racinaire |
| BOrth | Biomasse méthode TSBF d'orthoptères | mycorrhization_intensity_m | % de la colonisation sur les racines présentant des mycorhizes |
| BTota | Biomasse méthode TSBF totale | arbuscule_abundance_mycorrhized_a | % de l'abondance d'arbuscule des racines mycorrhizé |
| DPAran | Densité méthode Pitfall d'araignées | frequency_colozination_F | % de la fréquence de fragments racinaires mycorrhizé |
| DPCole | Densité méthode Pitfall de coléoptères | T3_speed_0-10 | Mesure de la respiration du sol entre 0 et 10 cm |
| DPHemi | Densité méthode Pitfall d'hémiptères | T7_speed_0-10 | Mesure de la respiration du sol entre 0 et 10 cm |
| DPHyme | Densité méthode Pitfall d'hyménoptères | T15_speed_0-10 | Mesure de la respiration du sol entre 0 et 10 cm |
| DPTota | Densité méthode Pitfall totale | T21_speed_0-10 | Mesure de la respiration du sol entre 0 et 10 cm |
| BPAran | Biomasse méthode Pitfall d'araignées | T28_speed_0-10 | Mesure de la respiration du sol entre 0 et 10 cm |
| BPCole | Biomasse méthode Pitfall de coléoptères | T3_sum_0-10 | Mesure de la respiration cumulée du sol entre 0 et 10 cm |
| BPHyme | Biomasse méthode Pitfall d'hyménoptères | T7_sum_0-10 | Mesure de la respiration cumulée du sol entre 0 et 10 cm |
| BPHemi | Biomasse méthode Pitfall d'hémiptères | T15_sum_0-10 | Mesure de la respiration cumulée du sol entre 0 et 10 cm |
| BPTota | Biomasse méthode Pitfall totale | T21_sum_0-10 | Mesure de la respiration cumulée du sol entre 0 et 10 cm |
| NemaPest | Densité de nématodes phytoparasites | T28_sum_0-10 | Mesure de la respiration cumulée du sol entre 0 et 10 cm |
| NematBact | Densité de nématodes bactérivores | POxC_0-10 | Permanganate-oxidizable carbon : mesure de la fraction labile du carbone du sol entre 0 et 10 cm |

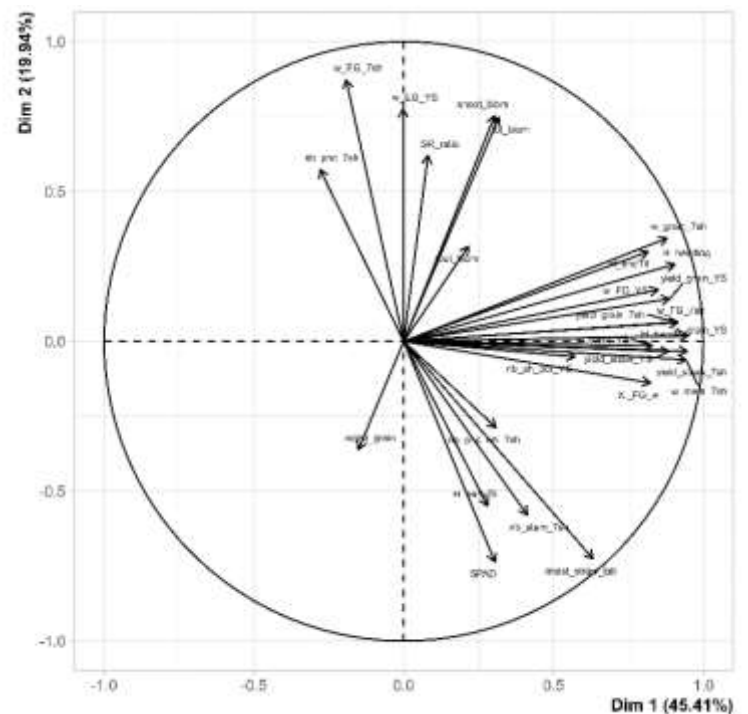
| | | | |
|----------|---------------------------------|--|--|
| NemaFong | Densité de nématodes fongivores | | |
| NemaHerb | Densité de nématodes herbivores | | |
| NemaOmni | Densité de nématodes omnivores | | |
| NemaPred | Densité de nématodes prédateurs | | |

Annexe 5 : Résultats des ACP sur les variables agronomiques

Annexe 5.1 : Tableau A2 des variables ayant un effet significatif sur la construction des axes 1 et 2 et le cercle des corrélations associé

Tableau 12 : Résultats des contributions des variables sur les dimensions 1 et 2 de l'ACP sur les variables d'évaluation des performances agronomiques sur toutes les années cercle des corrélations associé

| Variable | Contribution | p-value | Dimension |
|-----------------|--------------|---------------|-----------|
| w_grain_YS | 0,949134594 | 1.954905e-121 | Dim.1 |
| H_harvest | 0,946417685 | 8.119815e-119 | Dim.1 |
| yield_straw_7sh | 0,942358258 | 3.781441e-115 | Dim.1 |
| w_stem_7sh | 0,942358258 | 3.781441e-115 | Dim.1 |
| w_FG_7sh | 0,915948441 | 2.374647e-96 | Dim.1 |
| yield_grain_7sh | 0,914886738 | 9.912323e-96 | Dim.1 |
| H_heading | 0,905520477 | 1.389015e-90 | Dim.1 |
| yield_grain_YS | 0,887798549 | 3.572205e-82 | Dim.1 |
| yield_straw_YS | 0,88439383 | 1.014418e-80 | Dim.1 |
| w_grain_7sh | 0,879794967 | 7.910977e-79 | Dim.1 |
| w_FG_YS | 0,849670791 | 4.321654e-68 | Dim.1 |
| w_stem_YS | 0,82998913 | 2.827537e-62 | Dim.1 |
| X_FG_w | 0,823797085 | 1.343648e-60 | Dim.1 |
| H_endTil | 0,815937049 | 1.460925e-58 | Dim.1 |
| moist_straw_lab | 0,631738118 | 3.872887e-28 | Dim.1 |
| nb_sh_per_YS | 0,571584541 | 3.225558e-22 | Dim.1 |
| nb_stem_7sh | 0,412552558 | 2.800021e-11 | Dim.1 |
| tot_biom | 0,317439207 | 5.098197e-07 | Dim.1 |
| nb_pnc_wh_7sh | 0,308071264 | 1.135443e-06 | Dim.1 |
| SPAD | 0,30457733 | 1.519952e-06 | Dim.1 |
| shoot_biom | 0,303932458 | 1.603355e-06 | Dim.1 |
| H_earlyTil | 0,279602305 | 1.097682e-05 | Dim.1 |
| root_biom | 0,215947779 | 7.576853e-04 | Dim.1 |
| moist_grain | -0,151624414 | 1.875846e-02 | Dim.1 |
| w_EG_7sh | -0,192399943 | 2.761593e-03 | Dim.1 |
| nb_pnc_7sh | -0,279195294 | 1.131887e-05 | Dim.1 |
| w_EG_7sh | 0,872763817 | 4.424640e-76 | Dim.2 |
| w_EG_YS | 0,774990358 | 2.448849e-49 | Dim.2 |
| shoot_biom | 0,753090201 | 3.628658e-45 | Dim.2 |
| tot_biom | 0,747568151 | 3.490935e-44 | Dim.2 |
| SR_ratio | 0,62030717 | 6.490555e-27 | Dim.2 |
| nb_pnc_7sh | 0,573478427 | 2.190150e-22 | Dim.2 |
| w_grain_7sh | 0,344341195 | 4.374805e-08 | Dim.2 |
| root_biom | 0,316455285 | 5.552681e-07 | Dim.2 |
| H_endTil | 0,298996207 | 2.403170e-06 | Dim.2 |
| H_heading | 0,257028478 | 5.602062e-05 | Dim.2 |
| w_FG_YS | 0,172134288 | 7.523232e-03 | Dim.2 |
| yield_grain_YS | 0,142187475 | 2.763277e-02 | Dim.2 |



| | | | | |
|-----------------|--------------|--------------|-------|--|
| X_FG_w | -0,138769599 | 3.163490e-02 | Dim.2 | |
| nb_pnc_wh_7sh | -0,287491776 | 5.997582e-06 | Dim.2 | |
| moist_grain | -0,361193063 | 8.309267e-09 | Dim.2 | |
| H_earlyTil | -0,548577852 | 2.932532e-20 | Dim.2 | |
| nb_stem_7sh | -0,57873278 | 7.383866e-23 | Dim.2 | |
| moist_straw_lab | -0,725413686 | 1.754196e-40 | Dim.2 | |
| SPAD | -0,735894544 | 3.464540e-42 | Dim.2 | |

Tableau 13 : Tableau des résultats des contributions des variables sur les dimensions 1 et 2 de l'ACP sur les variables d'évaluation des performances agronomiques sur le cycle de culture 2017-2018 et cercle des corrélations associé

| Variables | Contributions | p-value | Dimensions |
|-----------------|---------------|--------------|------------|
| w_FG_YS | 0,977134036 | 1.070536e-40 | Dim.1 |
| yield_grain_YS | 0,977134036 | 1.070536e-40 | Dim.1 |
| w_grain_YS | 0,977120393 | 1.089011e-40 | Dim.1 |
| w_EG_YS | 0,971180825 | 8.099378e-38 | Dim.1 |
| yield_straw_YS | 0,965794163 | 1.082577e-35 | Dim.1 |
| yield_straw_7sh | 0,965794163 | 1.082577e-35 | Dim.1 |
| w_stem_7sh | 0,965794163 | 1.082577e-35 | Dim.1 |
| w_stem_YS | 0,965794163 | 1.082577e-35 | Dim.1 |
| nb_FG_YS | 0,937016206 | 3.549008e-28 | Dim.1 |
| nb_grain_YS | 0,924728967 | 5.248654e-26 | Dim.1 |
| tot_biom | 0,916893358 | 8.307129e-25 | Dim.1 |
| w_FG_7sh | 0,89658382 | 3.534025e-22 | Dim.1 |
| yield_grain_7sh | 0,89658382 | 3.534025e-22 | Dim.1 |
| H_harvest | 0,877090196 | 4.001686e-20 | Dim.1 |
| shoot_biom | 0,782930449 | 1.460284e-13 | Dim.1 |
| nb_pnc_7sh | 0,748765497 | 6.025863e-12 | Dim.1 |
| nb_stem_7sh | 0,71544723 | 1.332862e-10 | Dim.1 |
| X_flowering | 0,704641724 | 3.317484e-10 | Dim.1 |
| nb_sh_per_YS | 0,622549437 | 1.091626e-07 | Dim.1 |
| X_FG_nb | 0,532899388 | 1.169008e-05 | Dim.1 |
| root_biom | 0,458611557 | 2.285478e-04 | Dim.1 |
| moist_grain | 0,435457777 | 5.063769e-04 | Dim.1 |
| nb_EG_YS | 0,287510037 | 2.591685e-02 | Dim.1 |
| %_heading | 0,793677122 | 3.935608e-14 | Dim.2 |
| SR_ratio | 0,601960387 | 3.627509e-07 | Dim.2 |
| %_FG_nb | 0,589732604 | 7.118088e-07 | Dim.2 |
| nb_stem_7sh | 0,403528699 | 1.388174e-03 | Dim.2 |
| nb_sh_per_YS | 0,395248014 | 1.774994e-03 | Dim.2 |
| nb_pnc_7sh | 0,390030189 | 2.065765e-03 | Dim.2 |
| nb_EG_YS | -0,267819725 | 3.856088e-02 | Dim.2 |
| %_flowering | -0,447076707 | 3.421079e-04 | Dim.2 |
| root_biom | -0,465373865 | 1.792059e-04 | Dim.2 |

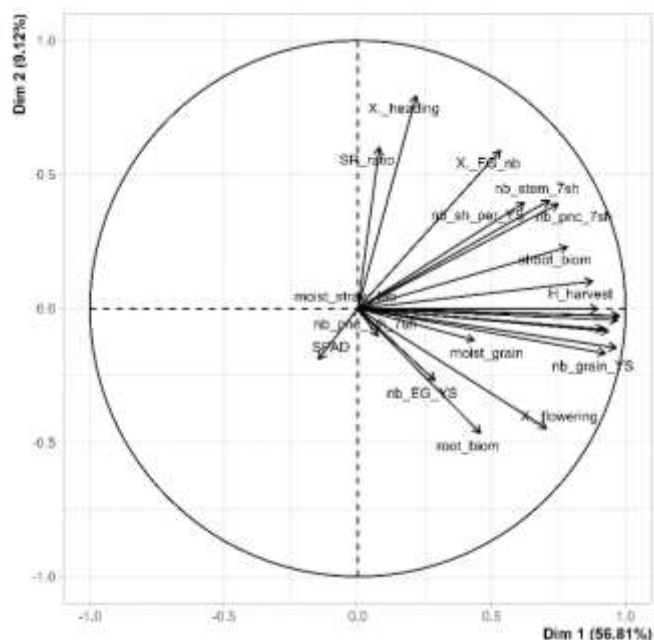


Tableau 14 : Tableau des résultats des contributions des variables sur les dimensions 1 et 2 de l'ACP sur les variables d'évaluation des performances agronomiques sur le cycle de culture 2018-2019 cercle des corrélations associé

| Variables | Contributions | p-value | Dimensions |
|-----------------|---------------|--------------|------------|
| w_grain_YS | 0,956880436 | 7.902290e-33 | Dim.1 |
| yield_grain_YS | 0,956453359 | 1.045489e-32 | Dim.1 |
| w_stem_YS | 0,927991517 | 1.519936e-26 | Dim.1 |
| yield_straw_YS | 0,927991517 | 1.519936e-26 | Dim.1 |
| H_harvest | 0,910104936 | 7.358233e-24 | Dim.1 |
| H_endTil | 0,906900669 | 1.941823e-23 | Dim.1 |
| yield_grain_7sh | 0,891456217 | 1.336716e-21 | Dim.1 |
| w_stem_7sh | 0,886893874 | 4.133462e-21 | Dim.1 |
| yield_straw_7sh | 0,886893874 | 4.133462e-21 | Dim.1 |
| H_heading | 0,880103749 | 2.034104e-20 | Dim.1 |
| w_FG_YS | 0,877070065 | 4.019575e-20 | Dim.1 |
| nb_stem_7sh | 0,876354819 | 4.707455e-20 | Dim.1 |
| nb_pnc_7sh | 0,874408872 | 7.199684e-20 | Dim.1 |
| w_FG_7sh | 0,804856655 | 9.244425e-15 | Dim.1 |
| w_grain_7sh | 0,80340154 | 1.122105e-14 | Dim.1 |
| shoot_biom | 0,664468221 | 7.086215e-09 | Dim.1 |
| tot_biom | 0,64571884 | 2.535773e-08 | Dim.1 |
| H_earlyTil | 0,636258534 | 4.670268e-08 | Dim.1 |
| TA_SPIR | 0,544001908 | 7.041237e-06 | Dim.1 |
| SR_ratio | 0,53112749 | 1.265435e-05 | Dim.1 |
| CC_SPIR | 0,508601216 | 3.337775e-05 | Dim.1 |
| w_EG_YS | 0,490782378 | 6.858330e-05 | Dim.1 |
| root_biom | 0,482110164 | 9.600312e-05 | Dim.1 |
| X_FG_w | 0,452305687 | 2.854403e-04 | Dim.1 |
| nb_sh_per_YS | 0,406321201 | 1.275930e-03 | Dim.1 |
| w_EG_7sh | 0,388388531 | 2.165667e-03 | Dim.1 |
| NDF_SPIR | 0,342112907 | 7.461659e-03 | Dim.1 |
| ADF_SPIR | 0,334690904 | 8.953569e-03 | Dim.1 |
| nb_pnc_wh_7sh | 0,305299719 | 1.769060e-02 | Dim.1 |
| P_straw | -0,425504344 | 7.008555e-04 | Dim.1 |
| TNM_SPIR | -0,696550814 | 6.396704e-10 | Dim.1 |
| DM_straw_SPIR | 0,855025877 | 3.494008e-18 | Dim.2 |
| NDF_SPIR | 0,85104709 | 7.231249e-18 | Dim.2 |
| ADF_SPIR | 0,777112981 | 2.880289e-13 | Dim.2 |
| CC_SPIR | 0,731770507 | 3.096097e-11 | Dim.2 |
| nb_stem_7sh | -0,25883281 | 4.583531e-02 | Dim.2 |
| SPAD | -0,285949354 | 2.677166e-02 | Dim.2 |
| TA_SPIR | -0,29296536 | 2.310723e-02 | Dim.2 |
| TNM_SPIR | -0,556692643 | 3.856430e-06 | Dim.2 |

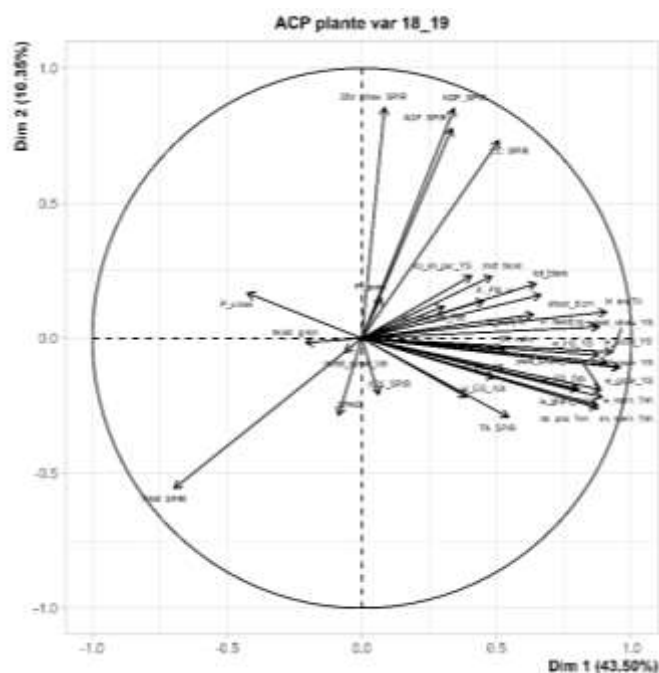


Tableau 15 : Tableau des résultats des contributions des variables sur les dimensions 1 et 2 de l'ACP sur les variables d'évaluation des performances agronomiques sur le cycle de culture 2019-2020 cercle des corrélations associé

| Variables | Contributions | p-value | Dimensions |
|-----------------|---------------|--------------|------------|
| nb_stem_7sh | 0,937630134 | 2.694376e-28 | Dim.1 |
| nb_pnc_7sh | 0,932868978 | 2.128655e-27 | Dim.1 |
| w_grain_7sh | 0,924331754 | 6.080172e-26 | Dim.1 |
| w_FG_YS | 0,923084353 | 9.599373e-26 | Dim.1 |
| yield_grain_YS | 0,923084353 | 9.599373e-26 | Dim.1 |
| H_endTil | 0,922478969 | 1.194791e-25 | Dim.1 |
| w_FG_7sh | 0,920994648 | 2.028189e-25 | Dim.1 |
| yield_grain_7sh | 0,920994648 | 2.028189e-25 | Dim.1 |
| w_grain_YS | 0,895962926 | 4.167004e-22 | Dim.1 |
| yield_straw_7sh | 0,892815825 | 9.455844e-22 | Dim.1 |
| w_stem_7sh | 0,892815825 | 9.455844e-22 | Dim.1 |
| H_heading | 0,884221467 | 7.831327e-21 | Dim.1 |
| w_stem_YS | 0,769960156 | 6.460630e-13 | Dim.1 |
| yield_straw_YS | 0,769960156 | 6.460630e-13 | Dim.1 |
| X_FG_w | 0,76235311 | 1.478603e-12 | Dim.1 |
| nb_sh_per_YS | 0,722732797 | 7.036564e-11 | Dim.1 |
| tot_biom | 0,687805019 | 1.270154e-09 | Dim.1 |
| shoot_biom | 0,668290815 | 5.403512e-09 | Dim.1 |
| w_thsd_grain | 0,641881675 | 3.256772e-08 | Dim.1 |
| root_biom | 0,607196047 | 2.694529e-07 | Dim.1 |
| SR_ratio | 0,35840781 | 4.925176e-03 | Dim.1 |
| w_EG_YS | 0,90951791 | 8.813493e-24 | Dim.2 |
| w_EG_7sh | 0,887621711 | 3.463554e-21 | Dim.2 |
| SR_ratio | 0,69404052 | 7.807919e-10 | Dim.2 |
| nb_pnc_wh_7sh | 0,640702534 | 3.514634e-08 | Dim.2 |

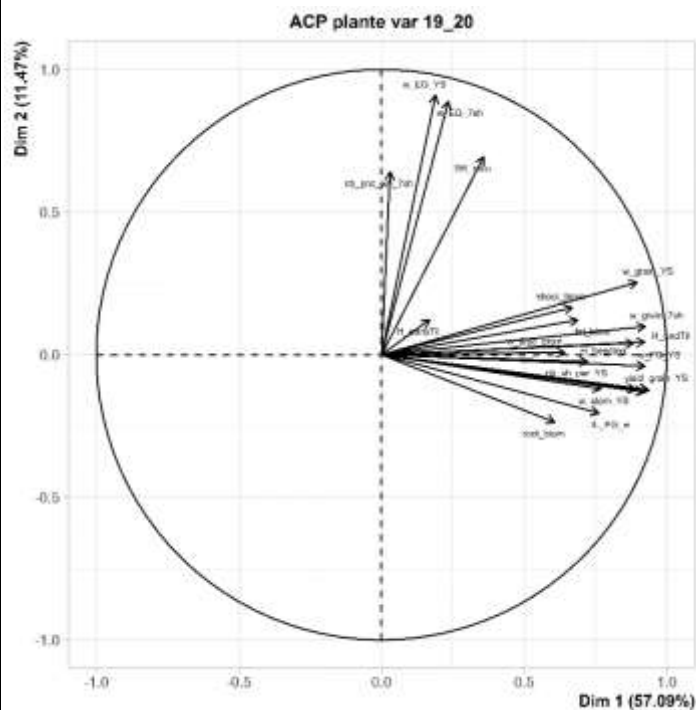
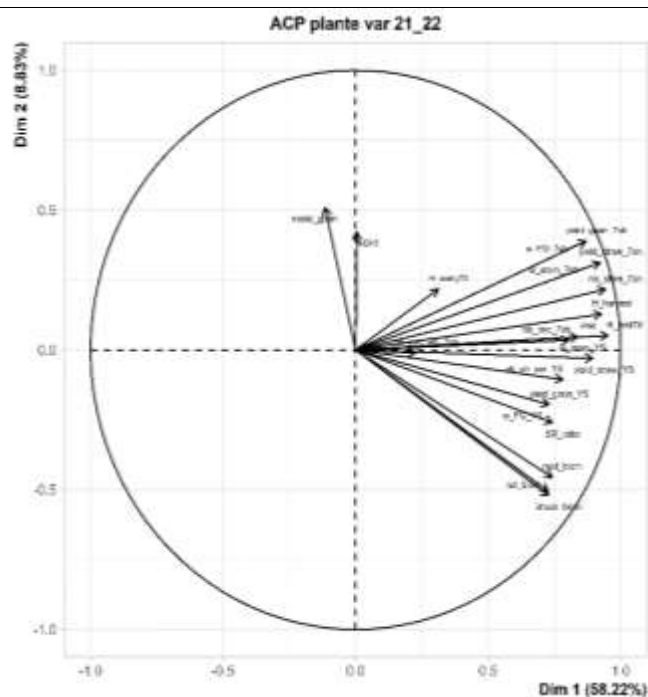


Tableau 16 : Tableau des résultats des contributions des variables sur les dimensions 1 et 2 de l'ACP sur les variables d'évaluation des performances agronomiques sur le cycle de culture 2021-2022 cercle des corrélations associé

| Variables | Contributions | p-value | Dimensions |
|-----------------|---------------|--------------|------------|
| H_endTil | 0,951706874 | 1.966973e-31 | Dim.1 |
| nb_stem_7sh | 0,942620403 | 2.572359e-29 | Dim.1 |
| H_harvest | 0,927421951 | 1.894907e-26 | Dim.1 |
| w_stem_7sh | 0,921821798 | 1.512173e-25 | Dim.1 |
| yield_straw_7sh | 0,921821798 | 1.512173e-25 | Dim.1 |
| yield_straw_YS | 0,894597942 | 5.964256e-22 | Dim.1 |
| w_stem_YS | 0,894597942 | 5.964256e-22 | Dim.1 |
| yield_grain_7sh | 0,869152017 | 2.192213e-19 | Dim.1 |
| w_FG_7sh | 0,869152017 | 2.192213e-19 | Dim.1 |
| PRI | 0,837618425 | 7.265255e-17 | Dim.1 |
| nb_pnc_7sh | 0,803684069 | 1.080809e-14 | Dim.1 |
| nb_sh_per_YS | 0,781751063 | 1.678679e-13 | Dim.1 |
| SR_ratio | 0,742108137 | 1.161539e-11 | Dim.1 |
| root_biom | 0,741134882 | 1.276362e-11 | Dim.1 |
| w_FG_YS | 0,729407008 | 3.849703e-11 | Dim.1 |
| yield_grain_YS | 0,729407008 | 3.849703e-11 | Dim.1 |
| shoot_biom | 0,728126845 | 4.327754e-11 | Dim.1 |
| tot_biom | 0,7262238 | 5.144069e-11 | Dim.1 |
| H_earlyTil | 0,312104192 | 1.519606e-02 | Dim.1 |
| moist_grain | 0,509509572 | 3.213978e-05 | Dim.2 |
| NDVI | 0,422587605 | 7.694556e-04 | Dim.2 |
| w_FG_7sh | 0,38930151 | 2.109589e-03 | Dim.2 |
| yield_grain_7sh | 0,38930151 | 2.109589e-03 | Dim.2 |
| yield_straw_7sh | 0,3114974 | 1.540553e-02 | Dim.2 |
| w_stem_7sh | 0,3114974 | 1.540553e-02 | Dim.2 |
| SR_ratio | -0,259872613 | 4.493997e-02 | Dim.2 |
| root_biom | -0,45523321 | 2.575902e-04 | Dim.2 |
| tot_biom | -0,505685802 | 3.765525e-05 | Dim.2 |
| shoot_biom | -0,520284181 | 2.035785e-05 | Dim.2 |



Annexe 5.2 : Projection des SFR sur les axes 1 et 2 des ACP sur les variables d'évaluation des performances agronomiques

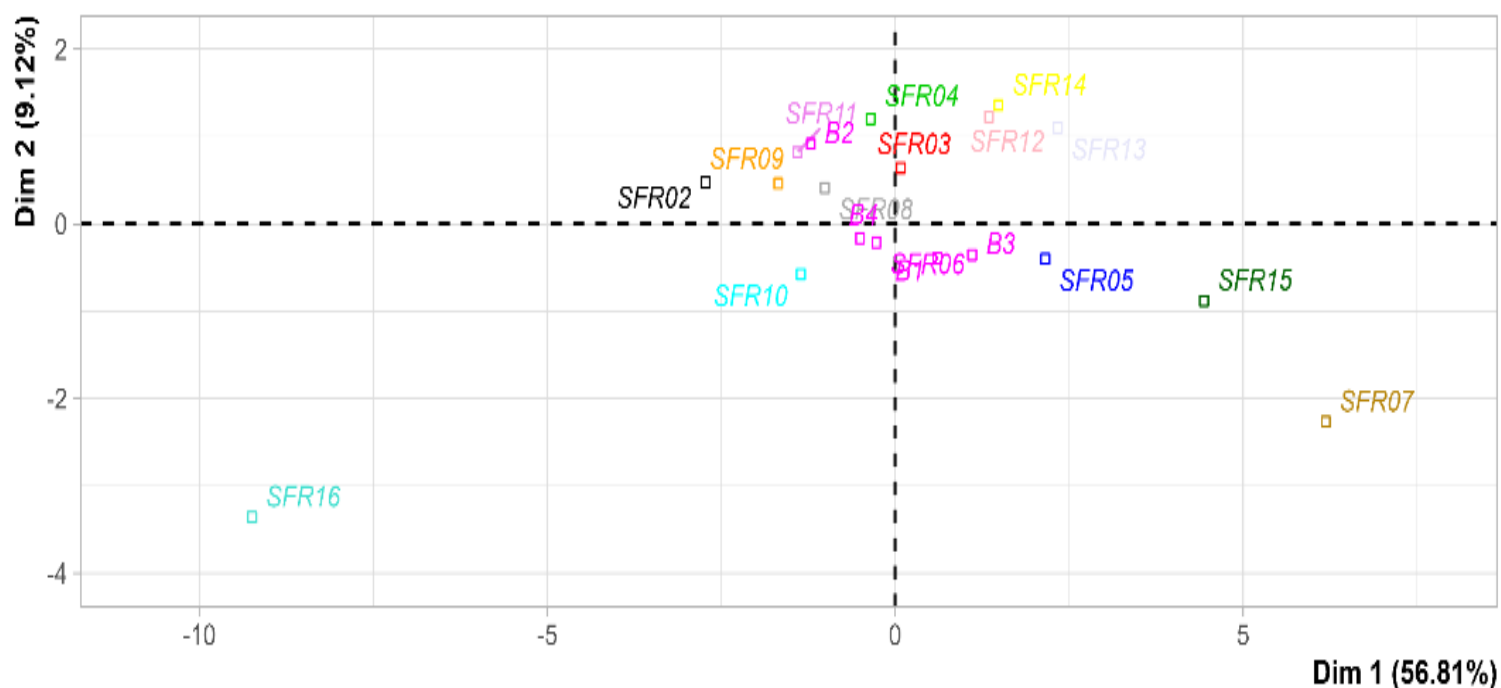


Figure 25 : Projection des SFR sur les axes 1 et 2 de l'ACP réalisé sur les variables agronomiques pour l'année 2017-2018

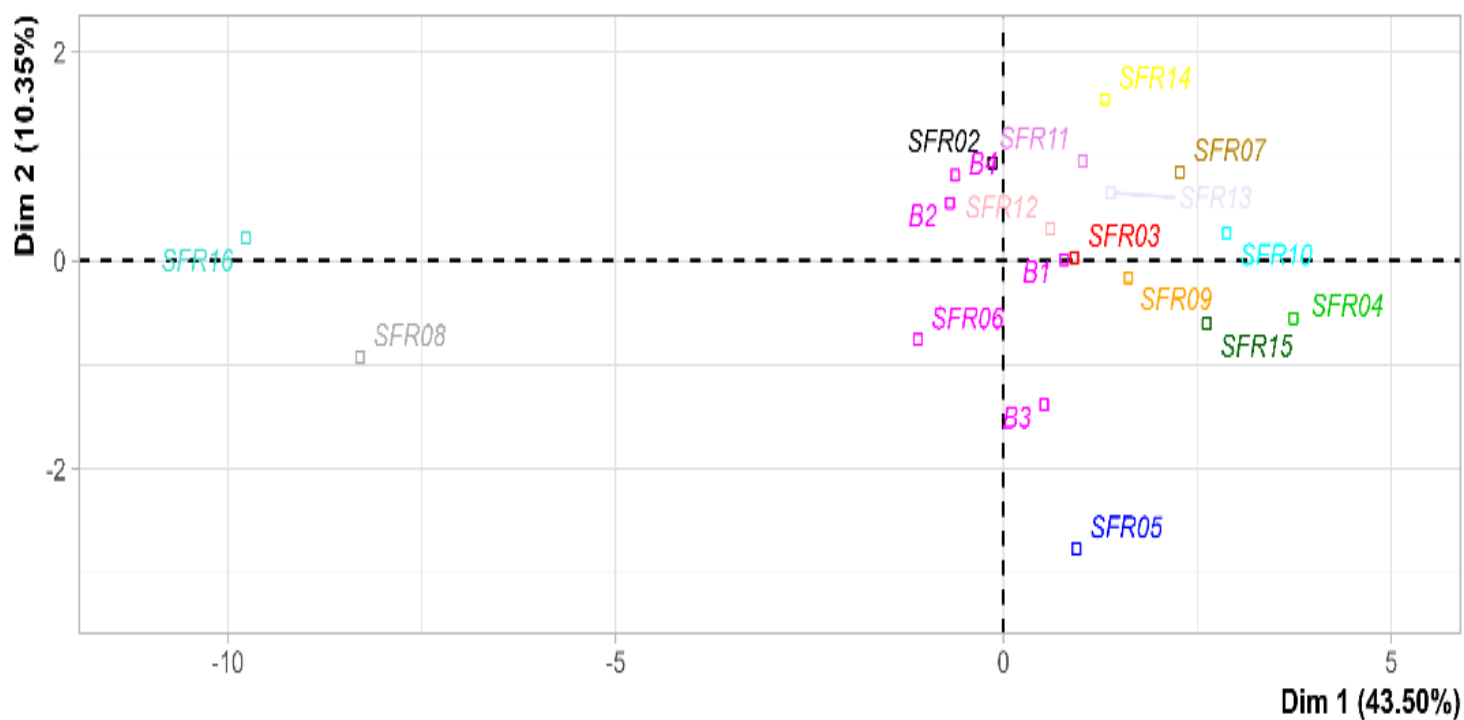


Figure 24 : Projection des SFR sur les axes 1 et 2 de l'ACP réalisé sur les variables agronomiques pour l'année 2018-2019

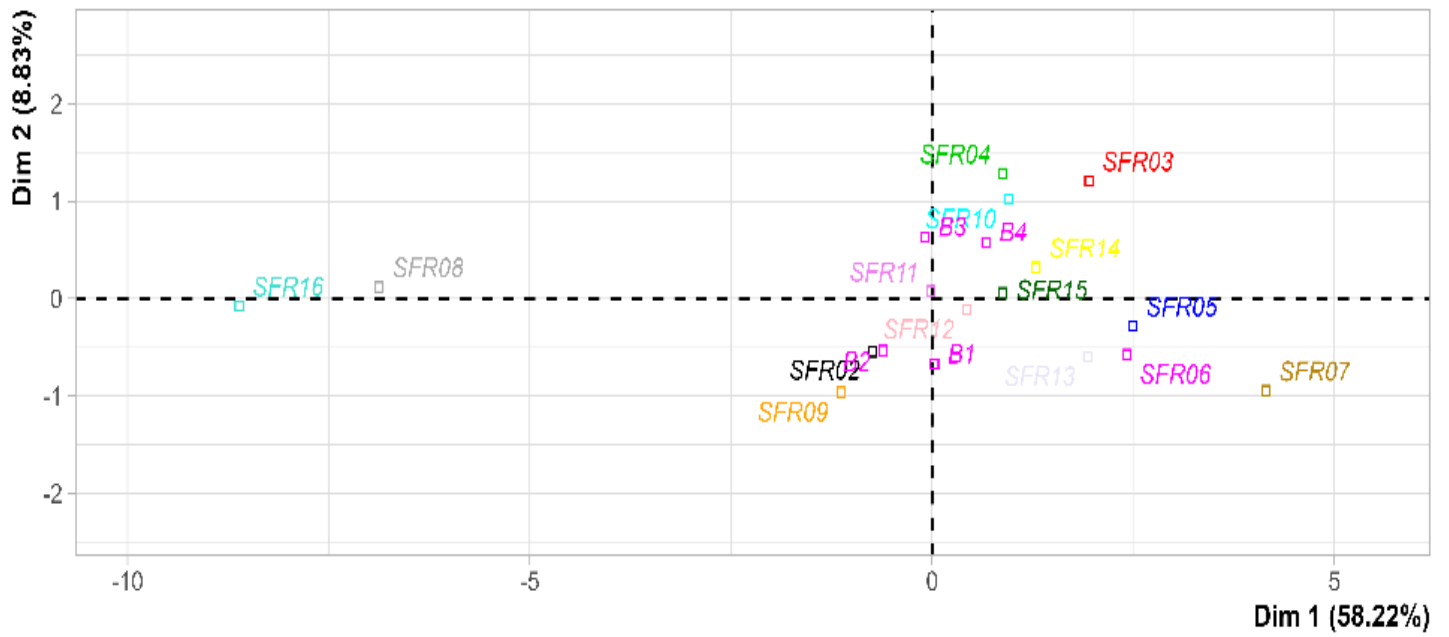


Figure 26 : Projection des SFR sur les axes 1 et 2 de l'ACP réalisé sur les variables agronomiques pour l'année 2021-2022

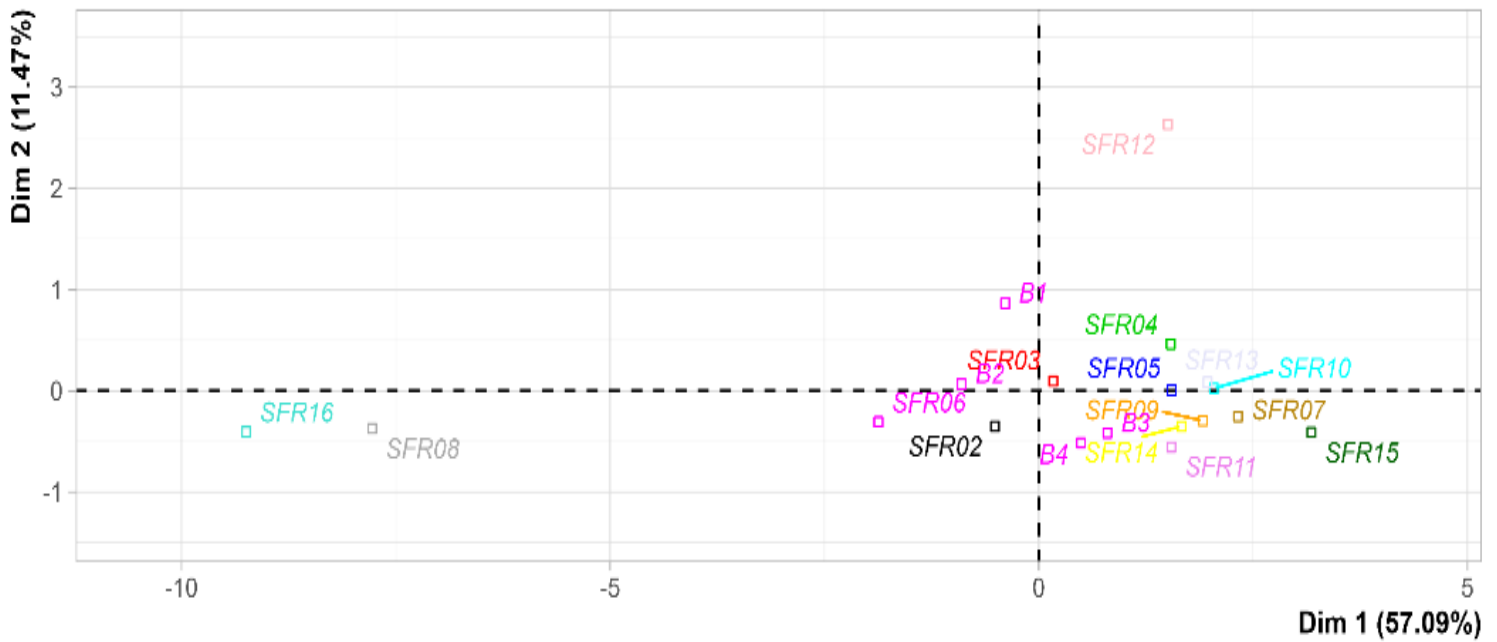


Figure 27 : Projection des SFR sur les axes 1 et 2 de l'ACP réalisé sur les variables agronomiques pour l'année 2019-2020

Annexe 6 : Boxplot montrant l'effet des SFR sur les rendements par une ANOVA et test post-hoc de Tukey

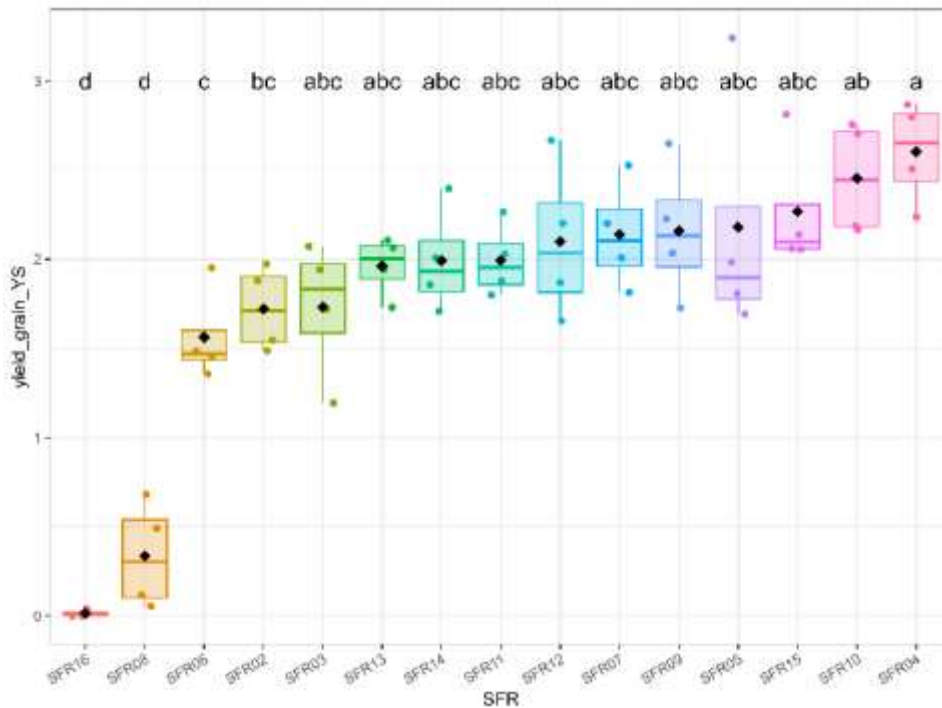


Figure 28 : Boxplot des rendements (t/ha) présentés par ordre croissant en fonction des SFR pour l'année 2018-2019. Les lettres identiques indiquées au-dessus montrent les rendements non significatifs entre eux (ANOVA 1 facteur, p value = $1,21E-13$, test post hoc de Tukey). Les barres horizontales représentent la médiane, les barres verticales représentent l'étendue des données non atypiques ($n=16$), le losange noir représente la moyenne. Les caractéristiques des diverses SFR sont indiquées dans le tableau 3.

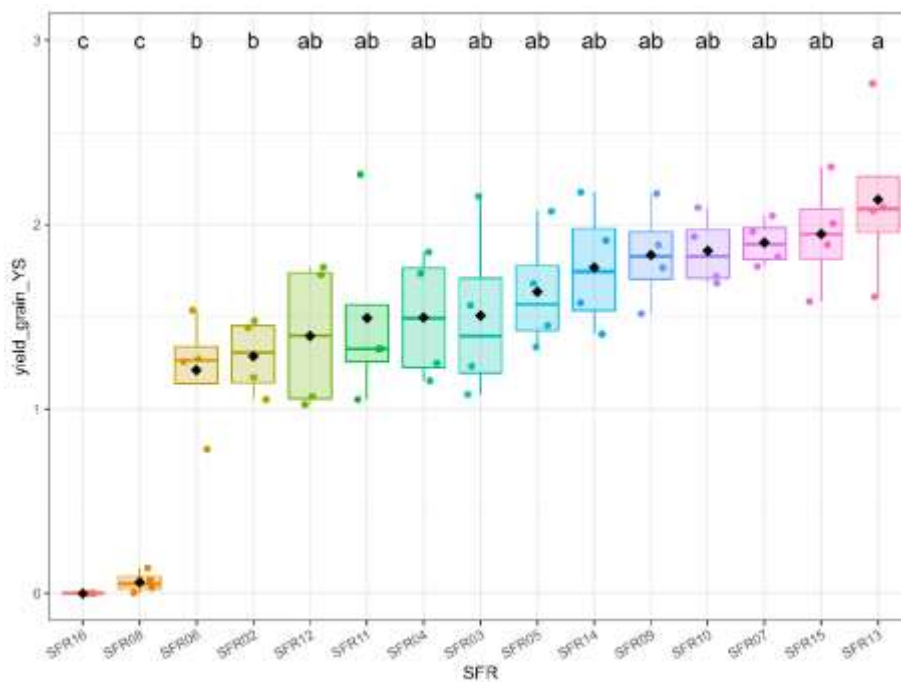


Figure 29 : Boxplot des rendements (t/ha) présentés par ordre croissant en fonction des SFR pour l'année 2019-2020. Les lettres identiques indiquées au-dessus montrent les rendements non significatifs entre eux (ANOVA 1 facteur, p value = $2,44E-12$, test post hoc de Tukey). Les barres horizontales représentent la médiane, les barres verticales représentent l'étendue des données non atypique ($n=16$), le losange noir représente la moyenne. Les caractéristiques des diverses SFR sont indiquées dans le tableau 3.

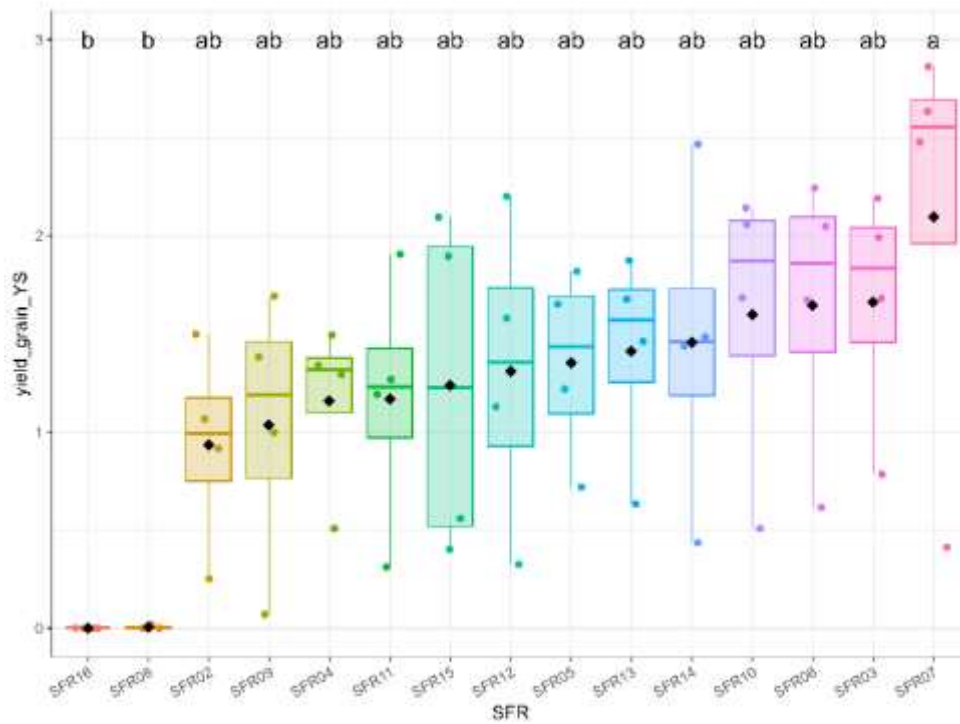


Figure 30 : Boxplot des rendements (t de grains/ha) présentés par ordre croissant en fonction des SFR pour l'année 2021-2022. Les lettres identiques indiquées au-dessus montrent les rendements non significatifs entre eux (ANOVA 1 facteur, p value = 0,004043, test post hoc de Tukey). Les barres horizontales représentent la médiane, les barres verticales représentent l'étendue des données non atypique ($n=16$), le losange noir représente la moyenne. Les caractéristiques des diverses SFR sont indiquées dans le tableau 3.

Annexe 7 : Graphiques présentant les résultats des test de Random Forest pour voir l'effet des SFR sur le rendement

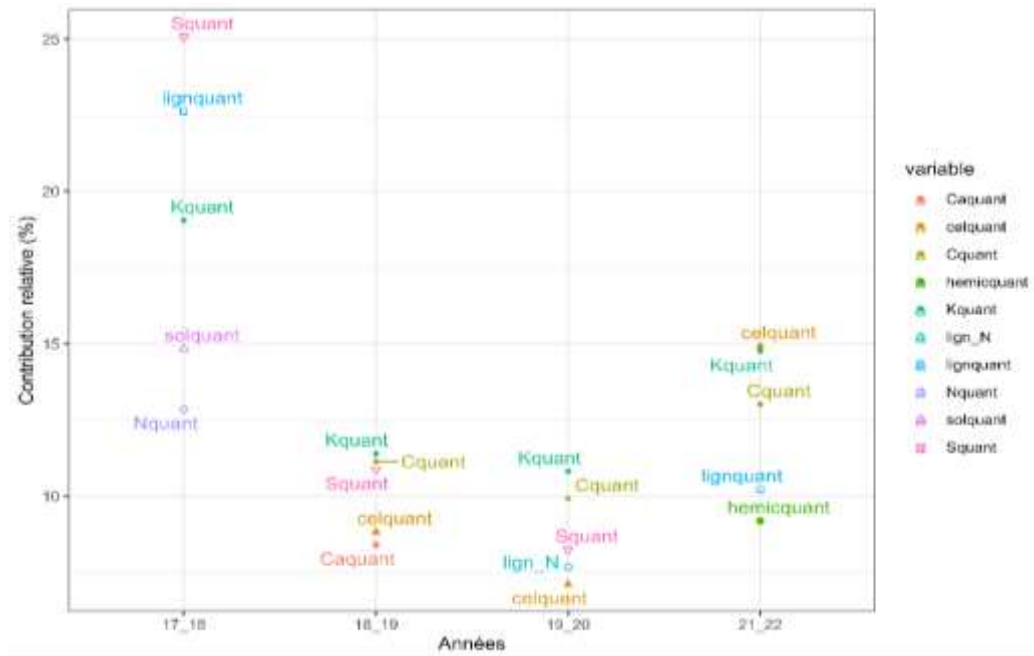


Figure 31 : Représentation des résultats des cinq variables (éléments chimiques ou ratio) ayant montré la contribution relative (%) la plus élevée au rendement pour chaque année. Résultats issus d'un test RF, avec un $set.seed = 140$ et 500 arbres, sur tous les SFR sauf le SFR 16. Les variables sont décrites dans la figure 11.

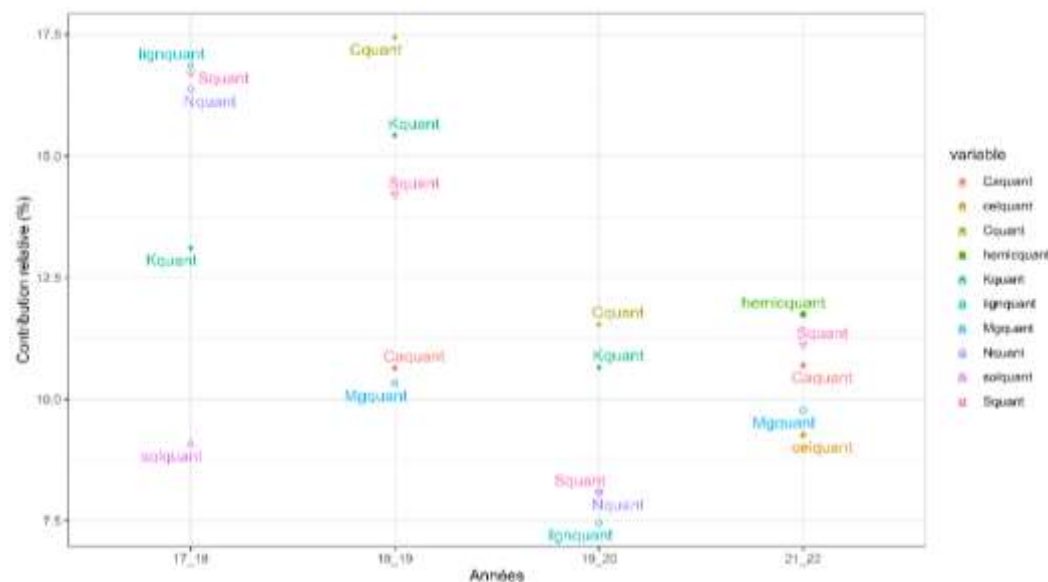


Figure 32 : Représentation des résultats des cinq variables (éléments chimiques ou ratio) ayant montré la contribution relative (%) la plus élevées au rendement pour chaque année. Résultats issus d'un test RF, avec un $set.seed = 140$ et 500 arbres, sur tous les SFR sauf le SFR 16 et 08. Les variables sont décrites dans la figure 11.

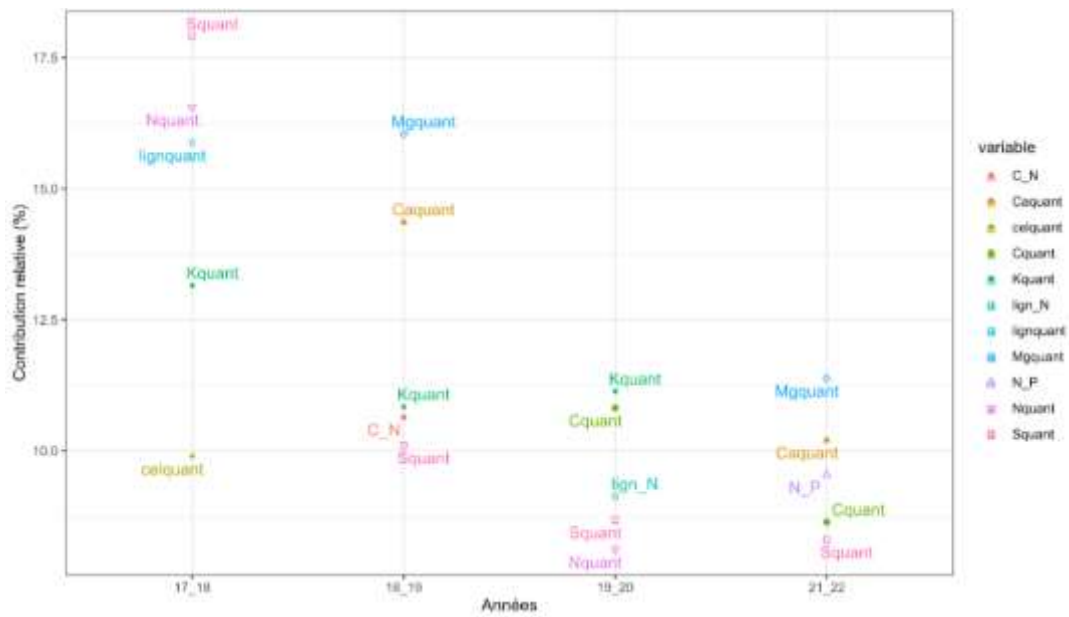


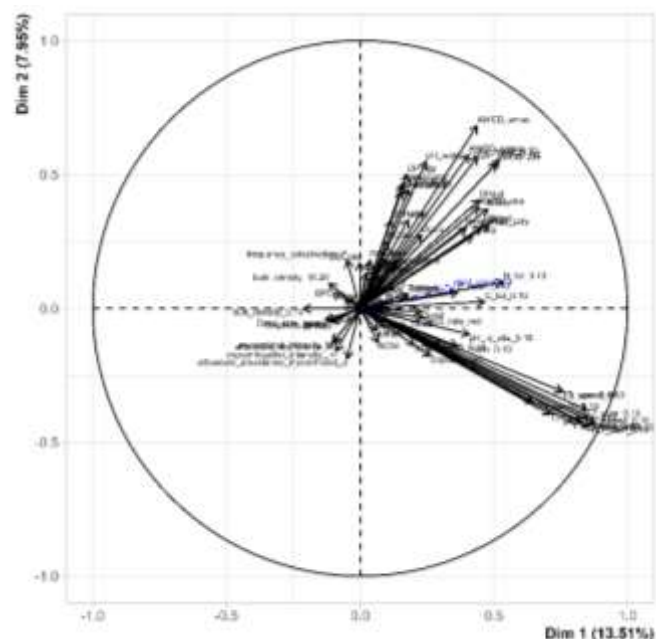
Figure 33 : Représentation des résultats des cinq variables (éléments chimiques ou ratio) ayant montré la contribution relative (%) la plus élevée au rendement pour chaque année. Résultats issus d'un test RF, avec un set.seed = 140 et 500 arbres, sur tous les SFR sauf le SFR 16, 08, 02 et 03. Les variables sont décrites dans la figure 11.

Annexe 8 : Résultats des ACP sur les variables du sol

Annexe 8.A : Tableau A3 des variables ayant un effet significatif sur la construction des axes 1 et 2 et le cercle des corrélations associé

Tableau 17 : Résultats des contributions des variables sur les dimensions 1 et 2 de l'ACP sur les variables du sol sur toutes les années cercle des corrélations associé, en bleu la variable quantitative supplémentaire du rendement.

| Contributions | p-value | Dimension | Variabes |
|---------------|--------------|-----------|-----------------|
| 0,874685947 | 7.016957e-58 | Dim.1 | T15_sum_0.10 |
| 0,857354401 | 3.182184e-53 | Dim.1 | T21_sum_0.10 |
| 0,850584518 | 1.436111e-51 | Dim.1 | T7_speed_0.10 |
| 0,844580829 | 3.608421e-50 | Dim.1 | T7_sum_0.10 |
| 0,824343729 | 7.454876e-46 | Dim.1 | T28_sum_0.10 |
| 0,789639617 | 1.309710e-39 | Dim.1 | T15_speed_0.10 |
| 0,756890763 | 1.032570e-34 | Dim.1 | T3_speed_0.10 |
| 0,754285052 | 2.344770e-34 | Dim.1 | T3_sum_0.10 |
| 0,709593929 | 7.206811e-29 | Dim.1 | T21_speed_0.10 |
| 0,644775943 | 1.554514e-22 | Dim.1 | T28_speed_0.10 |
| 0,536372647 | 8.474423e-15 | Dim.1 | N_tot_0.10 |
| 0,523615148 | 4.624816e-14 | Dim.1 | AWCD_tot |
| 0,511715463 | 2.114776e-13 | Dim.1 | AWCD_CH |
| 0,487591195 | 3.868644e-12 | Dim.1 | BTota |
| 0,484861273 | 5.299957e-12 | Dim.1 | BHapl |
| 0,466497876 | 4.103486e-11 | Dim.1 | C_tot_0.10 |
| 0,458706896 | 9.431975e-11 | Dim.1 | DTota |
| 0,457433333 | 1.078513e-10 | Dim.1 | AWCD_poly |
| 0,450449314 | 2.227805e-10 | Dim.1 | DHapl |
| 0,447192635 | 3.107190e-10 | Dim.1 | AWCD_cka |
| 0,443115043 | 4.689677e-10 | Dim.1 | pH_water_0.10 |
| 0,44120291 | 5.677618e-10 | Dim.1 | AWCD_amac |
| 0,4082904 | 1.273789e-08 | Dim.1 | pH_in_situ_0.15 |
| 0,408071908 | 1.298939e-08 | Dim.1 | AWCD_amam |
| 0,400013978 | 2.645605e-08 | Dim.1 | NemaPest |
| 0,367234493 | 3.958283e-07 | Dim.1 | P_resin_0.10 |
| 0,360697695 | 6.557752e-07 | Dim.1 | P_micro_0.10 |
| 0,298137485 | 4.805321e-05 | Dim.1 | POxC_0.10 |
| 0,262978597 | 3.615952e-04 | Dim.1 | Dpest |
| 0,262762763 | 3.658034e-04 | Dim.1 | Daydeco_red |
| 0,250603842 | 6.910928e-04 | Dim.1 | pH_water_10.20 |
| 0,235488999 | 1.461202e-03 | Dim.1 | Deco_rate_red |
| 0,227607926 | 2.120311e-03 | Dim.1 | Dcole |
| 0,203481948 | 6.149518e-03 | Dim.1 | DDipt |
| 0,182522047 | 1.419200e-02 | Dim.1 | DChil |
| 0,179961213 | 1.563260e-02 | Dim.1 | Totfeed |
| 0,179924829 | 1.565395e-02 | Dim.1 | Dayfeed |



| | | | |
|--------------|--------------|-------|-----------------------------------|
| 0,178648717 | 1.641922e-02 | Dim.1 | NemaHerb |
| 0,171102038 | 2.164479e-02 | Dim.1 | DOTota |
| 0,163621104 | 2.818322e-02 | Dim.1 | NemaFong |
| 0,162940336 | 2.885435e-02 | Dim.1 | DPHyme |
| 0,156002372 | 3.650736e-02 | Dim.1 | NematBact |
| -0,212797111 | 4.130683e-03 | Dim.1 | bulk_density_0.10 |
| 0,683521671 | 4.006243e-26 | Dim.2 | AWCD_amac |
| 0,574168816 | 3.564549e-17 | Dim.2 | AWCD_amam |
| 0,569569246 | 7.203455e-17 | Dim.2 | pH_water_0.10 |
| 0,552367757 | 9.100818e-16 | Dim.2 | AWCD_tot |
| 0,550852751 | 1.130027e-15 | Dim.2 | pH_water_10.20 |
| 0,540192035 | 5.027717e-15 | Dim.2 | AWCD_CH |
| 0,495582997 | 1.514617e-12 | Dim.2 | DPTota |
| 0,472353239 | 2.164916e-11 | Dim.2 | NemaFong |
| 0,462822516 | 6.092578e-11 | Dim.2 | DPHyme |
| 0,441515576 | 5.503332e-10 | Dim.2 | NematBact |
| 0,438053064 | 7.759101e-10 | Dim.2 | NemaHerb |
| 0,40722526 | 1.400991e-08 | Dim.2 | DHapl |
| 0,375464664 | 2.062944e-07 | Dim.2 | AWCD_cka |
| 0,357846208 | 8.144823e-07 | Dim.2 | BTota |
| 0,33255379 | 5.088938e-06 | Dim.2 | DChil |
| 0,331724477 | 5.389574e-06 | Dim.2 | DPHemi |
| 0,314251561 | 1.738311e-05 | Dim.2 | BHapl |
| 0,30090203 | 4.053131e-05 | Dim.2 | AWCD_poly |
| 0,284057738 | 1.113658e-04 | Dim.2 | NemaPest |
| 0,255469287 | 5.377398e-04 | Dim.2 | Dcole |
| 0,25273045 | 6.196833e-04 | Dim.2 | DTota |
| 0,251724191 | 6.525784e-04 | Dim.2 | BCole |
| 0,187555945 | 1.169517e-02 | Dim.2 | Daran |
| 0,182397325 | 1.425937e-02 | Dim.2 | DPAran |
| 0,180244227 | 1.546736e-02 | Dim.2 | frequency_colozination_F |
| 0,17072927 | 2.193648e-02 | Dim.2 | DPCole |
| 0,15524185 | 3.744211e-02 | Dim.2 | NemaOmni |
| 0,149397229 | 4.532152e-02 | Dim.2 | BDiplo |
| 0,149342957 | 4.540073e-02 | Dim.2 | Ddiplo |
| -0,160143792 | 3.175625e-02 | Dim.2 | mycorrhization_intensity_m |
| -0,17853389 | 1.648965e-02 | Dim.2 | Daydeco_red |
| -0,188591212 | 1.123247e-02 | Dim.2 | arbuscule_abundance_mycorrhized_a |
| -0,314466535 | 1.714196e-05 | Dim.2 | T3_sum_0.10 |
| -0,315278838 | 1.625900e-05 | Dim.2 | T3_speed_0.10 |
| -0,354874742 | 1.018592e-06 | Dim.2 | T28_speed_0.10 |
| -0,383362771 | 1.085015e-07 | Dim.2 | T7_sum_0.10 |
| -0,399354154 | 2.801952e-08 | Dim.2 | T21_speed_0.10 |
| -0,41013441 | 1.079417e-08 | Dim.2 | T7_speed_0.10 |

| | | | | |
|--------------|--------------|-------|----------------|--|
| -0,430028799 | 1.694964e-09 | Dim.2 | T15_speed_0.10 | |
| -0,43296757 | 1.276160e-09 | Dim.2 | T28_sum_0.10 | |
| -0,435391224 | 1.007776e-09 | Dim.2 | T15_sum_0.10 | |
| -0,443479936 | 4.521067e-10 | Dim.2 | T21_sum_0.10 | |

Tableau 18 : Résultats des contributions des variables sur les dimensions 1 et 2 de l'ACP sur les variables du sol sur l'année 2018-2019 et le cercle des corrélations associé

| Contributions | p-value | Dimension | Variables |
|---------------|--------------|-----------|-----------|
| 0,702656778 | 3.905184e-10 | Dim.1 | NemaPest |
| 0,617681113 | 1.461433e-07 | Dim.1 | BOrth |
| 0,540385815 | 8.321801e-06 | Dim.1 | DCole |
| 0,534311594 | 1.097094e-05 | Dim.1 | DOrth |
| 0,521488391 | 1.932625e-05 | Dim.1 | BTota |
| 0,518106143 | 2.235440e-05 | Dim.1 | DTota |
| 0,508402502 | 3.365439e-05 | Dim.1 | DHapl |
| 0,500244072 | 4.702263e-05 | Dim.1 | DDipt |
| 0,408622601 | 1.189632e-03 | Dim.1 | NemaHerb |
| 0,382773415 | 2.540779e-03 | Dim.1 | BHyme |
| 0,35901585 | 4.847413e-03 | Dim.1 | Dpest |
| 0,272692079 | 3.503445e-02 | Dim.1 | DPHyme |
| 0,613391479 | 1.882138e-07 | Dim.2 | BTota |
| 0,56266193 | 2.880296e-06 | Dim.2 | DHapl |
| 0,520502947 | 2.016673e-05 | Dim.2 | DPTota |
| 0,408889769 | 1.179962e-03 | Dim.2 | DPAran |
| 0,367638184 | 3.855455e-03 | Dim.2 | DPHyme |
| 0,276350745 | 3.256634e-02 | Dim.2 | BPTota |
| 0,26905958 | 3.763679e-02 | Dim.2 | Daran |
| -0,256534719 | 4.786606e-02 | Dim.2 | BCole |
| -0,274833235 | 3.357184e-02 | Dim.2 | DHyme |
| -0,292573859 | 2.329990e-02 | Dim.2 | BDiplo |
| -0,472559281 | 1.376213e-04 | Dim.2 | DOrth |
| -0,52647858 | 1.554671e-05 | Dim.2 | BOrth |
| -0,581726655 | 1.090464e-06 | Dim.2 | BHyme |

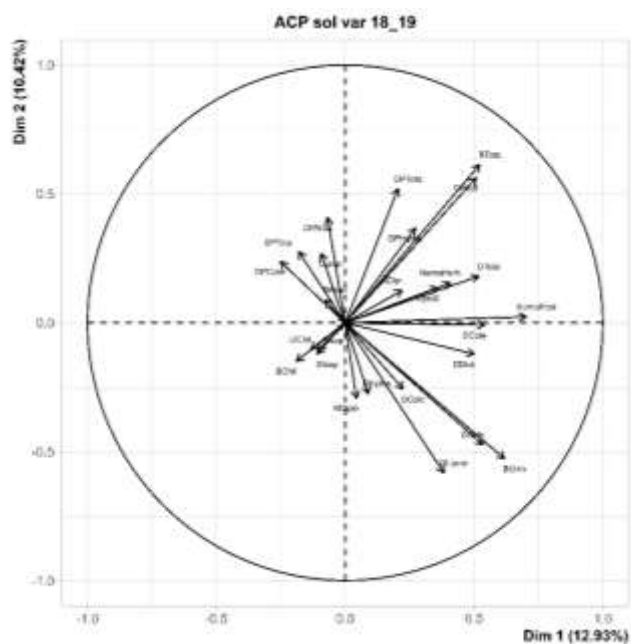


Tableau 19 : Résultats des contributions des variables sur les dimensions 1 et 2 de l'ACP sur les variables du sol sur l'année 2019-2020 et le cercle des corrélations associé

| Contribution | p-value | Dimension | Variable |
|--------------|--------------|-----------|----------|
| 0,823881 | 6.257484e-16 | Dim.1 | BLepi |
| 0,814778 | 2.358619e-15 | Dim.1 | DOrth |
| 0,720028 | 8.940735e-11 | Dim.1 | BOrth |
| 0,714563 | 1.438323e-10 | Dim.1 | DDipt |
| 0,673668 | 3.665427e-09 | Dim.1 | DLepi |
| 0,557431 | 3.720856e-06 | Dim.1 | BDipt |
| 0,404995 | 1.328190e-03 | Dim.1 | DHapl |
| 0,705214 | 3.164367e-10 | Dim.2 | BTota |
| 0,697526 | 5.916730e-10 | Dim.2 | DTota |
| 0,582151 | 1.066369e-06 | Dim.2 | DHapl |
| 0,505344 | 3.818878e-05 | Dim.2 | BCole |
| 0,483337 | 9.159083e-05 | Dim.2 | DAran |
| 0,476309 | 1.196288e-04 | Dim.2 | BAran |
| 0,449031 | 3.198234e-04 | Dim.2 | DCole |
| 0,377167 | 2.971993e-03 | Dim.2 | DHyme |
| 0,340545 | 7.757330e-03 | Dim.2 | DPest |
| 0,311888 | 1.527028e-02 | Dim.2 | BHyme |
| 0,265898 | 4.003005e-02 | Dim.2 | BDipt |
| -0,581726655 | 1.090464e-06 | Dim.2 | BHyme |

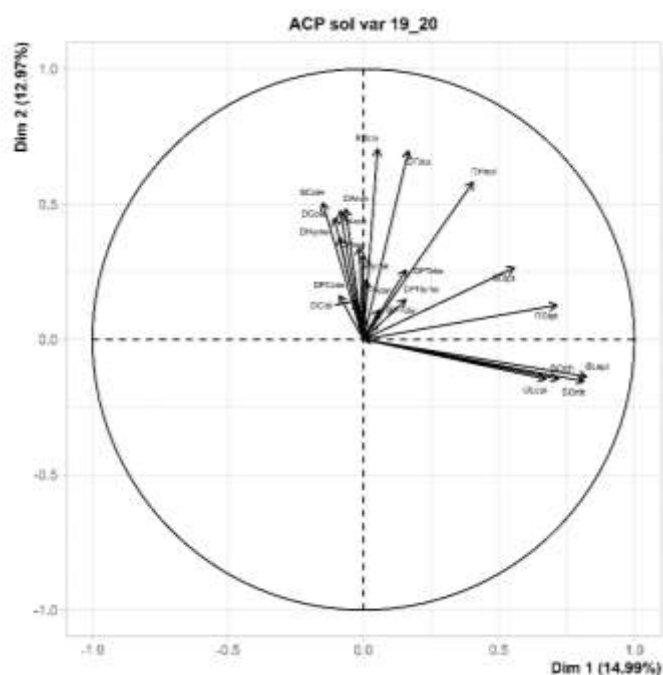
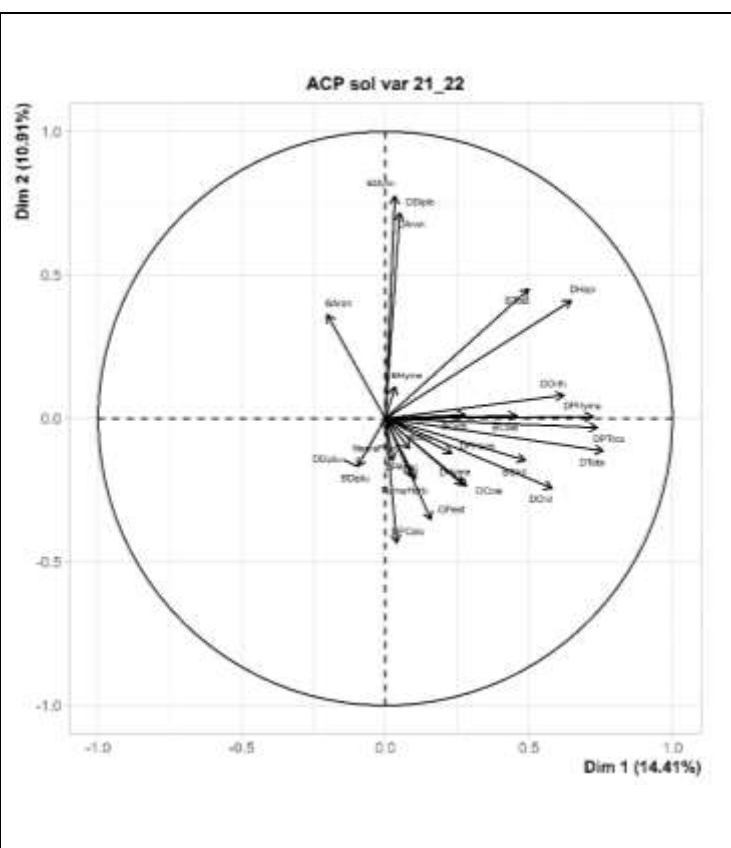


Tableau 20 : Résultats des contributions des variables sur les dimensions 1 et 2 de l'ACP sur les variables du sol sur l'année 2021-2022 et le cercle des corrélations associé

| Contribution | p-value | Dimension | Variables |
|--------------|--------------|-----------|-----------|
| 0,758696163 | 2.177687e-12 | Dim.1 | DTota |
| 0,738372552 | 1.664137e-11 | Dim.1 | DPTota |
| 0,723763962 | 6.417825e-11 | Dim.1 | DPHyme |
| 0,647670443 | 2.229720e-08 | Dim.1 | DHapl |
| 0,622099497 | 1.121695e-07 | Dim.1 | DOrth |
| 0,580983226 | 1.133871e-06 | Dim.1 | DChil |
| 0,499675974 | 4.811552e-05 | Dim.1 | BTota |
| 0,487860195 | 7.689106e-05 | Dim.1 | BChil |
| 0,457971102 | 2.338123e-04 | Dim.1 | BCole |
| 0,281948543 | 2.907186e-02 | Dim.1 | DCole |
| 0,279491578 | 3.056488e-02 | Dim.1 | BOrth |
| 0,271979139 | 3.553305e-02 | Dim.1 | DHyme |
| 0,775525914 | 3.454508e-13 | Dim.2 | DDiplo |
| 0,775525914 | 3.454508e-13 | Dim.2 | BDiplo |
| 0,717378666 | 1.127403e-10 | Dim.2 | D Aran |
| 0,451173147 | 2.969318e-04 | Dim.2 | BTota |
| 0,410942394 | 1.107994e-03 | Dim.2 | DHapl |
| 0,36208409 | 4.471281e-03 | Dim.2 | BAran |
| -0,352376695 | 5.758016e-03 | Dim.2 | D Pest |
| -0,433811282 | 5.347141e-04 | Dim.2 | DPCole |



Annexe 8.B : Projection des SFR sur les axes 1 et 2 des ACP sur les variables du sol

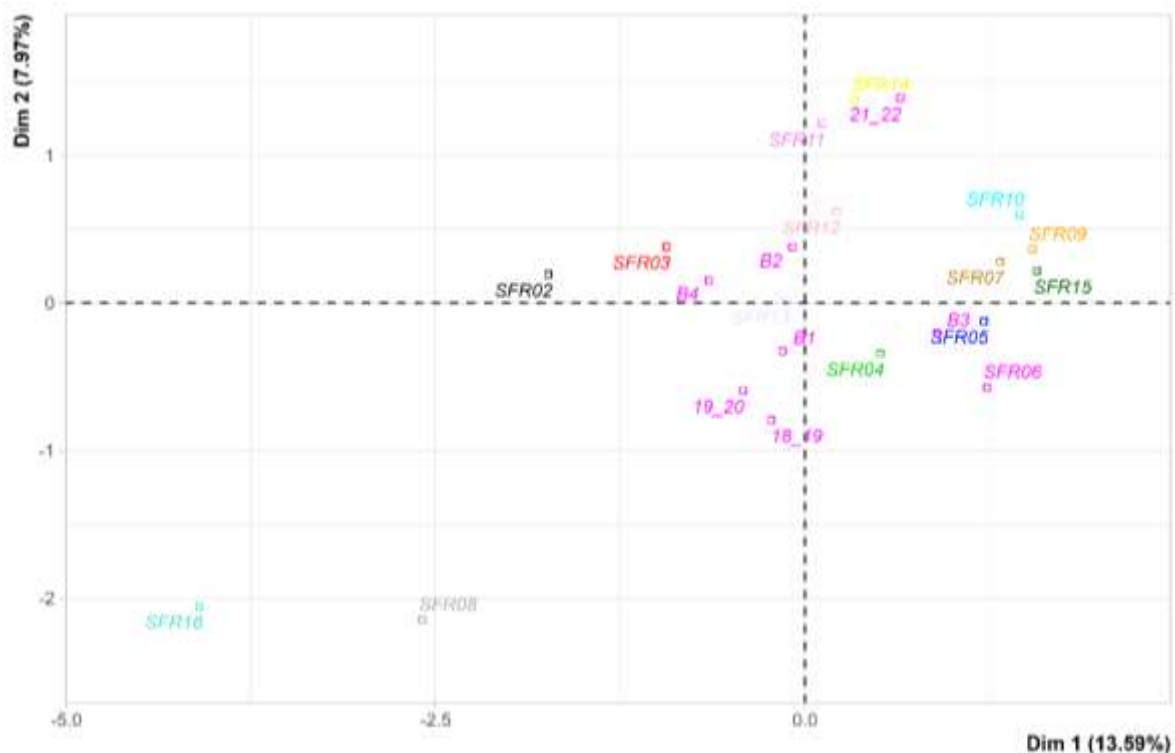


Figure 34 : Projection des SFR sur les axes 1 et 2 de l'ACP réalisé sur les variables du sol pour toutes les années

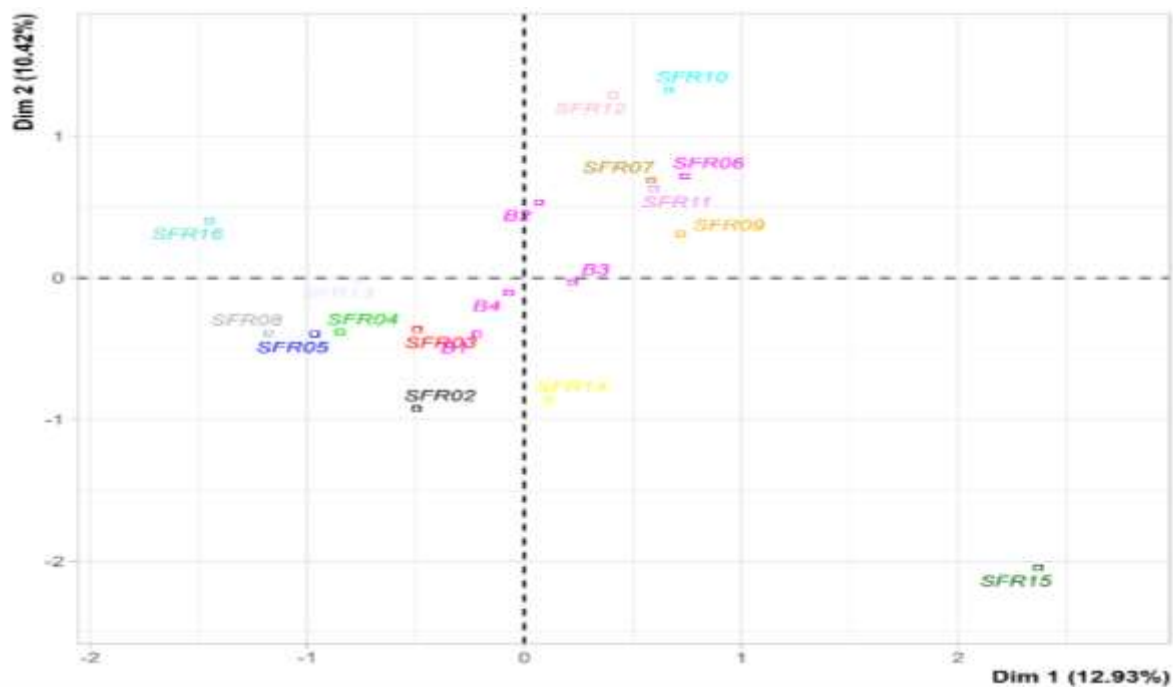


Figure 35 : Projection des SFR sur les axes 1 et 2 de l'ACP réalisé sur les variables du sol pour le cycle de culture 2018-2019

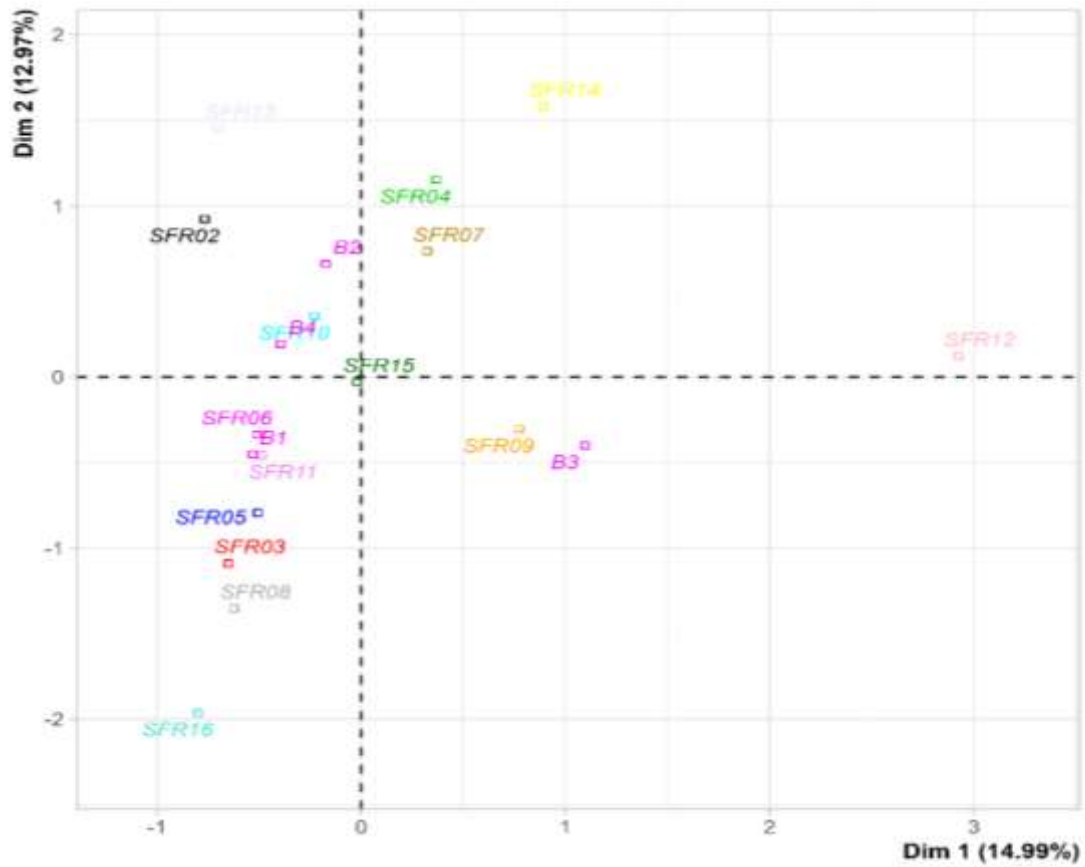


Figure 36 : Projection des SFR sur les axes 1 et 2 de l'ACP réalisé sur les variables du sol pour le cycle de culture 2019-2020

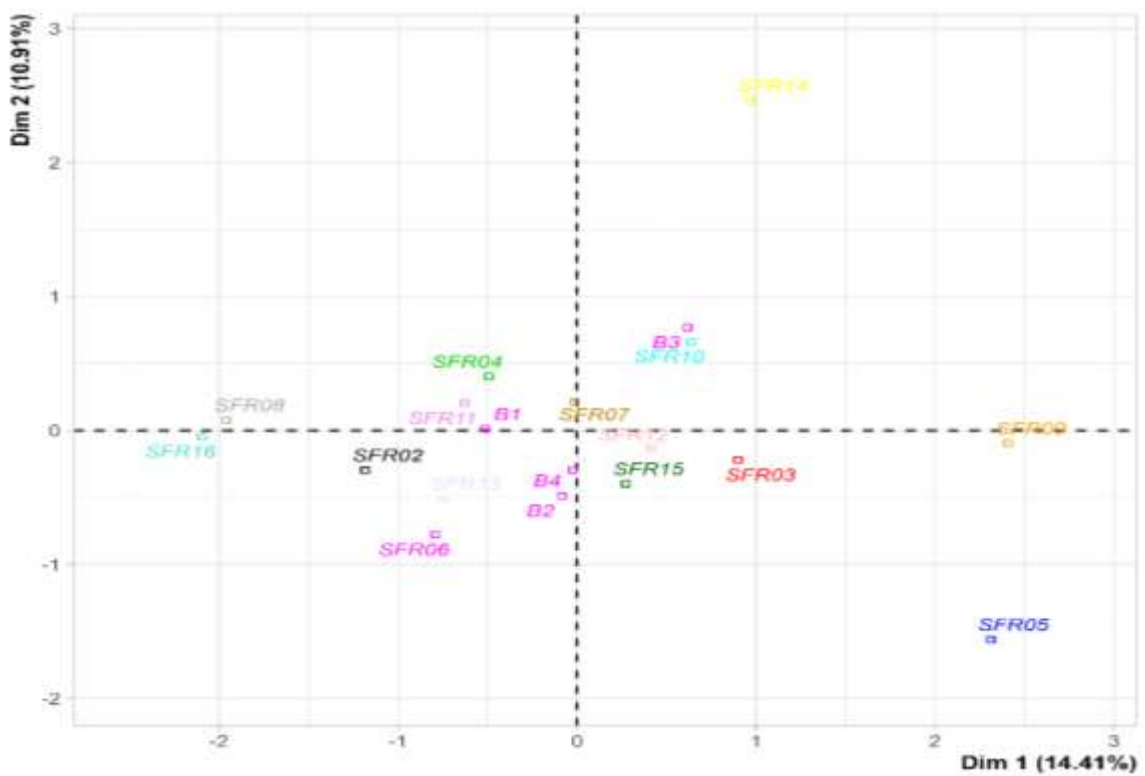


Figure 37 : Projection des SFR sur les axes 1 et 2 de l'ACP réalisé sur les variables du sol pour le cycle de culture 2021-2022

Annexe 9 : Graphiques présentant les résultats des test de Random Forest pour voir l'effet des SFR sur la densité de macrofaune du sol

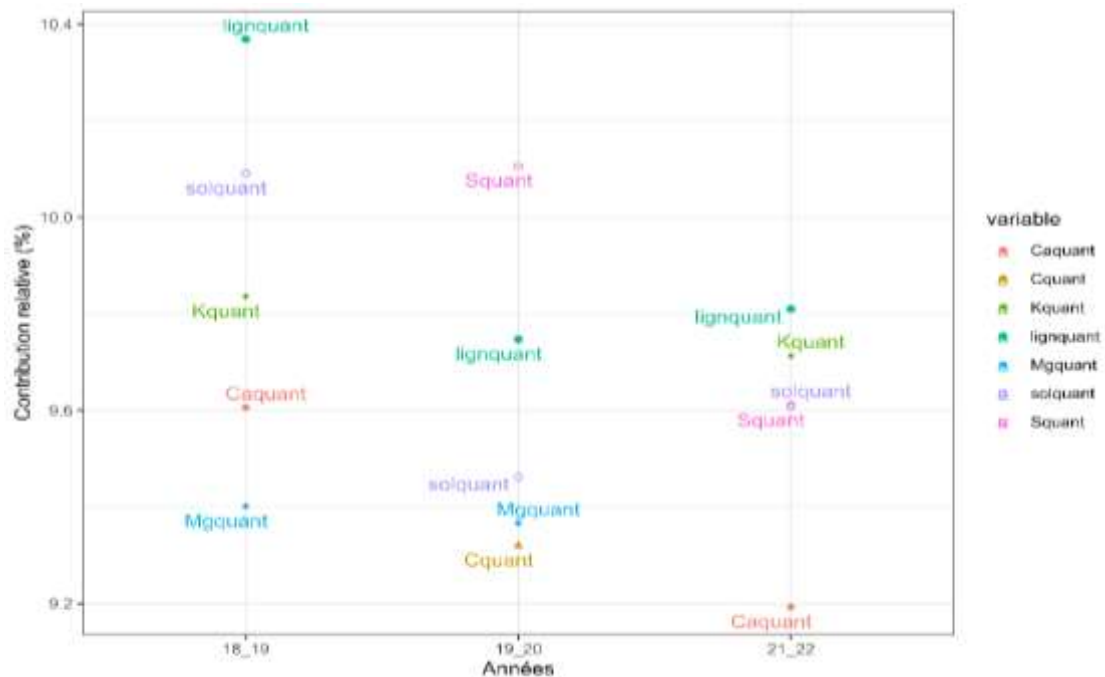


Figure 38 : Représentation des résultats des cinq variables (éléments chimiques ou ratio) ayant montré la contribution relative (%) la plus élevée à la densité de macrofaune pour chaque année. Résultats issus d'un test RF, avec un set.seed = 140 et 500 arbres, sur tous les SFR. Les variables sont décrites dans la

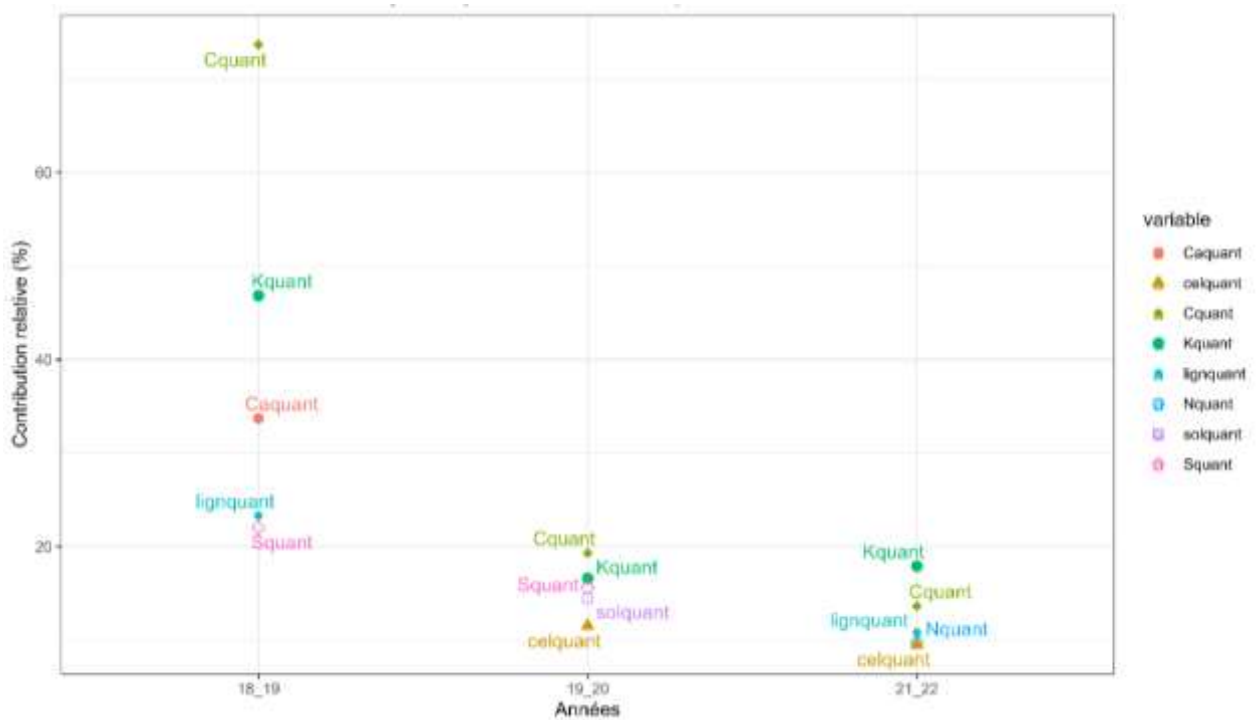


Figure 43 : Représentation des résultats des cinq variables (éléments chimiques ou ratio) ayant montré la contribution relative (%) la plus élevée à la densité de macrofaune pour chaque année. Résultats issus d'un test RF, avec un set.seed = 140 et 500 arbres, sur tous les SFR sauf le SFR 16. Les variables sont décrites dans la figure 11.

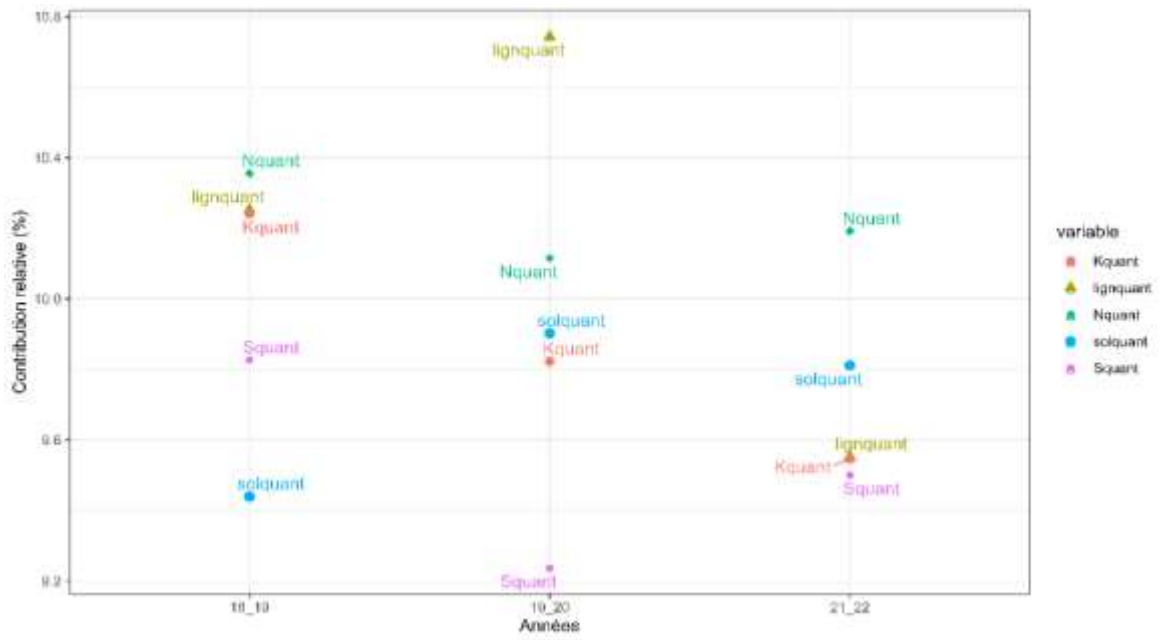


Figure 48 : Représentation des résultats des cinq variables (éléments chimiques ou ratio) ayant montré la contribution relative (%) la plus élevée à la densité de macrofaune pour chaque année. Résultats issus d'un test RF, avec un $set.seed = 140$ et 500 arbres, sur tous les SFR sauf les SFR 16 et 08. Les variables sont décrites dans la figure 11.

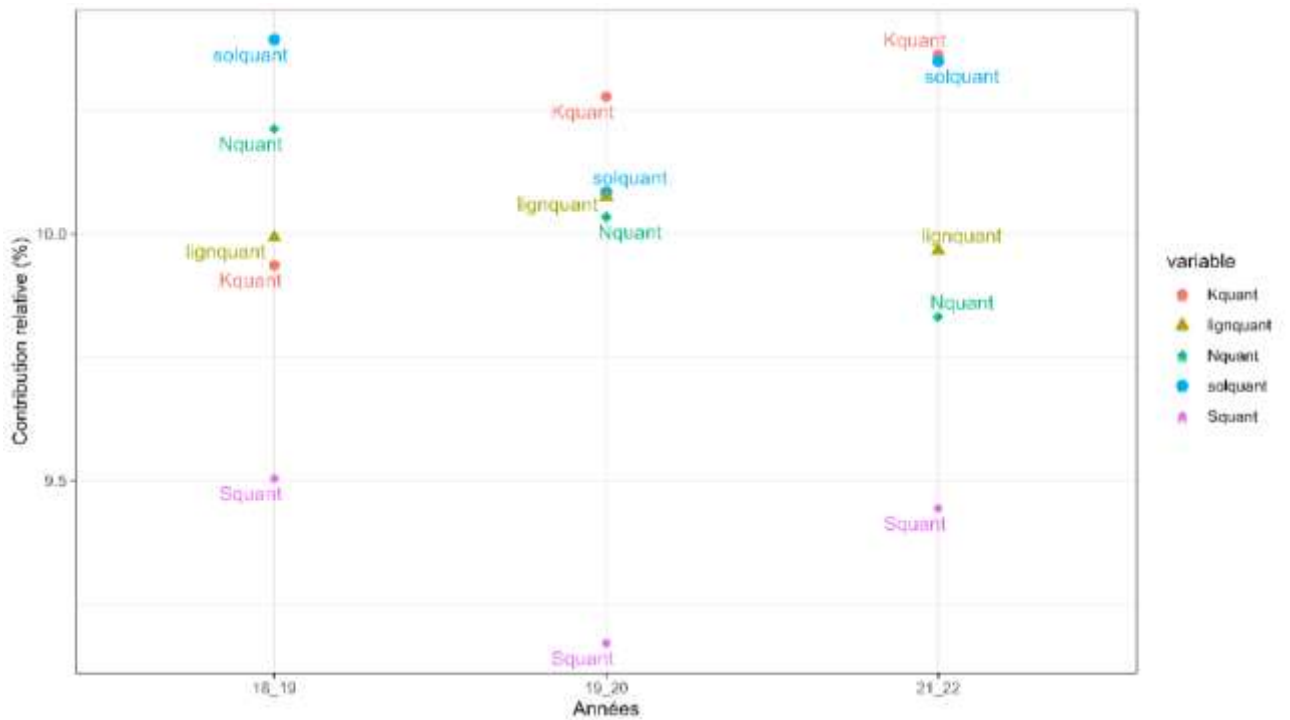


Figure 53: Représentation des résultats des cinq variables (éléments chimiques ou ratio) ayant montré la contribution relative (%) la plus élevée à la densité de macrofaune pour chaque année. Résultats issus d'un test RF, avec un $set.seed = 140$ et 500 arbres, sur tous les SFR sauf les SFR 16, 08, 02 et 03. Les variables sont décrites dans la figure 11.